

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 1

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.

Jessica Patricia Burgos Arias

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Codirectora

Daniela Cristina Rey Romero

MSc. en Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 2

### **Agradecimientos**

Extiendo mi profundo agradecimiento a las personas que me guiaron, orientaron y acompañaron durante el desarrollo de este proyecto de investigación:

A mi director, el profesor Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

A mi codirectora, la profesora Daniela Cristina Rey Romero

A las personas del barrio La Victoria que muy amablemente dispusieron de su tiempo para responderme el cuestionario

A los residentes de la vivienda de estudio, que siempre se mostraron muy dispuestos a participar en las campañas de aforos y muestreos

De igual forma, agradezco a las instituciones que fueron fuente de financiación para el desarrollo del proyecto:

A la Universidad Industrial de Santander

A la Escuela de Ingeniería Civil

Al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental-GPH

Un especial agradecimiento al Ingeniero José Ordoñez que por medio de su diligente trabajo propició que la empresa Martin Membrane Systems haya donado la membrana de ultrafiltración utilizada en esta investigación.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Justificación .....	15
2. Marco de referencia .....	17
2.1 Marco conceptual y estado del arte.....	17
2.1.1 Percepción social hacia el reúso de las AGC.....	17
2.1.2 Volúmenes de producción de las AGC.....	18
2.1.3 Calidad de las AGC .....	19
2.1.4 Tratamiento de las AGC .....	20
3. Objetivos.....	26
3.2 Objetivo general.....	26
3.2 Objetivos específicos .....	26
4. Materiales y métodos .....	27
4.1 Fase 1: Caracterización de hábitos de consumo de agua potable y percepciones sobre la reutilización de las AGC.....	27
4.1.1 Área de estudio .....	27
4.1.2 Elaboración del cuestionario como herramienta de la encuesta .....	28
4.1.3 Determinación del tamaño de muestra.....	29
4.1.4 Aplicación de la encuesta.....	30
4.1.5 Análisis de datos .....	31

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 4

4.2 Fase 2: Determinación del consumo de agua potable y de la producción y calidad del AGC generada en una vivienda.....	33
4.2.1 Selección de la vivienda de estudio .....	33
4.2.2 Medición diaria del consumo de agua potable.....	34
4.2.3 Medición del volumen diario de producción de AGC (duchas y lavamanos) .....	34
4.2.4 Recolección de muestras de AGC.....	36
4.2.5 Métodos analíticos para determinar la calidad del AGC recolectada .....	38
4.2.6 Análisis de datos .....	39
4.2.6.1 Consumo de agua potable .....	39
4.2.6.2 Producción de AGC .....	40
4.2.6.3 Caracterización de las AGC.....	41
4.3 Fase 3: Evaluación del desempeño de dos tecnologías para el tratamiento de las AGC .....	42
4.3.1 Configuración experimental de los prototipos a escala de laboratorio .....	42
4.3.2 Instalación del FLA.....	45
4.3.3 Instalación y activación de la membrana de UF .....	48
4.3.4 Puesta en marcha y ejecuciones experimentales.....	50
4.3.5 Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las AGC crudas y tratadas .....	51
4.3.6 Análisis de datos .....	51
5. Resultados y Discusión.....	52
5.1 Caracterización de hábitos de consumo de agua potable y percepciones sobre la reutilización de las AGC .....	54
5.1.1 Características demográficas de los encuestados.....	54

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 5

5.1.2 Factores que afectan el consumo de agua potable .....	55
5.1.3 Factores que influyen sobre la aceptación de reúso del AGC .....	59
5.2 Consumo de agua potable en la vivienda de estudio .....	71
5.3 Producción de AGC en la vivienda de estudio .....	77
5.4 Caracterización de las AGC generadas en la vivienda de estudio .....	81
5.5 Evaluación del desempeño del sedimentador + FLA y del sedimentador + MUF .....	95
5.5.1 Eficiencias del tren de tratamiento del sedimentador más el FLA .....	97
5.5.2 Eficiencias del tren de tratamiento del sedimentador más la MUF .....	101
5.5.3 Comparación de los dos trenes de tratamiento (sedimentador + FLA vs sedimentador +MUF) .....	103
5.6 Propuesta de sistemas de tratamiento y reúso de AGC aplicable al contexto de estudio .....	105
6. Conclusiones .....	111
6.1 Objetivo específico 1 .....	111
6.2 Objetivo específico 2 .....	112
6.3 Objetivo específico 3 .....	113
7. Recomendaciones .....	114
Referencias Bibliográficas .....	116
Apéndices.....	142

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Estudios que han evaluado la eficiencia de las membranas de UF para tratamiento de AG y AGC .....	25
Tabla 2. Estructura del cuestionario e información abordada.....	29
Tabla 3. Métodos empleados para el análisis de los parámetros de calidad medidos en el AGC	39
Tabla 4. Pruebas estadísticas aplicadas para conocer la variabilidad en la calidad de las AGC ..	42
Tabla 5. Condiciones de funcionamiento del FLA .....	47
Tabla 6. Especificaciones técnicas del módulo de membrana CUBE mini FM .....	50
Tabla 7. Actividades que influyen en el consumo de agua y la producción de AGC.....	59
Tabla 8. Relación de las variables sociodemográficas y la percepción hacia el reúso de las AGC .....	61
Tabla 9. Consumo de agua promedio a nivel doméstico (L/per*día) .....	72
Tabla 10. Variación del consumo de agua potable respecto al uso de la lavadora .....	75
Tabla 11. Volúmenes de producción promedio de las AGC (L/per*día) .....	79
Tabla 12. Calidad del AGC generada en la vivienda de estudio .....	82
Tabla 13. Características del AGC en esta investigación, en comparación con otros estudios ....	83
Tabla 14. Matriz de correlación de Spearman que muestra la relación entre los contaminantes generados en la vivienda de estudio para el AGC con intervalo de confianza del 95% .....	94
Tabla 15. Características de las AGC en cada efluente del tren de tratamiento y porcentajes promedio de remoción .....	96

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 7

Tabla 16. Comparación de los efluentes en cada tren tratamiento (sedimentador + FLA vs sedimentador + MUF).....	104
Tabla 17. Parámetros de calidad para usos urbanos .....	108
Tabla 18. Límites máximos permitidos por la normativa Chilena vs la calidad de los efluentes	108

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio.....	28
Figura 2. Plano de la vivienda seleccionada para realizar las campañas de aforos y muestreos de AGC .....	34
Figura 3. Esquema de la planta piloto para tratamiento del AGC a escala de laboratorio .....	44
Figura 4. Esquema del FLA una vez construido.....	48
Figura 5. Módulo de la membrana de UF .....	49
Figura 6. Información demográfica de los individuos encuestados.....	54
Figura 7. Consumo promedio per cápita de agua potable según el número de habitantes en los hogares .....	56
Figura 8. Disposición de los individuos encuestados para el reúso de las AGC tratadas en función del sexo, edad y nivel educativo (n = número de respuestas).....	60
Figura 9. Razones de los encuestados para el rechazo del reúso de AGC (n = 34 hogares encuestados que rechazaron el reúso del AGC).....	64
Figura 10. Disposición de los encuestados para reutilizar las AGC tratadas en función del área de la vivienda; n = número de hogares encuestados.....	65
Figura 11. Tendencia de preferencia hacia las posibles aplicaciones de reúso de las AGC tratadas (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC).....	66
Figura 12. Disposición de los encuestados a invertir en un sistema de reutilización de AGC dentro de su vivienda (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC).....	68

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 9

Figura 13. Frecuencia con que los encuestado estarían dispuestos a realizar actividades de operación del sistema de reutilización de AGC (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC).....	70
Figura 14. Frecuencia con que los encuestados estarían dispuestos a realizar actividades de mantenimiento del sistema de reutilización de AGC (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC) .....	71
Figura 15. Variación del consumo de agua potable en la vivienda de estudio en los diferentes días de la semana (98 días de monitoreo).....	74
Figura 16. Consumo de agua potable relacionado con la frecuencia de descarga de inodoros ....	77
Figura 17. Variación de la producción de AGC en la vivienda de estudio a lo largo de la semana (124 días de monitoreo) .....	81
Figura 18. Propuesta de sistemas de tratamiento y reúso de AGC .....	111

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 10

### **Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Revisión sistemática de literatura .....	14142
Apéndice B. Encuesta aplicada en la zona de estudio .....	148
Apéndice C. Detalle de los equipos utilizados en las campañas de aforos y muestreos.....	154
Apéndice D. Especificaciones técnicas de cada unidad de tratamiento.....	164
Apéndice E. Análisis estadísticos aplicados .....	171
Apéndice F. Productos de cuidado e higiene corporal utilizados en la vivienda de estudio .....	225

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 11

## Resumen

**Título:** Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial de Área Metropolitana de Bucaramanga, caso de estudio: barrio la Victoria\*

**Autor:** Jessica Patricia Burgos Arias\*\*

**Palabras Clave:** aguas grises claras, aceptación pública, hábitos de usos, reúso, características, producción, tratamiento.

**Descripción:** La reutilización de aguas grises claras (AGC) es una alternativa para disminuir el consumo de agua potable y mitigar la escasez hídrica. No obstante, se presentan desafíos en su implementación relacionados con la percepción social hacia el reúso de estas aguas, y la falta de estudios sobre la producción y caracterización de las AGC. Esta investigación abordó estos desafíos, evaluando: i) hábitos de uso del agua y percepción social hacia la reutilización de AGC en el barrio La Victoria, ii) producción y calidad de las AGC en una vivienda familiar del mismo barrio, y iii) desempeño de dos trenes tecnológicos a escala de laboratorio, para el tratamiento y reúso de AGC. Los resultados muestran una disposición mayoritaria hacia la aceptación del reúso de AGC, especialmente en mujeres (75%); personas en edades entre 20 y 59 años (>70%); y personas con formación técnica y profesional (>71). La principal preocupación relacionada con el reúso de AGC es la posible afectación a la salud (94%). El uso más aceptado del AGC fue la descarga de inodoros (95%). La producción de AGC constituye aproximadamente el 21% del consumo de agua potable en la vivienda estudiada, mostrando alta variabilidad en contenido de nutrientes y carga microbiológica. Se identificó que el tratamiento con sedimentador y filtro lento de arena es una opción viable para eliminar turbidez, sólidos suspendidos, nutrientes y materia orgánica de las AGC, con una eficiencia de remoción superior al 90%. Se recomienda profundizar en el análisis de tecnologías de tratamiento, considerando factores operativos como tasas de filtración, condiciones hidráulicas y mantenimiento, para optimizar el rendimiento de los sistemas, incluyendo la membrana de ultrafiltración. Estos hallazgos no solo amplían el entendimiento sobre AGC, sino que también proponen soluciones tecnológicas aplicables a nivel residencial para una gestión sostenible del agua.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD. Codirectora: Daniela Cristina Rey Romero, MSc.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 12

### Abstract

**Title:** Evaluation of light grey water treatment and reuse systems for residential areas in the metropolitan area of Bucaramanga: a case study of the La Victoria neighborhood\*

**Author(s):** Jessica Patricia Burgos Arias \*\*

**Key Words:** Light greywater, public acceptance, consumption habits, reuse, characteristics, production, treatment.

**Description:** The reuse of light greywater (LGW), which includes wastewater from non-toilet sources such as sinks, showers, and laundry, presents a promising alternative for reducing drinking water consumption and addressing water scarcity. Despite its potential benefits, challenges persist in implementing LGW reuse, including social perceptions and limited studies on its production and characterization. This research aimed to address these challenges by evaluating: i) water use habits and social perceptions toward LGW reuse in the La Victoria neighborhood, ii) the production and quality of LGW in a family home within the same neighborhood, and iii) the performance of two treatment technologies on a laboratory scale for LGW treatment and reuse. Findings indicate a generally favorable disposition toward LGW reuse, particularly among women (75%); individuals aged between 20 and 59 years (>70%); and those with technical or vocational training (>71%). However, concerns regarding potential health impacts remain prevalent (94%). Toilet flushing emerged as the most widely accepted use for AGC (95%). The study revealed that LGW production accounts for approximately 21% of drinking water consumption in the studied household, with significant variability in nutrient content and microbiological load. Treatment with a grease trap and slow sand filter demonstrated high efficacy in removing turbidity, suspended solids, nutrients, and organic matter from LGW, achieving removal efficiencies exceeding 90%. Further analysis of treatment technologies, considering operational factors such as filtration rates, hydraulic conditions, and maintenance, is recommended to optimize system performance, including the utilization of ultrafiltration membranes. These findings not only contribute to a deeper understanding of LGW but also propose viable technological solutions applicable at the residential level for sustainable water management, with potential implications for policy-making and practical implementation.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Civil Engineering Department, Master of Science in Civil Engineering. Advisor: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD. Co-advisor: Daniela Cristina Rey Romero, MSc.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 13

## **Introducción**

### **1. Planteamiento del problema**

A nivel global, cerca de 4 mil millones de personas experimentan escasez física de agua (UN WATER, 2019), situación que se intensifica debido al crecimiento poblacional, cambio climático y desarrollo económico (Kaur et al., 2023; Nazari & Keshavarz, 2023; Soares Ascensão et al., 2023). Aproximadamente el 50% de las aguas residuales generadas a nivel mundial son vertidas a ríos y océanos sin recibir tratamiento alguno, deteriorando la calidad del recurso hídrico y generando riesgos para la salud pública (Shemer et al., 2023). Ante este escenario, globalmente se buscan alternativas para la gestión integral del recurso hídrico, entre las que se incluye la reutilización de las aguas residuales (AR) (Al Hamedí et al., 2023), especialmente las aguas grises (AG) (Cecconet et al., 2019; Singh et al., 2020). Las AG se pueden clasificar en aguas grises oscuras (AGO) y aguas grises claras (AGC). Las AGO provienen de lavadoras, lavavajillas y fregaderos de cocina (Khanam & Patidar, 2022); las AGC provienen de bañeras, duchas y lavamanos, y presentan menor carga contaminante con respecto a las demás AG (Ghunmi et al., 2011). Esta clasificación es muy importante, ya que de esta dependerá la complejidad del sistema de tratamiento, el volumen potencialmente reutilizable y la calidad de agua tratada (Oyebode & Waterway, 2023).

La alternativa de reutilizar las AG se ha venido investigando de manera rigurosa, en países como España (March et al., 2004), Alemania (F. Li, Gulyas, et al., 2009; Morandi et al., 2021a), Australia (Gardner, 2003), Dinamarca (Prajapati et al., 2019), Siria (Mourad et al., 2011), Qatar (Ashfaq & Qiblawey, 2018), China (ShiGuang et al., 2021), Brasil (Zipf et al., 2016) y Japón (Ogoshi et al., 2001). Particularmente en Canadá, Estados Unidos, Alemania y Francia, se plantea

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 14

que estas aguas sean reutilizadas para la descarga de inodoros (Kant & Jaber, 2020; Lazarova et al., 2003; Palmarin & Young, 2019), aunque existen otras aplicaciones de reúso a nivel descentralizado como limpieza de pisos, riego de jardines y lavado de vehículos (Kamińska & Marszałek, 2020; Penn et al., 2012; Rico Amorós et al., 2016). Sin embargo, es importante resaltar que las AGC se presentan como la alternativa más viable para su reúso, debido a su menor contenido de carga contaminante (Oktor & Çelik, 2019; Ziemba et al., 2018).

Colombia es un país en el que no se brindan servicios de agua potable y saneamiento al 100% de su población (Méndez, 2020; Ruiz et al., 2020). Según Superservicios, al año 2022 únicamente el 70% de las aguas residuales fueron tratadas, y de los 1102 municipios, únicamente 531 cuentan con una cobertura del servicio público de alcantarillado en áreas urbanas que oscila entre el 90% y el 100%. En contraste, en áreas rurales, solo 27 municipios alcanzan una cobertura similar, también comprendida entre el 90% y el 100% (Superservicios, 2023). Actualmente el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) cuenta con un sistema centralizado en el cual las aguas residuales son recolectadas y transportadas hasta la PTAR Río Frío, que tiene una cobertura de usuarios del 24%, por lo que más del 70% de las aguas residuales de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón son vertidas al río de Oro, usualmente por las escarpas occidentales. Adicionalmente el río Suratá también recibe las aguas residuales sin tratar de la zona Norte de Bucaramanga (López, 2015).

De otro lado, en Colombia, del total de agua destinada para usos domésticos, aproximadamente el 71% no requiere que su calidad sea de agua potable (por ejemplo, el agua destinada para actividades como limpieza pisos y viviendas, descarga de inodoros y riego de jardines) (Oviedo-Ocaña et al., 2018), por lo que se podría pensar en reutilizar las AG para dichas

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 15

actividades (Domínguez et al., 2017), reduciendo así, la demanda de agua potable a nivel residencial.

Teniendo en cuenta que los hábitos de consumo de agua, producción de AGC, y la percepción social del reúso de AGC son particulares de cada contexto, con el propósito de posicionar estas opciones de tratamiento y reúso descentralizado de AGC en el contexto colombiano, es fundamental contar con información clave sobre los hábitos sociales relacionados con el consumo de agua y producción de AGC, así como de las características fisicoquímicas y microbiológicas de estos efluentes. Esta información es clave para determinar los usos de las AGC tratadas, la selección de opciones tecnológicas, el dimensionamiento de los sistemas. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han realizado en países desarrollados (Fielding et al., 2019), y la información es limitada en el contexto colombiano.

Con base en lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿qué factores influyen en la producción de AGC y la percepción hacia la reutilización del agua en una zona residencial?; ¿qué factores pueden influir en la producción y composición de las AGC generadas en una vivienda residencial?; y ¿qué trenes tecnológicos podrían ser implementados a nivel descentralizado para el tratamiento y reúso de las AGC producidas?

## **2. Justificación**

Existen beneficios asociados a la implementación de sistemas de tratamiento y reúso de las AG a nivel descentralizado, tales como ahorros derivados a los costos en las facturas del servicio público de abastecimiento de agua (Radin Mohamed et al., 2016), disminución en el volumen de agua residual captada por todo el sistema de redes de alcantarillado (Penn et al., 2013), reducción significativa en inversión para infraestructura de las plantas de tratamiento de agua residual

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 16

(PTAR) (reducción de volumen de agua residual) (Penn et al., 2012), menores cargas de contaminación en las aguas superficiales (Delhiraja & Philip, 2020a) y por último, reducción en los volúmenes de extracción de aguas superficiales y subterráneas (Prats-Rico, 2016). Asimismo, Leiva et al. (2021) evaluaron la viabilidad económica de reutilización descentralizada de las AG, teniendo en cuenta los costos de capital, operación y mantenimiento de un sistema de tratamiento, concluyendo de esta manera que la alternativa más favorable para reutilizar las AG a nivel descentralizado es tratar solamente las AGC.

Con base en lo anterior, este estudio busca extraer información local, centrándose en la comprensión de la percepción social hacia el reúso del AGC así como en la evaluación de la producción y calidad de las AGC. La importancia de este enfoque reside en su capacidad para proporcionar datos contextualizados y específicos que permiten seleccionar y diseñar tecnologías de tratamiento más efectivas y adaptadas a las necesidades y realidades locales. Además, esta aproximación no solo contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos, sino que también fomenta la adopción de prácticas ambientalmente responsables y socialmente aceptadas. Finalmente, desempeña un papel clave en la formulación de políticas públicas destinadas a promover la reutilización domiciliar de AGC en el contexto de estudio.

El presente trabajo de investigación identificó tecnologías para el tratamiento y reúso de AGC, que contribuyan a mejorar la gestión urbana del recurso hídrico en el AMB, ante escenarios de escasez hídrica previstos para el año 2050 (CEPAL, 2019). De esta manera, representa un aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS6 correspondiente a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 17

para todos y el ODS11 donde se plantea lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (ONU, 2020).

De otro lado, esta investigación, se articula con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (MAVDT, 2010) que tiene como meta la conservación y sostenibilidad del recurso hídrico mediante una gestión y uso eficiente de los ecosistemas que brinda la oferta hídrica del país; y con la Política Nacional de Edificaciones Sostenibles - Documento CONPES 3919) (MAVDT, 2018) que tiene como meta la implementación de criterios de sostenibilidad dentro de cada una de las etapas del ciclo de vida de las edificaciones, especialmente enfocado en el ahorro del consumo de agua e implementación de sistemas para la recolección y reutilización de aguas grises.

## **2. Marco de referencia**

### **2.1 Marco conceptual y estado del arte**

En este apartado se sintetizan los principales hallazgos de literatura publicada, relacionados a aspectos de interés de las AGC, como volúmenes de producción, propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, y principales tecnologías evaluadas para su tratamiento y reúso. Asimismo, se describen las principales variables que pueden influir en la percepción social hacia la reutilización del agua. El proceso de búsqueda y selección de literatura utilizado para esta revisión se expone en el Apéndice A.

#### ***2.1.1 Percepción social hacia el reúso de las AGC***

El éxito en la implementación del reúso de las AGC se encuentra intrínsecamente relacionado a la comprensión de las prácticas de consumo de agua a nivel residencial que inciden en la generación de AGC (Arbués et al., 2003; Noutsopoulos et al., 2018a), así como a la

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 18

percepción de los usuarios para la adopción de dichos sistemas (Abdelrahman et al., 2020; Boyjoo et al., 2013; Radingoana et al., 2020). La aceptación social del reúso de agua en general se encuentra sujeta a la influencia de variables demográficas (edad, sexo, nivel de formación académica, nivel de ingresos, ocupación laboral, propiedad del predio/vivienda), culturales y religiosas, siendo objeto de análisis y evaluación en diversos contextos.

En Turquía se ha observado que tanto el sexo como el nivel educativo tienen un impacto significativo en la predisposición hacia la reutilización del agua (Buyukkamaci & Alkan, 2013). En el caso de Australia, diversos factores como la educación, la edad, el conocimiento sobre el reúso, los ingresos y el sexo han sido identificados como determinantes que inciden en los niveles de aceptación del agua reciclada (Dolnicar et al., 2005). En Estados Unidos, se ha encontrado que factores como la ubicación geográfica (es decir, la residencia en zonas urbanas o rurales), el acceso a información y la etnia, juegan un papel crucial en la percepción del reúso (Garcia-Cuerva et al., 2016). Por otro lado, en Arabia Saudita, se ha demostrado que el nivel de educativo de los encuestados ejerce una influencia en sus actitudes y aceptación hacia la reutilización (Mu'azu et al., 2020). Estos hallazgos, muestran la necesidad de analizar detenidamente cada uno de estos factores dentro del contexto específico de interés, dado que pueden desempeñar un papel clave en la formulación de políticas públicas orientadas a promover la reutilización domiciliar de AGC (Al-Khatib et al., 2022).

### ***2.1.2 Volúmenes de producción de las AGC***

La producción de AGC en una vivienda varía en cantidad a lo largo del día (Penn et al., 2012) y la semana (Noutsopoulos et al., 2018b). Las AG representan entre el 60% al 80% de la producción total de aguas residuales domésticas (ARD) (Al-Gheethi et al., 2019; Nautiyal et al.,

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 19

2017) y aproximadamente el 51% de estas AG son específicamente AGC (Antonopoulou et al., 2013a). Los países desarrollados presentan una contribución mayor de AGC provenientes de los baños, posiblemente debido al mayor uso de bañeras en estos países (I. Shaikh & Ahammed, 2022). En general, la cantidad de AGC generadas es suficiente para su reutilización en la descarga de inodoros; práctica que podría reducir la demanda de agua potable entre 30% a 38% (Dwumfour-Asare et al., 2017).

La estimación de tasas de producción y caudales permite el dimensionamiento de los volúmenes de almacenamiento en cada uno de los procesos del tratamiento, contribuyendo así a un diseño eficiente y efectivo del sistema (Ghaitidak & Yadav, 2013a; I. N. Shaikh, Ahammed, et al., 2019). Por lo que se vuelve imperativo realizar un análisis previo orientado a la producción de las AGC, previo a la toma de decisiones para la selección de tecnologías apropiadas para el tratamiento de las AGC, así como de las estrategias asociadas a su reutilización.

### ***2.1.3 Calidad de las AGC***

La variabilidad en la composición de las AGC es un desafío para la selección de sistemas de tratamiento y reúso a nivel descentralizado (Bakare et al., 2017; Vuppaladadiyam et al., 2019). Esta variación en la calidad de las AGC está influenciada por factores como la accesibilidad y calidad del suministro de agua, tamaño del hogar, distribución por sexo y edades de los ocupantes de la vivienda, estilo de vida, patrones de uso del agua, elección del consumidor hacia los productos de limpieza y cuidado personal, calidad de vida, nivel de ingresos, condiciones climáticas, entre otros (Mahmoudi et al., 2021; Oteng-Peprah, de Vries, et al., 2018).

Los contaminantes de mayor relevancia de las AGC son sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en los jabones, champús y demás productos de cuidado personal; además de grasas

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 20

corporales, hebras de cabello, pelusas, restos de piel, crema de dientes y trazas de orina y heces (Delhiraja & Philip, 2020a; I. N. Shaikh, Ahammed, et al., 2019). Por esta razón, las AGC en general pueden presentar altos niveles de turbiedad, grasas y aceites y sólidos en suspensión. En cuanto a la relación  $DBO_5/DQO$ , se observa que las AGC exhiben una notable biodegradabilidad, manifestada por relaciones  $DBO_5/DQO$  que oscilan entre 0.47 a 0.50 (Boyjoo et al., 2013; De Gisi et al., 2015); sin embargo, el distintivo más relevante que distingue a estas aguas en términos de su biodegradabilidad es la deficiencia de nutrientes (NT y PT), la literatura muestra relaciones  $DQO:N:P$  de 100:2.25:0.06, 100:0.10:0.002 y 100:1.77:0.06 (Jefferson et al., 2004; Kadewa et al., 2020), cifras que están por debajo de la proporción recomendada para la implementación de sistemas de tratamiento biológico, que es de una relación  $DQO:N:P$  de 100:5:1 (Ziemba et al., 2018) y 100:20:1 (Katukiza et al., 2015), lo que representa un desafío en los sistemas de tratamiento de tipo biológico (Atanasova et al., 2017).

En el proceso de tomar decisiones para la selección de tecnologías apropiadas para el tratamiento de las AGC y las estrategias asociadas a su reutilización, es esencial realizar un análisis previo orientado a la calidad de las AGC (Ghaitidak & Yadav, 2013a; I. N. Shaikh, Ahammed, et al., 2019). Determinar las concentraciones materia orgánica y nutrientes presentes en estas aguas es importante para determinar la viabilidad de la incorporación de procesos biológicos para su tratamiento (I. Shaikh & Ahammed, 2022).

#### ***2.1.4 Tratamiento de las AGC***

La reutilización de AG no tratadas puede ocasionar la proliferación de enfermedades y otros peligros asociados a la salud pública, por lo que se vuelve primordial el tratamiento de estas antes de su reutilización (I. N. Shaikh & Ahammed, 2020). Uno de los obstáculos en el tratamiento

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 21

de las AGC, es la naturaleza variable en la composición de estas, lo que representa un desafío en la selección del sistema de tratamiento apropiado (Atanasova et al., 2017). Así mismo, los sistemas de tratamiento descentralizado deben ser asequibles, requerir poca energía, ser compactos, fáciles de operar y mantener por personas que no sean técnicos especializados y/o profesionales y asegurar efluentes de alta calidad a pesar de las variaciones en la calidad del afluente (Prajapati et al., 2019).

Múltiples estudios han propuesto y evaluado alternativas descentralizadas para el tratamiento de AGC, que incluyen procesos físicos, químicos y biológicos, entre ellos se incluyen filtros de arena y grava, investigados a escala de laboratorio (I. N. Shaikh & Ahammed, 2021), membranas de filtración empleadas en sistemas compactos para el tratamiento de las AGC provenientes tanto de centro educativos como de hogares (Kant et al., 2018; Kant & Jaber, 2020; Wu, 2019), biorreactores de membrana utilizados para el tratamiento de las AGC generadas en hoteles (Atanasova et al., 2017), así como para el tratamiento de AGC sintéticas a nivel de laboratorio (Najmi et al., 2020), sistemas naturales como muros verdes integrados en la fachada de edificios, para tratar las AGC provenientes de los mismos (Fowdar et al., 2017) y humedales artificiales de flujo vertical para tratar las AGC provenientes de un campamento de trabajadores (Morandi et al., 2021). Asimismo, se han estudiado procesos de coagulación (Ghaitidak & Yadav, 2015; I. Shaikh & Ahammed, 2021) y desinfección por cloración y UV (Ekeren et al., 2016; Friedler et al., 2021).

El rendimiento de cada sistema de tratamiento depende del tipo y las características propias de afluente a tratar. Con respecto a los procesos biológicos, es probable que presenten problemas durante su operación, debido al bajo contenido de nutrientes que presentan estas aguas (Antonopoulou et al., 2013). Finalmente, los procesos fisicoquímicos para el tratamiento de AG in

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 22

situ no son una alternativa viable en algunos casos, debido al costo de los productos químicos que suelen emplearse en estos procesos (Noutsopoulos et al., 2018).

Con respecto a los tratamientos de filtración, se ha determinado que los filtros de arena son una opción viable, tanto técnica como económicamente (Patil et al., 2020), específicamente, los filtros lentos de arena (FLA). Desde la perspectiva económica, los FLA se caracterizan por su simplicidad tanto en su etapa constructiva como operacional, siendo una tecnología rentable que consume menos energía y no depende de productos químicos ni mano de obra calificada para su operación y mantenimiento (de Souza et al., 2021), por lo que podría ser una alternativa descentralizada de implementación en países en desarrollo. Uno de los parámetros de operación más importantes para tener en cuenta en los FLA es la tasa de filtración, también conocida como tasa de carga hidráulica (HLR por sus siglas en inglés), esta varía entre 0.008 a 0.38 m/h (Verma et al., 2017), sin embargo, se observan mejores eficiencias cuando este valor se encuentra próximo a 0.008 m/h (Katukiza et al., 2014). Por ejemplo, Tyagi et al. (2009) evaluaron el funcionamiento del FLA con diferentes tasas de filtración (0.14, 0.19 y 0.26 m/h) notando un aumento en la capacidad de operación del filtro en la tasa de filtración más baja, debido al hecho de que se proporciona más tiempo para que las partículas y sedimentos presentes en el agua puedan ser retenidos y capturados de manera en la capa de arena de filtración.

En relación con la eficiencia de los FLA, estos presentan altos porcentajes de eliminación de microorganismos patógenos responsables de enfermedades gastrointestinales (Freitas et al., 2023), obteniendo eficiencias de remoción superiores al 95% de coliformes fecales, coliformes totales y estreptococos fecales (Tyagi et al., 2009). En cuanto a la remoción de contaminantes orgánicos, se han obtenido porcentajes de eliminación superiores al 70% y 50% para DQO y DBO<sub>5</sub>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 23

respectivamente, (Maiyo et al., 2023; Verma et al., 2017; Zipf et al., 2016). Asimismo, en términos de turbiedad y sólidos en suspensión, los FLA han alcanzado eficiencias de eliminación superiores al 90% (Freitas et al., 2022) de la turbiedad y 89% de sólidos en suspensión (Tyagi et al., 2009). Finalmente, el FLA ha demostrado eficiencias mayores a 90% en la eliminación de nitrógeno, relacionadas con la ocurrencia de procesos simultáneos de nitrificación-desnitrificación que se llevan a cabo por la comunidad microbiana dentro del filtro (Aslan & Cakici, 2007).

De otro lado, las tecnologías de tratamiento basadas en membranas de filtración, se consideran una alternativa prometedora ya que representan ciertas ventajas debido a su tamaño compacto y su capacidad para producir un efluente de alta calidad debido a su robustez ante la variable composición de las AGC (F. Li, Wichmann, et al., 2009; Wu, 2019). Especialmente, la ultrafiltración (tamaño de poro de 0.01 a 0.1  $\mu\text{m}$ ), es particularmente eficiente en la retención de contaminantes microbianos, materia orgánica y sólidos suspendidos (Ceconet et al., 2019). La versatilidad de las membranas de ultrafiltración (MUF) para su implementación en sistemas descentralizados de reúso de AG ha sido subrayada en múltiples estudios (Ashfaq & Qiblawey, 2018; Kant & Jaber, 2020; Nghiem et al., 2006). Este rasgo las hace particularmente idóneas para su aplicación a nivel de comunidades, contribuyendo a la descentralización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y promoviendo la sostenibilidad a escala local. Finalmente, con relación al requerimiento de energía, las MUF requieren presiones operativas más bajas en comparación con la nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (Ramon et al., 2004).

En la **Tabla 1** se visualizan los diferentes estudios que recalcan el papel crucial de las MUF para el tratamiento de las AG, especialmente en la eliminación de turbiedad, nutrientes y materia orgánica. Adicionalmente, las MUF se caracterizan por alcanzar la eliminación significativa de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 24

bacterias, coloides, materia orgánica y micro contaminantes presentes en los productos farmacéuticos y de cuidado personal (Kamińska & Marszałek, 2020).

**Tabla 1.***Estudios que han evaluado la eficiencia de las membranas de UF para tratamiento de AG y AGC*

<b>Referencia</b>	(Lalley et al., 2023)	(Ramon et al., 2004)	(Ward et al., 2015)	(Šostar-Turk et al., 2005)	(F. Li, Gulyas, et al., 2009)	(Kamińska & Marszałek, 2020)
<b>País de estudio</b>	Misisipi, EE. UU.	Haifa, Israel	Washington, D.C. EE. UU.	Dinamarca	Flintenbreit, Alemania	Silesia,Polonia
<b>Tipo de agua tratada</b>	Se recolectaron las AGC (lavamanos + duchas) del Centro de Entrenamiento de Fuerzas Conjuntas Camp Shelby	Se recolectaron AGC (duchas públicas) ubicadas en el centro deportivo del Instituto Tecnológico Technion	Se preparó AGC sintética para el estudio	Se recolectaron las AG de la lavandería de un hospital	Se recolectaron AG (duchas, lavamanos, lavadoras, lavavajillas y fregaderos de cocina) de una urbanización ecológica	Se recolectaron AG (duchas, lavavajillas y fregaderos de cocina) de un hogar unifamiliar
<b>%remoción CE</b>						57.44%
<b>%remoción turbiedad</b>	98.3%	96.6%	> 99%		99.64%	
<b>%remoción NT</b>				98.91%		59.26%
<b>%remoción PT</b>				95.36%	30.93%	
<b>%remoción DQO</b>	90.5%	69.3%	55 - 60%	53.57%		82.43%
<b>%remoción DBO<sub>5</sub></b>	95.9%			55.9%		100%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 26

### **3. Objetivos**

#### **3.2 Objetivo general**

Proponer sistemas de tratamiento y reúso de AGC aplicables a una zona residencial de la ciudad de Bucaramanga, caso de estudio: barrio La Victoria.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Analizar los hábitos de uso del agua, percepciones y condiciones socioeconómicas que influyen en la producción de las AGC, y su posible reutilización en el sector residencial de estudio.

2. Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y de producción de las AGC generadas en una vivienda residencial del barrio La Victoria ubicado en la ciudad de Bucaramanga.

3. Evaluar el desempeño de dos trenes tecnológicos en prototipos a escala de laboratorio para el tratamiento y reúso de AGC a nivel de viviendas.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 27

## **4. Materiales y métodos**

### **4.1 Fase 1: Caracterización de hábitos de consumo de agua potable y percepciones sobre la reutilización de las AGC**

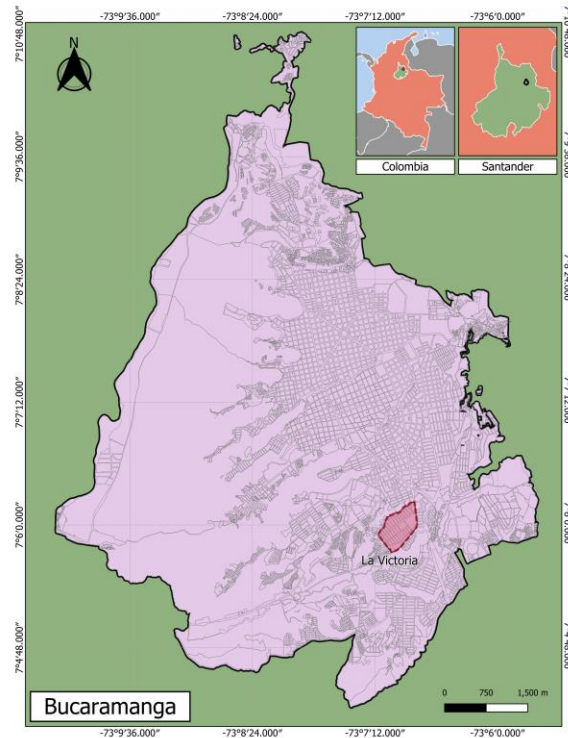
#### ***4.1.1 Área de estudio***

El estudio se desarrolló en el barrio La Victoria en la ciudad de Bucaramanga en el departamento de Santander, Colombia. Las coordenadas geográficas del área son latitud 7°05'58.9"N y 73°06'56.1"O. El barrio se encuentra clasificado dentro de una estratificación socioeconómica nivel cuatro (media) (Alcaldía de Bucaramanga, 2015) y está compuesto por 35 manzanas que albergan 1705 viviendas residenciales (**Figura 1**). Las viviendas típicamente cuentan con una distribución interna que comprende una sala, una cocina, cuatro habitaciones, tres baños y un patio. El sector de estudio presenta una cobertura del 100% en el suministro de agua potable, alcantarillado, electricidad y gestión de residuos sólidos. Esta infraestructura completa garantiza condiciones adecuadas para el abastecimiento de agua y el tratamiento de aguas residuales en todas las viviendas incluidas en el presente estudio.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 28

## Figura 1.

*Localización del área de estudio*



### *4.1.2 Elaboración del cuestionario como herramienta de la encuesta*

Con el objetivo de investigar y analizar las prácticas domésticas y el uso del agua a nivel de hogares, se llevó a cabo una encuesta mediante el uso de un cuestionario. Este cuestionario fue la herramienta principal utilizada para recopilar datos cuantitativos y cualitativos. La estructura y contenido del cuestionario se diseñaron tomando como base la revisión de investigaciones previas realizadas en el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander y demás bibliografía existente (Akpan et al., 2020; Buyukkamaci & Alkan, 2013; Domínguez et al., 2017; Msaki et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2018) donde anteriormente se ha analizado la percepción social hacia el reúso del agua y los

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 29

factores que la afectan. **La Tabla 2** presenta la estructura del cuestionario. En el **Apéndice B** se adjunta el formulario de encuesta elaborado.

**Tabla 2.**

*Estructura del cuestionario e información abordada*

<b>Sección</b>	<b>Construcción de preguntas</b>
Información general	Información demográfica como sexo, edad, estado civil, nivel educativo y ocupación.
Hábitos de consumo de agua potable	Información de las diferentes actividades que se llevan a cabo en los espacios que son fuente de producción de AGC.
Percepción social	Información sobre el interés que tienen los hogares hacia la reutilización AGC.

**4.1.3 Determinación del tamaño de muestra**

Se realizó un muestreo piloto a 35 hogares del sector de estudio, con el objetivo de probar la confiabilidad de la información en el instrumento de la encuesta. A partir de la estimación del consumo per cápita de agua en el muestreo piloto, se determinó el tamaño de muestra en esta zona residencial. Para ello, se aplicó la **Ecuación 1**, propuesta por García-García et al. (2013) para determinar el tamaño de muestra de una media con un nivel de confianza del 95%. Para el presente estudio, se estableció un tamaño de muestra de 132 viviendas residenciales.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 30

### **Ecuación 1.**

*Cálculo del tamaño de muestra*

$$n = \frac{Z_{\alpha/2} * S^2}{\delta^2} * \left(1 - \frac{n'}{N}\right) = 132 \text{ encuestas}$$

Donde:

n = tamaño de muestra

Z = valor obtenido a partir del nivel de confianza. El nivel de confianza para determinar el tamaño de la muestra fue del 95%, por lo tanto, el valor Z corresponde a 1.96

S = desviación estándar de la prueba piloto (sobre la variable de consumo promedio mensual de agua potable en el hogar). El valor de S correspondió a 2.20.

$\delta$  = error estándar de la media (para la variable de consumo promedio mensual de agua potable en el hogar). El valor de  $\delta$  correspondió a 0.37.

n' = tamaño de la submuestra para la prueba piloto. En este estudio se aplicó la prueba piloto a 35 viviendas.

N = tamaño poblacional, la zona de estudio, cuenta con 1705 viviendas residenciales.

#### ***4.1.4 Aplicación de la encuesta***

La encuesta se realizó de manera presencial a los participantes, utilizando un muestreo no probabilístico por conveniencia (Etikan et al., 2016). Se seleccionaron como encuestados a los jefes de hogar (padre o madre) o, en su ausencia, a otro residente permanente del mismo hogar (adulto de 18 años o más). La recopilación de datos se llevó a cabo durante los días hábiles de la semana entre las 14:00 y las 20:00 horas. Previo a la aplicación de la encuesta, se presentó un formato de consentimiento informado mediante el cual los habitantes decidían su participación

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 31

libre y voluntaria en la actividad. Además, se respetaron los protocolos éticos de investigación establecidos por la Universidad Industrial de Santander.

Previo a la aplicación del cuestionario, se llevó a cabo una breve introducción para presentar definiciones básicas sobre AGC y los diferentes tratamientos que se pueden aplicar in situ para su posible reutilización en usos no potables (**Apéndice B**). Esto se realizó con la intención de brindar una comprensión general del tema a todos los encuestados, incluyendo aquellos que carecían de conocimientos previos sobre el tratamiento y reutilización in situ de AGC. Es importante destacar que, durante esta presentación, se manejaron conceptos de manera general y de fácil entendimiento, asegurando que los encuestados comprendieran el tema sin que esta comprensión produjera un sesgo en la respuesta del cuestionario.

#### ***4.1.5 Análisis de datos***

Los datos recopilados a partir de la encuesta se tabularon y analizaron utilizando Microsoft Excel® versión 2403 y R® (R Core Team, 2023). Se aplicó estadística descriptiva para las variables demográficas, los hábitos y datos de consumo de agua potable, y para las variables relacionadas con la percepción social de la reutilización del AGC. Además, se aplicó análisis de varianza de un factor (ANOVA) con el propósito de determinar si el número de personas que conforman un hogar ejerce un efecto significativo sobre el consumo per cápita de agua potable y una prueba post hoc (test de Dunn) con el fin de determinar diferencias significativas en el consumo per cápita en hogares con diferente número de integrantes. Previo a esto, se aplicaron las pruebas de Anderson-Darling (conjunto de datos tiene más de 50 observaciones) y de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal) para verificar que los datos de consumo de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 32

agua per cápita seguían una distribución normal y que sus varianzas eran homogéneas, respectivamente.

Con el propósito de identificar posibles diferencias significativas en el consumo per cápita de agua en los hogares en relación con la frecuencia de diversas actividades cotidianas, tales como el lavado de manos, el cepillado de dientes, el uso de duchas, la limpieza en duchas y lavamanos y la descarga de inodoros, se llevaron a cabo distintos análisis estadísticos, que incluyeron el uso de la prueba de Tukey para evaluar el lavado de manos, la prueba de Mann-Whitney U para el cepillado de dientes, la prueba t de Student para el uso de duchas, y el test de Kruskal-Wallis para la limpieza de duchas y lavamanos, así como la descarga de inodoros.

Se llevaron a cabo dos conjuntos de pruebas estadísticas para investigar la relación entre las variables demográficas y las percepciones hacia la reutilización de AGC. En primer lugar, se realizó una prueba de independencia de Chi cuadrado de Pearson con el propósito de determinar la relación entre la disposición de reutilizar las AGC y las variables sociodemográficas. Por otro lado, se aplicó la prueba exacta de Fisher para identificar la relación entre las variables sociodemográficas con: i) la percepción de riesgo en torno a la reutilización de AGC, ii) la inversión inicial que están dispuestos a realizar para implementar un sistema reúso de AGC, y iii) las frecuencias con las que están dispuestos a realizar actividades de operación y mantenimiento para un sistema de reúso de AGC. Por último, es pertinente destacar que en todas las pruebas estadísticas realizadas se empleó un nivel de significancia de 0.05.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 33

## **4.2 Fase 2: Determinación del consumo de agua potable y de la producción y calidad del AGC generada en una vivienda**

### ***4.2.1 Selección de la vivienda de estudio***

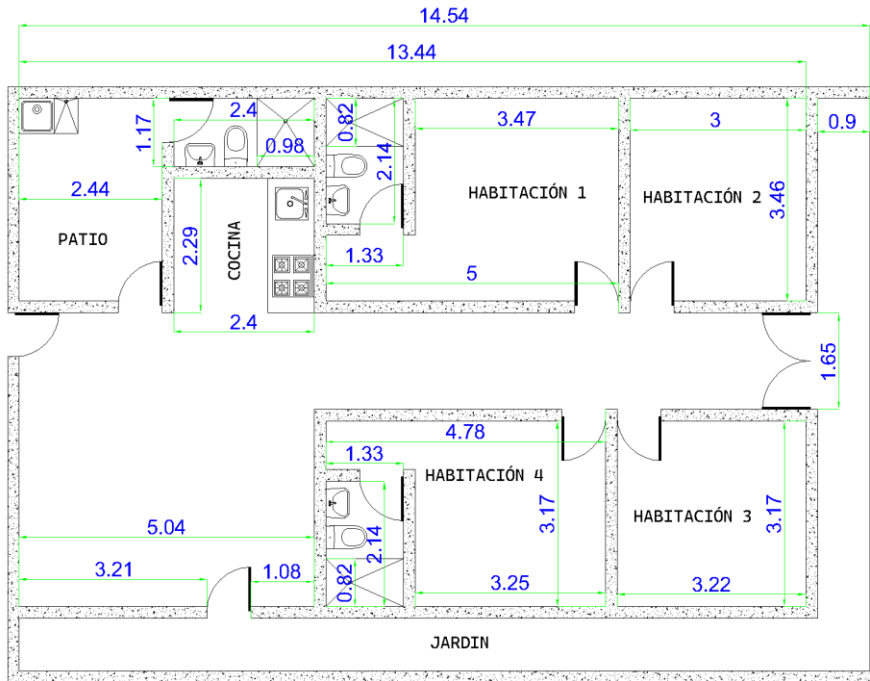
La selección de la vivienda de estudio se realizó considerando que fuese representativa de los resultados medios de las distintas variables caracterizadas en la encuesta (como el número de integrantes que conforman el hogar y las condiciones en cuanto a acceso de servicios públicos). Así mismo, se consideró que los integrantes de esta presentaran el compromiso y la predisposición para participar de las jornadas de caracterización y muestreo de las AGC durante el periodo del estudio. A su vez, se tuvo en cuenta la facilidad de acceso y la disponibilidad de espacio necesario para la instalación de los equipos requeridos y la realización de las actividades de aforos y muestreos. En la vivienda seleccionada se garantizó la viabilidad logística y operativa de la investigación, asegurando la recolección de datos relevantes y representativos en un entorno controlado y accesible.

Manteniendo las condiciones estipuladas en la zona de estudio, la vivienda cuenta con cobertura del 100% de los servicios de agua potable, alcantarillado, electricidad y manejo de residuos sólidos. En relación con las características de la vivienda y de sus integrantes, cabe aclarar que es una casa residencial conformada por cuatro personas con edades de 52, 32, 27 y 12 años. La vivienda tiene un área total construida de 133.5 m<sup>2</sup>, que incluye una sala, una cocina, cuatro habitaciones, tres baños y un patio (ver **Figura 2**).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 34

**Figura 2.**

*Plano de la vivienda seleccionada para realizar las campañas de aforos y muestreos de AGC*



#### **4.2.2 Medición diaria del consumo de agua potable**

En la vivienda se llevó registro del consumo de agua potable a nivel diario durante el período de estudio. Para tal efecto, al finalizar cada día se tomaba la lectura del valor de consumo de agua mostrado en el medidor de agua de la vivienda (Ver **Figura 1C** del **Apéndice C**). El volumen de agua consumido en el día se estimaba teniendo en cuenta el volumen registrado el día inmediatamente anterior (i.e., lectura del medidor al finalizar el día – lectura del medidor del día inmediatamente anterior al finalizar el día).

#### **4.2.3 Medición del volumen diario de producción de AGC (duchas y lavamanos)**

La cuantificación del volumen de AGC producidas se llevó a cabo de manera directa en cada una de las fuentes identificadas dentro de la vivienda de estudio (i.e., dos lavamanos y tres

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 35

duchas). Para ello, se instalaron medidores de flujo (Medidor Agua Clase B-R80 1/2 pulgada: tipo turbina para agua fría; presión 145 psi; certificado de calibración Norma NTC-ISO 4064:2016. (Ver **Figura 2C** del **Apéndice C**) en las duchas, los cuales registraban en tiempo real el volumen de agua consumido mientras se hacía uso de estas. Para obtener los registros, se instalaron medidores de flujo y se solicitó a los residentes de la vivienda que tomaran nota tanto de la lectura inicial como de la lectura final de los medidores de flujo en cada ocasión que hicieran uso de las duchas. A partir de esta información se procedió al cálculo del volumen de AGC producidas en cada uso, correspondiente a la diferencia entre las lecturas final e inicial registradas.

Adicionalmente, para medir el volumen de producción de AGC en los lavamanos, se dispusieron recipientes volumétricos plásticos (probetas) de un litro de capacidad debajo del desagüe de cada lavamanos. Los residentes de la vivienda asumieron la responsabilidad de registrar el volumen de agua recolectado en dichos recipientes inmediatamente después de hacer uso del lavamanos. Estos registros se llevaron a cabo siguiendo un formato proporcionado al inicio de la jornada (ver **Apéndice B**).

En las **Figuras 3C, 4C y 5C** del **Apéndice C**, se visualiza la disposición de los medidores de flujo y recipientes volumétricos instalados en cada fuente de producción de AGC. El uso de estos dispositivos y la meticulosidad y precisión en la recolección de datos en cada fuente de producción de AGC en la vivienda de estudio, permitieron obtener información fiable y detallada sobre la producción de AGC en la vivienda de estudio. Es preciso aclarar que, el registro del consumo de agua potable se llevó a cabo entre el 01 de septiembre de 2022 hasta el 09 de diciembre de 2022; mientras que el registro en la producción de AGC se tomó entre el 08 de agosto de 2022

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 36

hasta el 09 de diciembre de 2022; obteniendo de esta manera datos de 98 y 124 días de monitoreo de consumo de agua y producción de AGC, respectivamente.

El hecho de que se haya realizado el monitoreo de la producción de AGC un mes antes que el monitoreo de consumo de agua potable, se debe a que inicialmente se quisieron hacer unas estimaciones preliminares para analizar el comportamiento de la producción a lo largo del día, aquí se determinó que el 94% de la producción de AGC se generaba entre las 5:00 h a las 14:00 h. Adicionalmente, el primer mes de monitoreo de AGC, fue un mes en el que se analizó junto con los habitantes de la vivienda, que las actividades de logística implementadas para llevar este monitoreo eran las más acertadas. Después de este mes se determinó que las actividades se estaban llevando acorde a lo planteado y que los datos de producción del AGC se estaban tomando de manera correcta y constante. Después de este mes, se determinó que los habitantes de la vivienda ya estaban familiarizados y habían incorporado como un hábito la realización de todas las actividades correspondientes a los aforos de AGC, por lo cual se decidió incluir el monitoreo del consumo de agua potable. Esto con el fin de no abrumarlos.

#### ***4.2.4 Recolección de muestras de AGC***

Se recolectaron 27 muestras de AGC producidas en la vivienda durante septiembre de 2022 y junio de 2023. El muestreo se realizó en tres campañas de muestreo: i) en la primera campaña se recolectaron 8 muestras entre septiembre y octubre de 2022; ii) en la segunda campaña se recolectaron 8 muestras y se llevó a cabo entre noviembre y diciembre de 2022 y; iii) la tercera campaña se realizó entre mayo y junio de 2023, donde se recolectaron 11 muestras. Esto se realizó con el fin de conocer si existe variabilidad alguna en cada uno de los parámetros de calidad medidos en las AGC producidas para una misma vivienda en diferentes períodos del año (i.e.,

condiciones climáticas y periodos de vacaciones). Lamentablemente, en el mes de diciembre de 2023, las actividades correspondientes a los aforos se tuvieron que suspender, esto debido a que los habitantes ya no tenían la disposición de seguir participando, teniendo en cuenta de que estuvieron haciendo estas actividades alrededor de 124 días. Se llegó a un acuerdo con ellos para la última campaña de muestreos del AGC y la fase experimental de recolección del AGC, accedieron a recolectar las AGC generadas pero ya no seguirían realizando el registro tanto de producción de AGC como de consumo de agua potable.

Con base en mediciones llevadas a cabo en la vivienda de estudio, relacionadas con el consumo de agua y producción de AGC en la vivienda, se concluyó que el 94% de la producción diaria de AGC (i.e., duchas y lavamanos) ocurre entre las 5:00 h a las 14:00 h. Adicionalmente, Penn et al. (2012) en su estudio confirman que durante la mañana (período de 5 am a 11 am) es donde se evidencia el mayor volumen de producción de AGC. Por lo tanto, todas las AGC generadas en el hogar se recolectaron durante la franja horaria de las 5:00 h a las 14:00 h.

Las muestras se recolectaron de las tres duchas y los dos lavamanos identificados en la vivienda de estudio. Debido a la imposibilidad de acceder a las tuberías de salida de la ducha, se le pidió a cada miembro de la familia que recolectara el agua gris generada mientras se duchaba utilizando una tina de plástico de 60 litros (ver **Figura 4C del Apéndice C**). El agua gris de los lavamanos se recolectó directamente del tubo de salida con una probeta graduada de plástico de 1 litro (ver **Figura 5C del Apéndice C**). Las AGC recolectadas en cada una de las fuentes, se vaciaron en un contenedor de plástico de 208 L, generando así una mezcla compuesta de todas las fuentes de producción de AGC (Ver **Figura 6C del Apéndice C**). Los recipientes eran lavados minuciosamente antes de su uso cada día. Las muestras para análisis se recogieron diariamente del

contenedor plástico una vez finalizado el horario de recolección y después de haber mezclado muy bien el contenido del barril. El protocolo de muestreo se adaptó de acuerdo con los implementados por Shaikh & Ahammed (2022) y Teh et al. (2015).

#### ***4.2.5 Métodos analíticos para determinar la calidad del AGC recolectada***

Las muestras de AGC recolectadas del contenedor plástico, fueron transportadas al laboratorio para el análisis inmediato de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Con base en la revisión de la literatura, se identificaron y utilizaron en este estudio los principales parámetros fisicoquímicos más utilizados para caracterizar las AG en términos de calidad (Ver **Figura 4A** del **Apéndice A**), es decir, pH, conductividad eléctrica (CE), turbiedad, grasas y aceites, fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), sólidos suspendidos totales (SST), demanda química total de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

El pH y la conductividad eléctrica se midieron utilizando un equipo portátil multiparámetro Mettler Toledo (SevonGo Duo pH/Ion/Con meter SG78), la turbiedad se midió usando un turbidímetro (HACH 2100Q). El NT se midió según el método de digestión con persulfato propuesto por Hach®, mientras que parámetros de calidad correspondientes a grasa y aceites, PT, SST, DQO, DBO<sub>5</sub> y cloruros, se analizaron según los métodos estándar para análisis de agua y aguas residuales (APHA-AWWA-WEF, 2017), como se describe en la **Tabla 3**.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 39

**Tabla 3.**

*Métodos empleados para el análisis de los parámetros de calidad medidos en el AGC*

<b>Parámetro</b>	<b>Método de análisis</b>
Fósforo Total (mgP/L)	SM 4500-P B, E
Grasas y aceites (mg/L)	SM 5520 D
SST (mg/L)	SM 2540 D
CF (UFC/100 mL)	SM 9222 D
CT (UCF/100 mL)	SM 9222 J
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	SM 5220 D
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	SM 5210 B, SM 4500 OH
Cloruros (mgCl <sup>-</sup> /L)	SM 4500-Cl <sup>-</sup> B

#### **4.2.6 Análisis de datos**

##### **4.2.6.1 Consumo de agua potable**

Los datos correspondientes al consumo de agua potable en la vivienda de estudio se tabularon y analizaron utilizando Microsoft Excel® versión 2403 y R (R Core Team, 2023). Para todos los análisis estadísticos se consideró un nivel de significancia del 0.05. Se aplicó estadística descriptiva con el objetivo de hallar los promedios totales y diarios, desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimos y valores máximos respecto al consumo de agua potable.

Se utilizaron la prueba de Anderson-Darling (el conjunto de datos tiene más de 50 observaciones) y la prueba de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal) para examinar la distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas,

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 40

respectivamente (ver **Apéndice E**). Con el fin de determinar si el día de la semana ejerce un efecto significativo sobre el consumo de agua potable, y dado que los datos incumplieron los supuestos de la ANOVA, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba no paramétrica también se utilizó para identificar si existe un efecto significativo de la frecuencia de descarga de inodoros sobre el consumo de agua potable en la vivienda. Además, se utilizó la prueba post hoc de Dunn para identificar diferencias significativas entre los niveles de estos factores (i.e., diferentes días de la semana y frecuencias de descarga del inodoro) con respecto al consumo de agua potable.

Finalmente, y con el objetivo de evaluar si el consumo de agua potable se ve influenciado por el uso de la lavadora, se aplicó la prueba Mann-Whitney U para identificar diferencias significativas en el consumo de agua, cuando se hace o no uso de la lavadora.

#### **4.2.6.2 Producción de AGC**

Los datos correspondientes a los volúmenes de producción de AGC en la vivienda de estudio fueron tabulados y analizados utilizando Microsoft Excel® versión 2403 y R (R Core Team, 2023). Para todos los análisis estadísticos se consideró un nivel de significancia del 0.05. Se aplicó estadística descriptiva con el objetivo de hallar los promedios totales y diarios, desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimos, valores máximos y porcentaje de producción de AGC respecto al consumo de agua potable y porcentaje de aporte de duchas y lavamanos en la producción total de AGC.

Se utilizaron la prueba de Anderson-Darling (el conjunto de datos tiene más de 50 observaciones) y la prueba de Bartlett (el conjunto de datos cumple con distribución normal) para examinar la distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas, respectivamente

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 41

(ver **Apéndice E**). Se empleó la prueba de ANOVA, para determinar si los días de la semana ejercen un efecto significativo sobre a la producción de AGC.

#### **4.2.6.3 Caracterización de las AGC**

Los datos correspondientes a los valores de cada parámetro de calidad de las AGC se tabularon y analizaron utilizando Microsoft Excel® versión 2403 y R (R Core Team, 2023). Para todos los análisis estadísticos se consideró un nivel de significancia del 0.05. Se aplicaron estadísticas descriptivas con el objetivo de hallar promedios, desviaciones estándar, coeficientes de variación, valores mínimos y valores máximos de cada parámetro de calidad analizado en este estudio.

Con el objetivo de conocer si existe o no variabilidad en los diferentes parámetros de calidad medidos para las AGC bajo diferentes períodos de tiempo, se aplicaron las pruebas estadísticas presentadas en la **Tabla 4**. Además, se realizó el análisis de correlación de Spearman con el fin de explorar la relación lineal que existe entre los contaminantes de las AGC producidas en la vivienda. Se aplicó esta prueba no paramétrica debido a que el conjunto de datos correspondientes al pH, PT, grasas y aceites no presentaban distribución normal. El coeficiente de Spearman varía de -1 a +1, donde un valor negativo indica una correlación negativa (una variable tiende a aumentar mientras la otra tiende a disminuir, siendo -1 una correlación negativa perfecta); un valor positivo indica una correlación positiva (ambas variables tienden a aumentar o disminuir juntas, siendo +1 una correlación positiva perfecta); finalmente el 0 o número cercanos a este valor indican que no existe ninguna correlación o existe una correlación débil, respectivamente (Schober et al., 2018; Xiao et al., 2016).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 42

**Tabla 4.**

*Pruebas estadísticas aplicadas para conocer la variabilidad en la calidad de las AGC*

Parámetro	Prueba de normalidad	Prueba de homogeneidad de varianzas	Prueba estadística aplicada
pH	Shapiro-Wilk	Prueba de Levene	Kruskal-Wallis
CE		Prueba de Bartlett	ANOVA de una vía y prueba <i>post hoc</i> de Tukey
Turbiedad		Prueba de Levene	Kruskal-Wallis y prueba <i>post hoc</i> de Dunn
NT		Prueba de Bartlett	ANOVA de una vía
PT		Prueba de Levene	Kruskal-Wallis
Grasas y aceites		Prueba de Levene	Kruskal-Wallis
SST		Prueba de Bartlett	ANOVA de una vía
DQO		Prueba de Bartlett	ANOVA de una vía y prueba <i>post hoc</i> de Tukey
DBO <sub>5</sub>		Prueba de Bartlett	ANOVA de una vía y prueba <i>post hoc</i> de Tukey

### 4.3 Fase 3: Evaluación del desempeño de dos tecnologías para el tratamiento de las AGC

Se partió de la propuesta de trenes tecnológicos realizados en estudios previos del grupo GPH (Álvarez & Bonilla, 2020), donde se propuso el FLA y la MUF para el tratamiento de las AGC con fines de reúso.

#### 4.3.1 Configuración experimental de los prototipos a escala de laboratorio

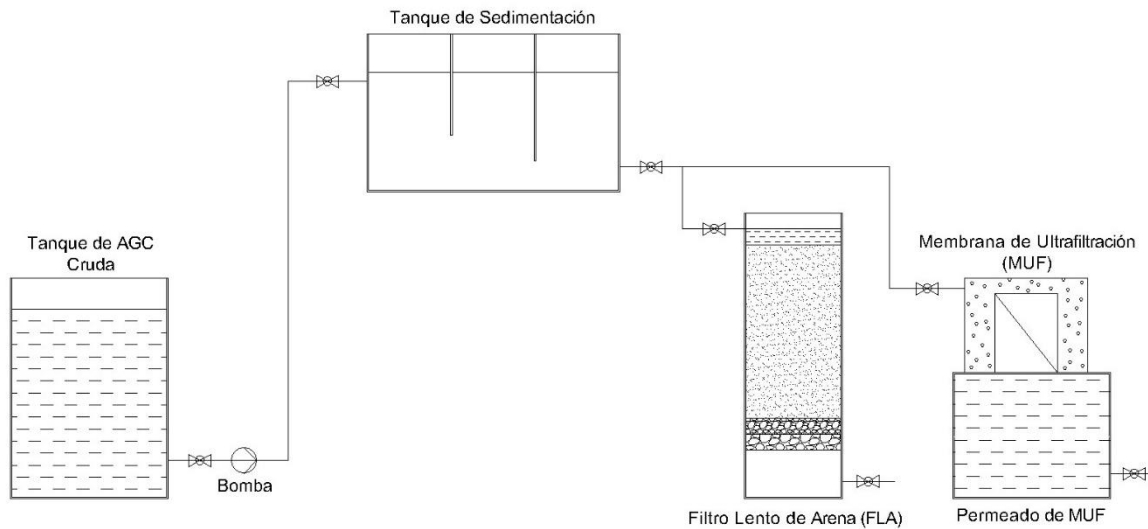
En la **Figura 3** se observa el montaje experimental de los prototipos a escala de laboratorio. El sistema experimental se instaló en el laboratorio del grupo de investigación GPH y estaba compuesto por un tanque de almacenamiento del AGC cruda, un sedimentador, un sistema de filtración lenta en arena y un sistema de ultrafiltración por membrana.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 43

Es importante tener en cuenta que el tanque sedimentador utilizado en este proyecto de investigación, ya se encontraba construido en el laboratorio, su diseño y especificaciones hidráulicas se encuentran en el trabajo de Álvarez & Bonilla (2020). Ellos definieron un tiempo de retención hidráulica (TRH) igual a 2.5 horas y una velocidad de suspensión máxima 0.0929 m/s. Estaba construido en vidrio de 2 mm de espesor, con dimensiones 61 x 42 x 16 cm (Largo x alto x ancho). Adicionalmente, Álvarez & Bonilla (2020), como parte del diseño, incluyeron en el tanque sedimentador dos baffles (el primero ubicado a la entrada y el segundo ubicado a la salida del sistema), esto lo realizaron con el fin de que flotantes como grasas y aceites fueran acumulados en la superficie de la zona de sedimentación y evitar que estos escapen con el efluente tratado. La dimensión de estos baffles era de 38.5 x 15.6 cm (alto x ancho). Finalmente, se aclara que para el presente proyecto de investigación, cada unidad de tratamiento (tanque sedimentador, FLA y MUF) se operó en flujo discontinuo (tipo Batch). Con respecto a la pendiente del sedimentador, como su operación fue tipo Batch y todos los días finalizada la experimentación, este se vaciaba y se lavaba por completo. No era necesario contar con una tolva de lodos o una pendiente para ello.

**Figura 3.**

*Esquema de la planta piloto para tratamiento del AGC a escala de laboratorio*



*Fuente: propia*

El sedimentador se alimenta mediante una manguera conectada a una bomba de agua sumergible de 110 V, la cual impulsaba el AGC desde el tanque de almacenamiento hasta el sedimentador con un caudal de  $0.182 \text{ m}^3/\text{h}$ . En la **Figura 7C** del **Anexo C** se observa el detalle del sedimentador y cómo este era alimentado con el AGC. Para dirigir el AGC hacia el FLA y la MUF, desde la salida del sedimentador, se instaló una válvula de PVC de 1/2" junto con una unión para llave doble salida de 1/2" y 3/4". Esta configuración permitió la distribución manual del AGC de manera intermitente. Una vez cumplido el TRH del sedimentador (2.5 h), se realizaba la apertura de la válvula para que el AGC se distribuyera por gravedad hacia el FLA y la MUF. La unión para llave doble salida 1/2" y 3/4" posibilitó la conexión en paralelo de ambos sistemas de filtración al tanque sedimentador.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 45

Finalmente, En el **Apéndice D** se proporcionan detalladamente las especificaciones operativas de la bomba sumergible de agua utilizada, el FLA y la MUF.

#### **4.3.2 Instalación del FLA**

Para el montaje del FLA, se utilizó arena de río y grava. La arena se tuvo que extender en capas muy finas y mover periódicamente hasta que se secase a temperatura ambiente por completo. Seguidamente, se realizó un análisis de tamiz en ambos materiales según la Norma ASTM C136 (Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos) (ASTM, 2006), con el fin de obtener la separación del material destinado para formar las tres capas del filtro, arena de filtración ( $\leq 0.7$  mm), grava de separación (0.7 – 6 mm) y grava de drenaje (6 – 12 mm). Estos tamaños de arena y grava se consideraron apropiados para el funcionamiento del FLA teniendo en cuenta: i) las guías establecidas por el Centro de tecnología asequible de agua y saneamiento (CAWST, por sus siglas en inglés) para la construcción de FLA; ii) las consideraciones realizadas en la Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (Minvivienda, 2017); y iii) las disposiciones presentadas para la filtración lenta en arena del grupo del Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara) en la Universidad del Valle (Galvis-Castaño, G., & Latorre-Montero, J., 1999).

Una vez finalizado el proceso de tamizaje, se procedió a realizar el lavado de la arena y grava de filtración. Para este proceso, se procedió a ubicar el material tamizado en un balde, el cual se llenó de agua potable aproximadamente hasta la mitad de su capacidad; seguidamente se revolvía el material con ayuda de la mano, para finalmente verter el agua, teniendo el cuidado de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 46

retener el material con la mano. Este proceso se repitió cuatro veces para cada material (arena y grava).

El tanque del filtro se fabricó en lámina de acrílico cristal calibre 6. El falso fondo del tanque del filtro se fabricó en lámina perforada de acero inoxidable. Inicialmente, se procedió a ubicar el falso fondo en la parte inferior del tanque del filtro. Seguidamente, se dispuso la grava de drenaje dentro del filtro hasta obtener una altura de 5 cm, esta se aplanó con ayuda de un pisón. Del mismo modo, se dispuso la grava de separación hasta conseguir una altura de 5 cm de este material. Por último, se dispuso la arena de filtración por capas, lo que permitió apisonarla progresivamente para que quedara lo suficientemente compacta. La altura alcanzada en la capa de arena de filtración fue de 55 cm. Una vez instalado el filtro, se procedió a llenarlo con agua potable y dejarla fluir hasta que finalmente el agua saliera visualmente clara.

Se realizaron pruebas de filtración, con el fin de determinar las condiciones de funcionamiento del FLA, las cuales se pueden observar en la **Tabla 5**. En la **Figura 4** se muestra el filtro instalado. El FLA operó a una tasa de filtración de  $4.06 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , valor que se encuentra por debajo de la tasa de filtración máxima para filtración lenta ( $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ ) para el tratamiento de AR (Zipf et al., 2016).

Terminadas las pruebas preliminares de operación, el FLA se llenó completamente con agua potable hasta alcanzar una columna de agua de 5 cm por encima de la capa superior (arena de filtración) y se dejó en esta condición de reposo durante 28 días. Esto se realizó con el objetivo de garantizar un tiempo de maduración adecuado para el desarrollo de la biocapa en el medio filtrante (también conocida como capa Schmutzdecke) (Aslan & Cakici, 2007; Verma et al., 2017). De esta manera se aseguró el funcionamiento estable del FLA para obtener un efluente de buena

calidad en términos de remoción de materia orgánica y nutrientes. Teniendo en cuenta que durante toda la operación del FLA, se mantuvo la carga de agua a 5 cm del lecho filtrante, se asume que todo lo que entra es igual a todo lo que sale, por consiguiente, el caudal de salida del FLA es igual al caudal de alimentación.

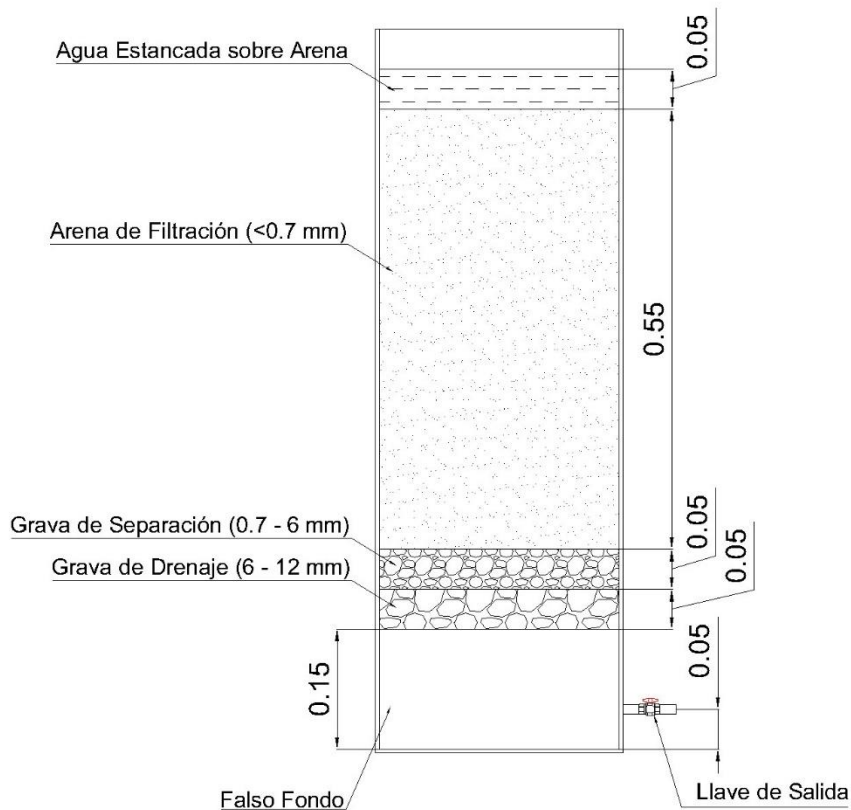
**Tabla 5.**

*Condiciones de funcionamiento del FLA*

Altura del medio filtrante (m); altura de la arena de filtración	0.55
Altura total del FLA (m); arena de filtración + grava de separación + grava de drenaje	0.65
Sección transversal del FLA (m <sup>2</sup> )	0.08
Volumen del FLA (m <sup>3</sup> ); Altura del medio filtrante * Sección transversal	0.05
Área superficial (m <sup>2</sup> ); Volumen del FLA / Altura total del FLA	0.07
Caudal (m <sup>3</sup> /h); Volumen de agua filtrada / Tiempo de observación	0.29
Tasa de filtración (m/h); Caudal / Área superficial	0.17

**Figura 4.**

*Esquema del FLA una vez construido*



**4.3.3 Instalación y activación de la membrana de UF**

Como tratamiento paralelo al FLA, se utilizó un módulo de membrana donada por la empresa Martin Membrane Systems de tipo CUBE Mini FM (ver **Figura 5**). Esta es una membrana sumergible de ultrafiltración, accionada básicamente por gravedad. En la **Tabla 6** se muestran las especificaciones de la membrana utilizada. Para su instalación fue imprescindible ubicar dos baldes rectangulares, uno encima del otro. Las dimensiones de los baldes eran 0.23 m de alto, 0.41 m de ancho y 0.29 m de fondo. En el balde superior se ubicó la membrana, con el fin de que el

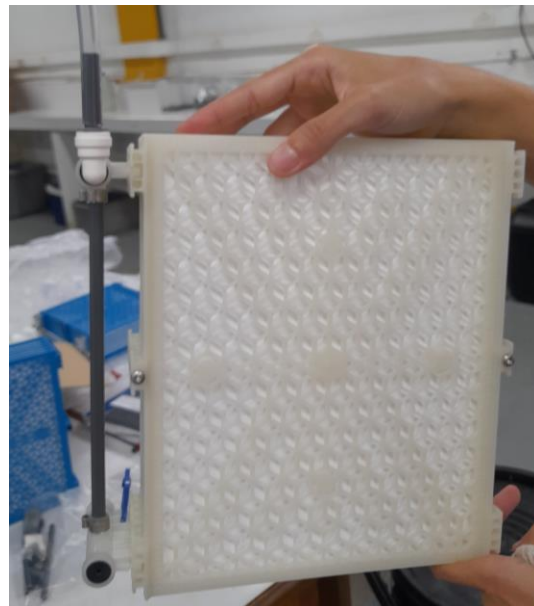
Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 49

AGC proveniente del sedimentador se depositara en el balde superior, y el agua filtrada fluyera hacia abajo siendo recogida y almacenada en el balde inferior.

Para poner en funcionamiento la MUF se realizó su activación que consistió en sumergirla en una solución de hipoclorito de sodio de 500 ppm, a temperatura ambiente (aproximadamente de 20°C) durante 3 horas, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Finalizado el tiempo de activación de la membrana, se procedió a lavarla muy bien con agua potable, con el objetivo de eliminar cualquier residuo de la solución. El proceso de activación se realizó para asegurar un flujo completo a través de la membrana y eliminar posibles microorganismos patógenos que pudieran estar contenidos en ella.

**Figura 5.**

*Módulo de la membrana de UF*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 50

**Tabla 6.**

*Especificaciones técnicas del módulo de membrana CUBE mini FM*

Material	Polietersulfona (PES)
Largo	250 mm
Ancho	75 mm
Alto	260 mm
Tamaño de poro nominal	35 nm
Tamaño de poro máximo	0.1 $\mu\text{m}$
Área de la membrana	0.45 m <sup>2</sup>
Espacios entre membranas	6 mm

*Fuente: Martin Membrane Systems7*

#### **4.3.4 Puesta en marcha y ejecuciones experimentales**

El FLA operó en modo de flujo descendente y funcionó como filtro saturado asegurando una profundidad de agua de 5 cm sobre el medio filtrante. Como se mencionó anteriormente, el montaje experimental en el laboratorio operó tipo Batch. Durante cada jornada de ejecución experimental, se recolectaban 50 L de AGC en la vivienda de estudio, entre las 4:00 y las 10:00 horas, utilizando un tanque plástico de 60 L de capacidad, el cual se transportaba en un automóvil hasta el laboratorio del grupo de investigación GPH. Una vez allí, el AGC depositada en el tanque era bombeada al tanque sedimentador, el cual contaba con un tiempo de retención hidráulica de 2.5 horas. Terminado el tiempo de retención hidráulica en el tanque sedimentador, se repartían de forma manual, aproximadamente 18 L de AGC al tanque de la membrana de UF y 18 L al FLA. Finalizado el tiempo de filtración tanto en la MUF (duración de filtrado de aproximadamente 1.2

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 51

horas) como en el FLA (duración de filtrado de aproximadamente 1.5 horas), se recogían un mínimo de 5 litros de muestra, con el fin de realizar el análisis del efluente tratado en cada tratamiento (MUF y FLA). Estas actividades se llevaron a cabo diariamente, durante nueve días.

En la MUF, la presión hidrostática se mantuvo estable durante toda la etapa de experimentación (i.e., altura de agua de 5 cm por encima de la MUF), aproximadamente 4.9 mbar. Se mantuvo un flujo de permeado de 13.33 L/m<sup>2</sup>\*h. Asimismo, se realizaba diariamente una limpieza de la membrana una vez terminada la operación de filtración con la MUF. Esta limpieza consistía en lavar las placas de la membrana con agua potable con ayuda de una manguera, de esta manera eran eliminadas posibles partículas adheridas a la superficie de la membrana que podrían generar una reducción en la eficiencia de filtración y disminuir el flujo de permeado (F. Li, Gulyas, et al., 2009). Finalmente, la membrana era dispuesta en un balde sumergida con agua potable hasta el siguiente día de operación.

#### ***4.3.5 Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las AGC crudas y tratadas***

Se realizaron 9 jornadas de operación de los prototipos para evaluación de su desempeño en el tratamiento del AGC durante los meses de mayo a junio de 2023. Durante cada día de operación del prototipo, se recolectaron y analizaron muestras de AGC tratadas y crudas para determinar pH, CE, turbiedad, NT, PT, grasas y aceites, SST, DQO y DBO<sub>5</sub>. Para los análisis de estos parámetros de calidad, se emplearon los métodos descritos en la fase 2 para el análisis de la calidad del AGC (ver sección 4.2.5).

#### ***4.3.6 Análisis de datos***

Los datos correspondientes a los parámetros de calidad analizados en el AGC cruda y tratada, fueron tabulados y analizados utilizando Microsoft Excel® versión 2403 y R (R Core

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 52

Team, 2023). Para todos los análisis estadísticos se consideró un nivel de significancia del 0.05. Se aplicó estadística descriptiva con el objetivo de hallar el promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimos y valores máximos de cada parámetro de calidad medido en el AGC cruda, AGC tratada por medio de la membrana de UF y AGC tratada por medio del FLA, para posteriormente determinar el porcentaje de remoción en cada uno de los tratamientos.

Finalmente, y con el objetivo de comparar el desempeño de los dos tratamientos se aplicó la prueba t-pareada para los parámetros de turbiedad, PT, DQO y DBO<sub>5</sub> (el conjunto de datos de cada parámetro presentó distribución normal) y la prueba Wilcoxon para los parámetros de NT, grasas y aceites y SST (el conjunto de datos de cada parámetro no presentó distribución normal). Vale la pena mencionar que antes de aplicar estas pruebas, se evaluó la normalidad en los datos de cada parámetro de calidad, mediante la prueba Shapiro-Wilk (conjunto de datos menores a 50 observaciones), los resultados de las pruebas de normalidad se pueden visualizar en la **Tabla 23E** del **Apéndice E**.

## 5. Resultados y Discusión

En esta sección, se presentan los resultados y su discusión relacionados con diferentes aspectos relevantes en el ámbito de las AGC. Los resultados detallados de las pruebas estadísticas aplicadas se muestran en el **Apéndice E**.

En consonancia con el primer objetivo específico del presente estudio, se describen las características demográficas de los encuestados, brindando un panorama de la población estudiada y su representatividad en el contexto del barrio La Victoria. Este análisis ayuda en la comprensión de la diversidad de perfiles de hogares que influyen en los patrones de consumo de agua. Seguidamente, se analizan los hábitos de usos del agua en la zona residencial mediante la

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 53

exploración de los datos recopilados a través de las encuestas. Este análisis proporciona una visión detallada de los comportamientos y prácticas relacionadas con el consumo y uso del agua potable en los hogares objeto de estudio.

Prosiguiendo con el segundo objetivo específico, se presentan los resultados correspondientes al consumo de agua potable, producción y calidad de las AGC generadas en la vivienda seleccionada para el presente estudio. Este análisis brinda una comprensión sobre la composición de las AGC, aspecto esencial para evaluar su viabilidad en procesos de tratamiento; los requerimientos de agua potable para ciertas actividades dentro del hogar y volúmenes de producción de AGC, siendo estos datos necesarios para tomar decisiones sobre posibles escenarios de reutilización in situ de las AGC.

Finalmente, en cumplimiento del tercer objetivo específico, se discuten los hallazgos derivados de la evaluación del desempeño de los prototipos tecnológicos a escala de laboratorio. Este análisis crítico permite identificar las eficiencias y limitaciones de las tecnologías implementadas, proporcionando información valiosa para el diseño de sistemas de tratamiento descentralizado de AGC en el contexto de estudio.

En conjunto, la presentación y discusión de estos resultados contribuyen a una comprensión integral de la dinámica de las AGC en el sector residencial del barrio La Victoria, suministrando elementos que son protagonistas para la formulación de estrategias de gestión sostenible y eficiente del recurso hídrico en el ámbito domiciliario.

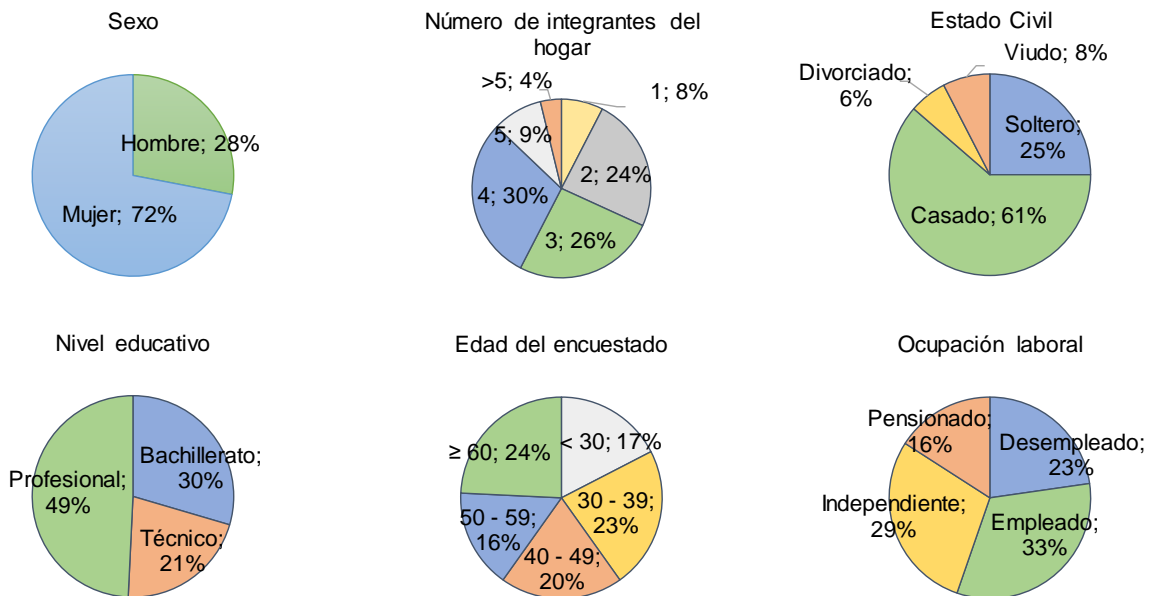
## 5.1 Caracterización de hábitos de consumo de agua potable y percepciones sobre la reutilización de las AGC

### 5.1.1 Características demográficas de los encuestados

La **Figura 6** presenta las características sociodemográficas de los individuos encuestados. No obstante, es pertinente aclarar que la cifra referente al tamaño del hogar se fundamenta en la información proporcionada por el entrevistado de manera presencial, si bien corresponde a datos del hogar y no a detalles específicos del encuestado. En general, los hogares están conformados predominantemente por tres a cuatro integrantes. El nivel de escolarización de los encuestados es relativamente alto, ya que el 70% de los encuestados cuenta con una educación técnica o profesional. El 72% de las personas encuestadas son mujeres. La mayoría (61%) están casados y el 60% de los encuestados tiene más de 40 años.

**Figura 6.**

*Información demográfica de los individuos encuestados*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 55

### ***5.1.2 Factores que afectan el consumo de agua potable***

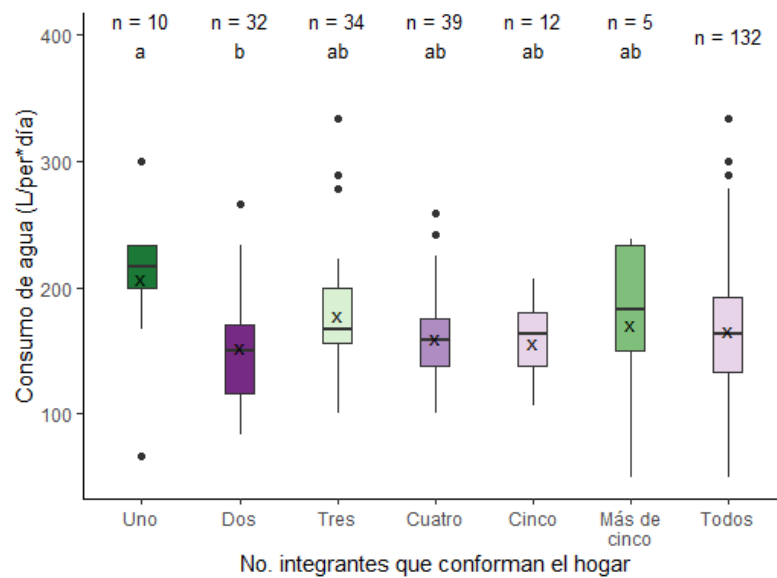
La **Figura 7** presenta el consumo per cápita de agua potable en los hogares encuestados, segregado según el número de integrantes que conformaban cada vivienda. Más de la mitad de los hogares encuestados (55%), están conformados por entre tres y cuatro integrantes, mientras que solamente el 4% de los hogares por más de cinco integrantes. El consumo per cápita promedio de agua en la zona residencial de estudio se estimó en  $166.25 \pm 47.17$  L/per\*día, valor superior al estipulado en la Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (Minvivienda, 2017), donde se estima que para zonas que presenten una altitud media menor a los 1000 msnm, la dotación neta máxima es igual a 140 L/per\*día.

Mediante la aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas (valor  $p = 0.03509$ ) entre el consumo per cápita de agua potable y el tamaño de los hogares definido por el número de integrantes que lo conforman (valor  $p < 0.05$ ). Posteriormente, el análisis de la prueba post hoc de Dunn evidenció que estas diferencias se presentan entre los hogares compuestos por uno y dos integrantes, destacando un consumo superior en aquellos habitados por un solo individuo (**Figura 7**). Arbués et al. (2010), en el contexto de países desarrollados (Zaragoza, España), determinaron que el consumo per cápita de agua no guarda una dependencia directa con el número de residentes que conforman un hogar, sugiriendo que se produce una economía de escala en el uso del agua, la cual está relacionada con actividades cotidianas en el hogar, en particular con las tareas de limpieza. No obstante, es importante considerar la influencia de variables adicionales en estos análisis, tales como los hábitos individuales de consumo de agua (ej., cargas completas de ropa en la lavadora y duchas

más cortas) que pueden estar motivados por la conciencia de los residentes acerca de la importancia de reducir el consumo (Jorgensen et al., 2009).

**Figura 7.**

*Consumo promedio per cápita de agua potable según el número de habitantes en los hogares*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos, n es igual al número de hogares que fueron encuestados. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según la prueba Kruskal-Wallis. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Las AGC representan el 50% y 48% del total de ARD en países de altos y bajos ingresos, respectivamente (I. N. Shaikh & Ahammed, 2020). Se destaca que la descarga de inodoros y el riego de jardines emergen como las principales aplicaciones de reúso de AGC, principalmente debido a que estas actividades no requieren un suministro de agua con calidad potable (Noutsopoulos et al., 2018). Además, se estima que la descarga el inodoro representa entre el 29%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 57

- 47% del total de agua consumida a nivel doméstico (I. N. Shaikh & Ahammed, 2022). Con base en esta información y considerando los consumos per cápita de agua reportados en la **Figura 7**, donde se revela que el consumo promedio en la zona de estudio es de 166.25 L/per\*día, la implementación de un sistema de tratamiento y reúso de AGC para la descarga de inodoros podría traducirse en una reducción sustancial del consumo de agua potable. Sin embargo, para cuantificar con precisión la magnitud de esta reducción, se requiere un análisis detallado que tenga en cuenta factores como la eficiencia del sistema de tratamiento, el comportamiento de los usuarios y la profundización en las estimaciones reales de la producción de AGC que faciliten dimensionamientos técnicos de los sistemas de reúso.

Respecto de la relación entre frecuencia de uso de duchas y lavamanos (fuentes de AGC) e inodoros (potencial receptor de AGC tratadas) con el consumo per cápita de agua potable (ver **Tabla 7**), se encontraron las siguientes consideraciones: en la medida que se incrementa la frecuencia de lavado de manos en el hogar, se aumenta el consumo per cápita de agua (de 150.1 a 203.2 L/per\*día para menos de 5 y hasta 20 veces). El incremento en la frecuencia de lavado de manos puede estar asociado con prácticas adoptadas posterior a la emergencia sanitaria por COVID-19 que estimularon la higiene de lavado de manos (Olupot et al., 2021). Una situación similar sucede cuando se analiza la frecuencia de cepillado de dientes, incrementándose en un 19% el consumo per cápita de agua cuando el cepillado realizado por cada habitante supera las tres veces al día (frecuencia aplicada por el 25% de los encuestados).

Esta tendencia se mantiene en aquellos hogares cuyos miembros tienen el hábito de ducharse dos veces por día (57% de los hogares), en cuyo caso, se observa un incremento del 13% en el consumo per cápita de agua en comparación con aquellos hogares donde sus miembros toman

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 58

una ducha diaria. Además, en relación con la frecuencia de actividades de limpieza de duchas y lavamanos, se aprecia que, a medida que disminuye la frecuencia de limpieza, el consumo per cápita de agua también disminuye (desde 179 L/per\*día a 141 L/per\*día para limpieza diaria a una vez por mes, respectivamente). Sin embargo, para este caso de estudio, la frecuencia de limpieza de duchas y lavamanos no ejerció un efecto significativo en el consumo per cápita.

Finalmente, se observa que, a medida que incrementa la frecuencia de descarga de inodoros en el hogar, se presenta un aumento en el consumo per cápita de agua de hasta 49% (i.e., para menos de 5 y hasta 10 más descargas se presentan diferencias estadísticamente significativas). Lazarova et al. (2003) señalan que, en Europa, la proporción de agua utilizada para la descarga de inodoros oscila entre 29% y 47% del consumo total de agua a nivel doméstico. La reutilización de AGC para la descarga de inodoros podría generar un ahorro de agua potable doméstica de 10% a 30% en los hogares italianos (Campisano & Modica, 2010), sugiriendo de esta manera, que éste es uno de los usos con mayor potencial por el alto volumen de agua que demanda y los menores requerimientos de calidad del agua respecto a otros usos domésticos.

**Tabla 7.**

*Actividades que influyen en el consumo de agua y la producción de AGC*

Actividad	Frecuencia	n	Consumo promedio (L/per*día)	Mediana	DE
Lavado de manos en el hogar	Menor o igual a 5 veces	46	150.11	150.00 <sup>c</sup>	41.62
	Entre 5 y 10 veces	42	161.53	158.33 <sup>bc</sup>	34.99
	Entre 10 y 15 veces	22	187.15	178.89 <sup>ab</sup>	47.72
	Entre 15 y 20 veces	9	190.12	183.33 <sup>abc</sup>	42.40
	Igual o mayor a 20 veces	13	203.21	233.33 <sup>a</sup>	58.04
Cepillado de dientes de los miembros del hogar	Menor o igual a 3 veces	99	160.34	158.33 <sup>b</sup>	42.63
	Más de 3 veces	33	190.47	180.00 <sup>a</sup>	48.50
Duchas de los miembros del hogar	Diariamente	56	155.81	158.33 <sup>b</sup>	34.95
	Dos veces al día	76	176.76	166.67 <sup>a</sup>	45.73
Limpieza de duchas y lavamanos	Diariamente	11	179.80	141.67	90.46
	3 veces por semana	9	174.81	166.67	33.93
	2 veces por semana	37	167.91	166.67	42.15
	Semanalmente	62	168.02	158.33	38.63
	Quincenal	11	154.04	166.67	49.20
	Mensual	2	141.67	141.67	11.79
Descarga de inodoros en el hogar	Menor o igual a 5 veces	80	149.01	146.67 <sup>c</sup>	36.80
	Entre 5 y 10 veces	33	182.81	177.78 <sup>b</sup>	41.56
	Igual o mayor a 10 veces	19	221.35	216.67 <sup>a</sup>	36.08

*\*Nota 1:* n = número de hogares. *Nota 2:* las medianas seguidas de una letra en común no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Dunn con un nivel de significancia del 0.05.

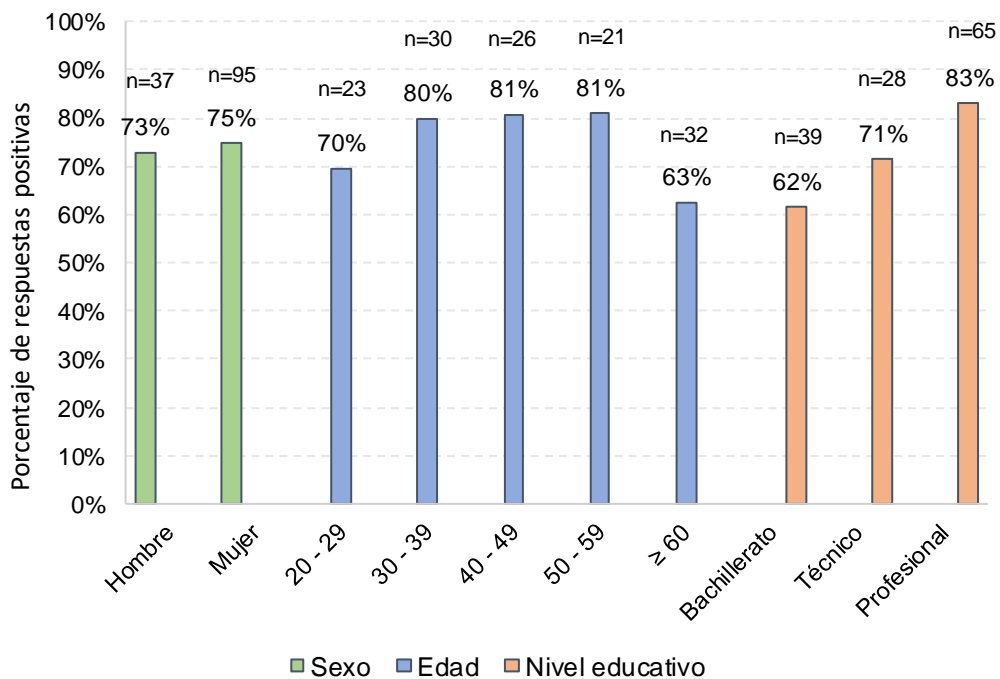
### 5.1.3 Factores que influyen sobre la aceptación de reúso del AGC

La **Figura 8** presenta la percepción social hacia la reutilización de las AGC, discriminando entre los participantes de la encuesta según su sexo, edad y nivel educativo. Adicionalmente, la **Tabla 8** muestra si existen o no diferencias significativas entre la percepción hacia el reúso de las

AGC con las tres variables sociodemográficas (sexo, edad y nivel educativo) que se analizan en este estudio.

**Figura 8.**

*Disposición de los individuos encuestados para el reúso de las AGC tratadas en función del sexo, edad y nivel educativo (n = número de respuestas)*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 61

**Tabla 8.**

*Relación de las variables sociodemográficas y la percepción hacia el reúso de las AGC*

Variables		Prueba estadística	Significancia (valor p)
Percepción de riesgo hacia la reutilización de AGC	Sexo	Fisher	0.1813
	Nivel educativo	Fisher	0.0049**
	Edad	Fisher	0.1479
Percepción hacia la reutilización de AGC	Sexo	chi <sup>2</sup>	0.8351
	Nivel educativo	chi <sup>2</sup>	0.0483*
	Edad	chi <sup>2</sup>	0.3843
Inversión inicial para implementar un sistema de reutilización de AGC	Sexo	Fisher	0.5058
	Nivel educativo	Fisher	0.0319*
	Edad	Fisher	0.2679
Frecuencia de operación de un sistema de reutilización de AGC	Sexo	Fisher	0.9318
	Nivel educativo	Fisher	0.0584
	Edad	Fisher	0.2624
Frecuencia de mantenimiento de un sistema de reutilización de AGC	Sexo	Fisher	0.6997
	Nivel educativo	Fisher	0.3004
	Edad	Fisher	0.0099*

*Nota:* La significancia de las pruebas estadísticas están indicadas para \*valor  $p < 0.05$  y

\*\*valor  $p < 0.01$ .

En la **Figura 8**, se destaca que tanto los hombres como las mujeres que fueron encuestados, en su mayoría (> 70%), están dispuestos a considerar el reúso del AGC posterior a su tratamiento. No se encontró relación significativa entre el sexo y la disposición por la reutilización de las AGC (**Tabla 8**). En contraste, estudios anteriores (Fielding & Roiko, 2014; Msaki et al., 2022; Mu'azu et al., 2020) demuestran que el sexo es un factor relevante que incide en la percepción en torno al reúso del agua y en el que las mujeres presentan una actitud más favorable hacia la reutilización

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 62

cuando se emplean en actividades que no implican contacto directo. Sin embargo, manifiestan reticencia al reúso de aguas recicladas en tareas domésticas como lavar y cocinar (Fielding & Roiko, 2014; Mu'azu et al., 2020). Esta percepción puede estar influenciada por normas sociales, creencias culturales y roles de sexo, que pueden moldear las actitudes y comportamientos de las personas en relación con el reúso del agua (Msaki et al., 2022).

Con respecto a la edad, se observa que los participantes en el rango de 20 a 59 años presentan mayor disposición al reúso de AGC (>70%), mientras que en el caso de los adultos mayores a 60 años, aunque predomina una alta disposición hacia esta práctica, no manifiestan el mismo interés que los restantes rangos poblacionales. Acorde con Akpan et al. (2020), la población más joven presenta una actitud más favorable hacia la reutilización de AR tratadas en contraste con la población de mayor edad. Este fenómeno podría ser atribuido a divergencias generacionales en las perspectivas sobre la sostenibilidad ambiental, así como a una mayor receptividad de la población joven hacia enfoques innovadores (Buyukkamaci & Alkan, 2013; Msaki et al., 2022).

Respecto del nivel educativo, se observa una mayor disposición de reúso de las AGC a medida que se presenta mayor grado de formación. Adicionalmente, el nivel educativo es la variable que se relaciona significativamente con la disposición hacia la reutilización de AGC (valor  $p < 0.01$ ) (Ver **Tabla 8**). Investigaciones previas sostienen que niveles de educación más alto ejercen un efecto notable en la disposición hacia la reutilización del agua (Garcia-Cuerva et al., 2016). Esto posiblemente debido a que los individuos con niveles educativos más elevados se poseen una comprensión más sólida de los procesos inherentes al tratamiento de AG. Esta comprensión reduce las inquietudes acerca de los riesgos que implican el reúso de estas aguas y, por ende, propicia un mayor grado de aceptación hacia su reúso (Al-Khatib et al., 2022; Gu et al.,

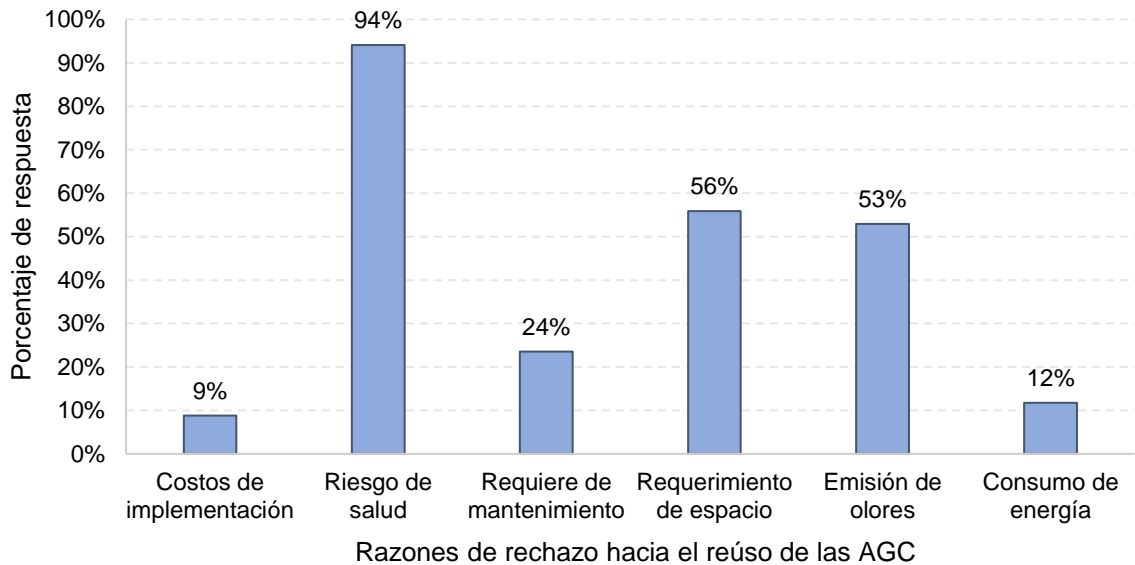
Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 63

2015). Además, las personas que poseen niveles educativos más elevados en general tienen mayor sensibilidad y conocimiento en torno a temas ambientales, que abarcan tanto la escasez como la importancia de la gestión del agua. Esta sensibilización ambiental influye positivamente en la percepción de la reutilización de AR tratadas (Dolnicar & Schäfer, 2009; Garcia-Cuerva et al., 2016; Rock et al., 2012).

La **Figura 9** presenta las causas que llevan a rechazar el reúso de las AGC. Se identificó que el potencial riesgo para la salud constituye el principal motivo para abstenerse del reúso de AGC. Esta constatación resalta la necesidad de abordar desafíos significativos para mitigar este rechazo, lo cual requiere la implementación de estrategias de sensibilización diversas que destaquen los mecanismos para reducir los riesgos para la salud asociados con estos sistemas (por ejemplo, mediante la implementación de sistemas que minimicen el contacto con las AR, la reducción de actividades de operación y mantenimiento, y el empleo del agua tratada en usos que no impliquen contacto directo) (Dolnicar et al., 2011; Portman et al., 2022). Para abordar esta problemática de manera efectiva, resulta indispensable llevar a cabo campañas de educación que permitan a las comunidades comprender, en primer lugar, que el uso de fuentes alternativas de agua no es una elección, sino una necesidad imperante. Estas campañas deben facilitar la familiarización de las poblaciones con las tecnologías de tratamiento y las prácticas de reúso, así como concienciar sobre los riesgos para la salud asociados, los cuales pueden ser gestionados adecuadamente mediante una correcta implementación y mantenimiento de los sistemas de reúso de AGC (Dolnicar et al., 2011).

**Figura 9.**

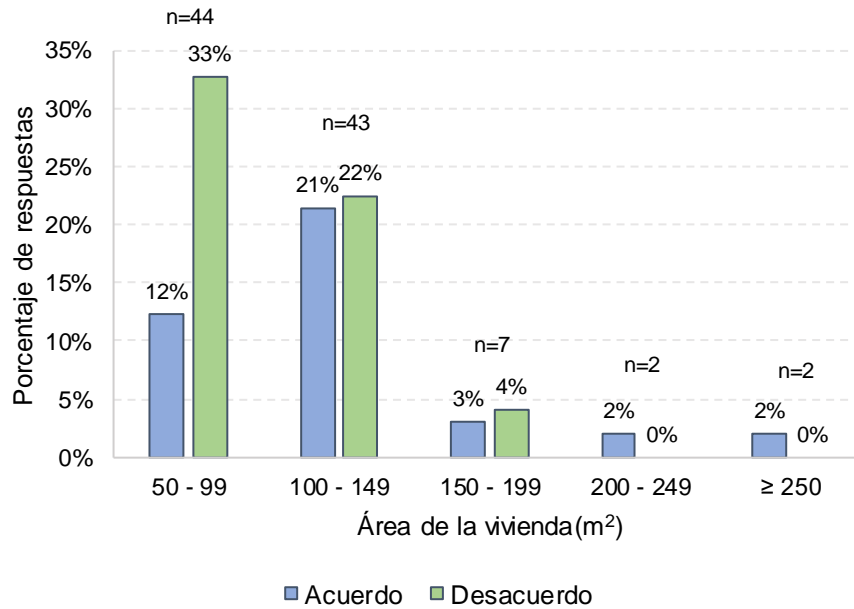
*Razones de los encuestados para el rechazo del reúso de AGC (n = 34 hogares encuestados que rechazaron el reúso del AGC)*



El requerimiento de espacio necesario para instalar un sistema de tratamiento para la reutilización de AGC en el hogar, es un factor relevante a la hora de rechazar el reúso de estas aguas. La **Figura 10** muestra que el 55% de los encuestados que rechazan el reúso de las AGC cuentan con un área de vivienda de menos de 150 m<sup>2</sup>. Llama la atención que los encuestados que tienen áreas de 200 m<sup>2</sup> o mayores, no tuvieron abstenciones relacionadas con la disponibilidad de espacio para la instalación del sistema. Sin embargo, estas viviendas con mayor disponibilidad del área representan una fracción muy baja de la población en el sector de estudio.

**Figura 10.**

*Disposición de los encuestados para reutilizar las AGC tratadas en función del área de la vivienda; n = número de hogares encuestados*



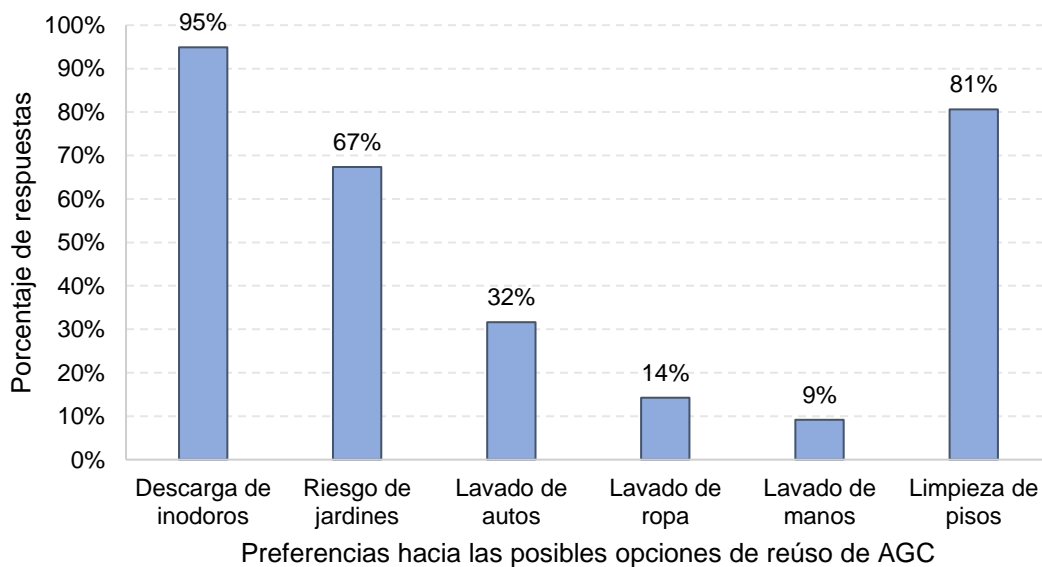
De otro lado, la producción de olores es la tercera razón de mayor relevancia para el rechazo de reutilización de las AGC (ver **Figura 9**). Si bien la reutilización de estas aguas podría tener ciertas ventajas, una de las barreras para su implementación puede ser la emisión de malos olores y la proliferación de insectos, producto de la falta de adecuada operación y mantenimiento, que a su vez se podría relacionar con la poca comprensión por parte de los usuarios sobre el funcionamiento de estos sistemas (Thaher et al., 2020). Entre los factores que podrían incidir en la generación de olores, se encuentran el almacenamiento inadecuado de estas aguas durante uno o dos días, condición que contribuye a deteriorar su calidad y generar malos olores debido a la descomposición de materia orgánica remanente (Al-Khatib et al., 2022). Las otras razones de

rechazo que tuvieron menor importancia en el contexto de estudio correspondieron a los requerimientos de mantenimiento, el consumo de energía y los costos de implementación.

En la **Figura 11** se presentan las preferencias de aplicaciones de reúso para las AGC. A nivel general, los individuos encuestados comparte una preferencia (> 80%) por destinar las aguas tratadas a la descarga de inodoros y la limpieza de pisos, y se presenta una menor aceptación (~10%) para el lavado de manos y de ropa, siendo esta reticencia principalmente atribuible a la voluntad de evitar el contacto directo con dichas aguas, debido a la percepción sobre el riesgo de enfermedades (Buyukkamaci & Alkan, 2013).

**Figura 11.**

*Tendencia de preferencia hacia las posibles aplicaciones de reúso de las AGC tratadas (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC)*



Estudios previos revelan que la mayoría del público se muestra preocupado por los riesgos de salud asociados con la reutilización de AG tratadas, donde se observa que los niveles de

aceptación disminuyen a medida que aumenta el contacto directo con estas aguas, siendo la descarga de inodoros, el lavado de autos y el riego de jardines, las aplicaciones de uso más aceptadas de las aguas tratadas (Abdelrahman et al., 2020; Akpan et al., 2020; Jamrah et al., 2008). En Colombia, estudios previos muestran que las opciones de reúso de las AG a nivel de hogares por parte de los usuarios finales son descarga de inodoros, riego de jardines, lavado de ropa y limpieza de pisos (Domínguez et al., 2017; Oviedo-Ocaña et al., 2018).

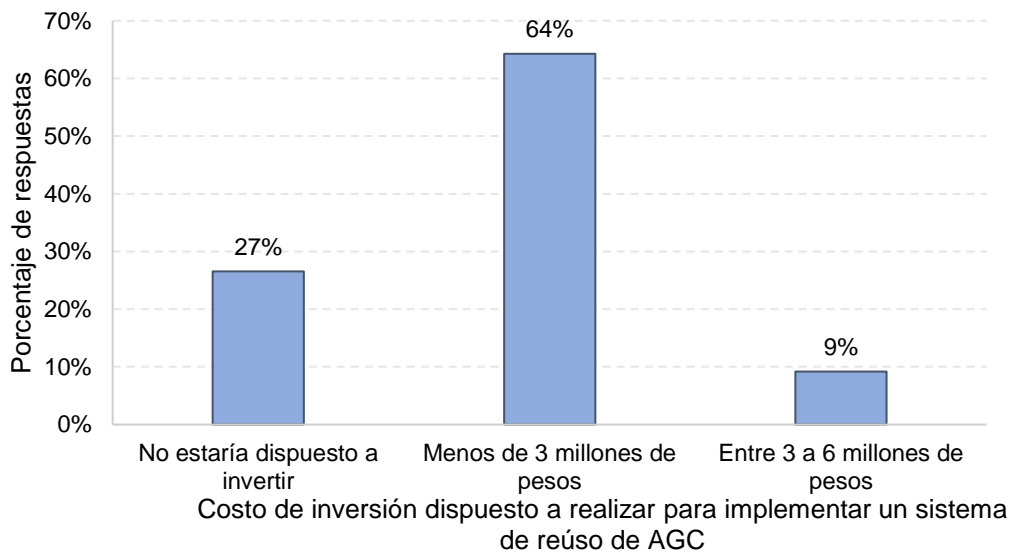
Es relevante destacar que la reutilización de AG para descarga de inodoros y riego de espacios verdes en zonas urbanas puede reducir el consumo de agua potable hasta en un 30% y 50%, respectivamente (Mahmoudi et al., 2021). Adicionalmente, Radin Mohamed et al. (2016), en Malasia, concluyeron que implementar un sistema de reúso de AG para actividades como riego y descarga de inodoros, significa una disminución en el consumo de agua de hasta un 50%. Finalmente, según Memon et al. (2005), el reúso de AG en zonas urbanas del Reino Unido para la descarga de inodoros a nivel residencial permitiría ahorrar aproximadamente de 31 m<sup>3</sup>/vivienda/año.

Respecto a la inversión para la implementación de un sistema de reúso de AGC en sus hogares, el 64% de los hogares encuestados están dispuestos a invertir una cantidad inferior a los 3 millones de pesos (**Figura 12**). El nivel educativo del individuo encuestado es un factor que se relaciona significativamente (valor  $p = 0.0319$ ) con la inversión inicial que estarían dispuestos a realizar en caso de implementar un sistema de reúso de AGC (**Tabla 8**), este hallazgo sugiere que a medida que aumenta el nivel educativo de los encuestados, se observa una mayor disposición a realizar inversiones económicas en la implementación de sistemas de tratamiento y reúso de AGC. Esta tendencia puede atribuirse a una mayor conciencia ambiental y comprensión de los beneficios

asociados con la adopción de prácticas sostenibles en el manejo del agua (Garcia-Cuerva et al., 2016). Uno de los principales desafíos de la implementación de esquemas de reúso de AG radica en los costos financieros asociados. Esto se debe a que el sistema hidrosanitario convencional en un hogar, en el contexto de Colombia, no separa las AG de las ARD. La instalación o adaptación de tuberías para desviar específicamente las AG implica costos adicionales (Oh et al., 2018). Adicionalmente, el costo de energía es un factor relevante asociado a los costos de operación, aunque por lo general, los sistemas de reutilización de AG que requieren poco consumo de energía son más atractivos financieramente que los sistemas con alto requerimiento de consumo de energía (Memon et al., 2005).

**Figura 12.**

*Disposición de los encuestados a invertir en un sistema de reutilización de AGC dentro de su vivienda (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC)*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 69

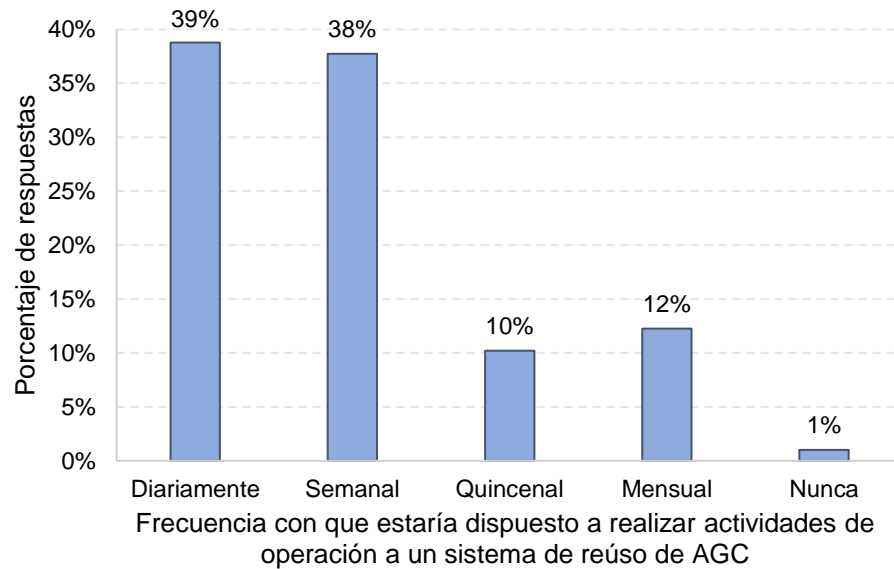
Estudios anteriores indican que los apoyos financieros por parte del gobierno son un incentivo y/o estímulo para aceptar la implementación de este tipo de sistemas en sus hogares (Oh et al., 2018; Pinto & Maheshwari, 2010; Vuppaladadiyam et al., 2019), por lo que este tipo de ayudas por parte de los gobiernos o autoridades reguladores del agua, serán útiles para lograr un reúso generalizado de las AG (Garcia-Cuerva et al., 2016). Por lo tanto, es importante que los gobiernos locales y el sector público, evalúen la incorporación de sistemas de subsidios, reembolsos y/o descuentos a los actores interesados en implementar sistemas de reciclaje de AG, con el fin de promover la adopción de estos enfoques (Mu'azu et al., 2020).

En términos de la frecuencia para llevar a cabo actividades de operación y mantenimiento de los sistemas de AGC, se observa que la mayoría de las personas encuestadas (77%) concuerdan en que las actividades de operación a estos sistemas, deberían realizarse de manera periódica, con una frecuencia que oscila entre la operación diaria y semanal (**Figura 13**), además, la frecuencia aceptada para las actividades de mantenimiento mostró más variabilidad (**Figura 14**), y el acuerdo más alto (34% de los encuestados) indicó una preferencia de frecuencia mensual para realizar estas actividades. Esta información es importante para considerar tecnologías que los usuarios pueden operar y mantener adecuadamente.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 70

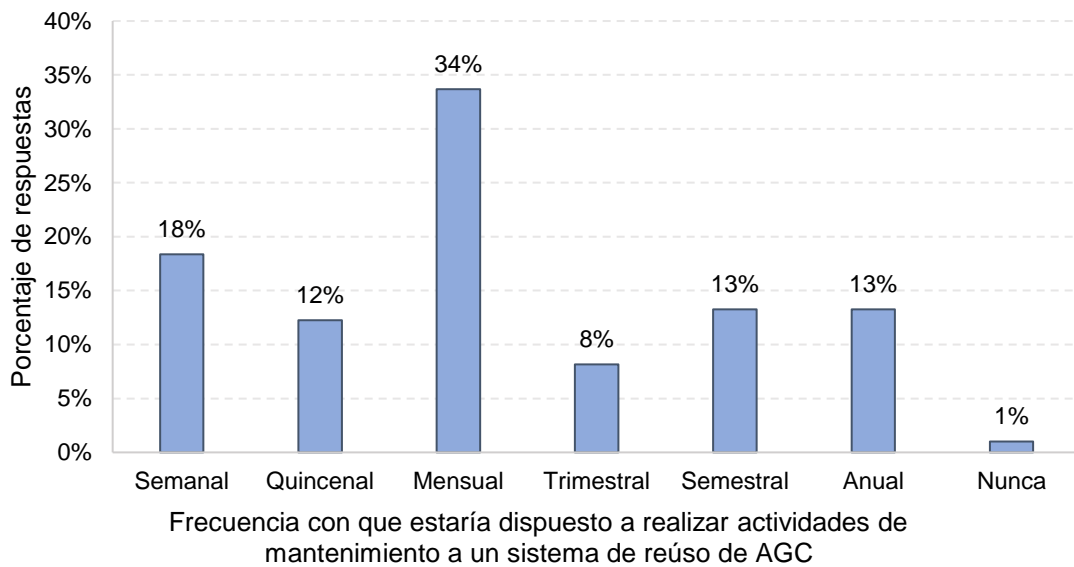
**Figura 13.**

*Frecuencia con que los encuestado estarían dispuestos a realizar actividades de operación del sistema de reutilización de AGC (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC)*



**Figura 14.**

*Frecuencia con que los encuestados estarían dispuestos a realizar actividades de mantenimiento del sistema de reutilización de AGC (n = 98 hogares encuestados que aceptaron el reúso del AGC)*



## 5.2 Consumo de agua potable en la vivienda de estudio

En la **Tabla 9** se muestra la comparación de consumo promedio en diferentes países, según información reportada en la literatura. Se observa que España (280.00, 263.01, 304.11, 352.05 y 309.59 L/per\*día) presenta un consumo mucho mayor en comparación con otros países. El consumo promedio de agua en la vivienda de estudio fue de  $160.73 \pm 67.12$  L/per\*día (coeficiente de variación del 42%), valor cercano al consumo per cápita de la zona residencial ( $166.25 \pm 47.17$  L/per\*día). El consumo en la vivienda de estudio superior al estipulado en la Resolución 0330 de 2017 para este tipo de hogares (140 L/per\*día) (Minvivienda, 2017). El consumo promedio en este estudio se encuentra cerca al hallado en Australia (157.2 L/per\*día), y por encima del consumo de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 72

agua promedio en los hogares de Ghana (120 L/per\*día), India (108 L/per\*día), Dinamarca (119 L/per\*día), Países Bajos (134 L/per\*día), Grecia (135.6 L/per\*día) e Irlanda (148 L/per\*día). Las variaciones en los patrones de consumo de agua doméstico en diferentes países del mundo están marcadas por factores como nivel de ingresos, nivel educativo y condiciones demográficas propias de cada región (Villar-Navascués & Pérez-Morales, 2018; Willis et al., 2013). Crouch et al. (2021) determinaron que para poder suplir las necesidades cotidianas (preparar alimentos, beber, higiene básica y baño) en un contexto urbano, se necesitan aproximadamente 175 L/per\*día, valor cercano al hallado en este estudio.

**Tabla 9.**

*Consumo de agua promedio a nivel doméstico (L/per\*día)*

País de estudio	Contexto	Consumo de agua	Referencia
Colombia	Consumo promedio en una vivienda residencial ubicada en Bucaramanga	160.73	Este estudio
Australia	Consumo promedio de los hogares en la ciudad de Gold Coast	157.20	(Willis et al., 2013)
Ghana	Consumo promedio en tres comunidades urbanas (Ayigya, Bomso y Kentinkrono) en la metrópoli de Kumasi	120.00	(Dwumfour-Asare et al., 2017)
India	Consumo promedio de una zona residencial situada dentro del campus universitario IIT Madras en Chennai	108.00	(Delhiraja & Philip, 2020)

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 73

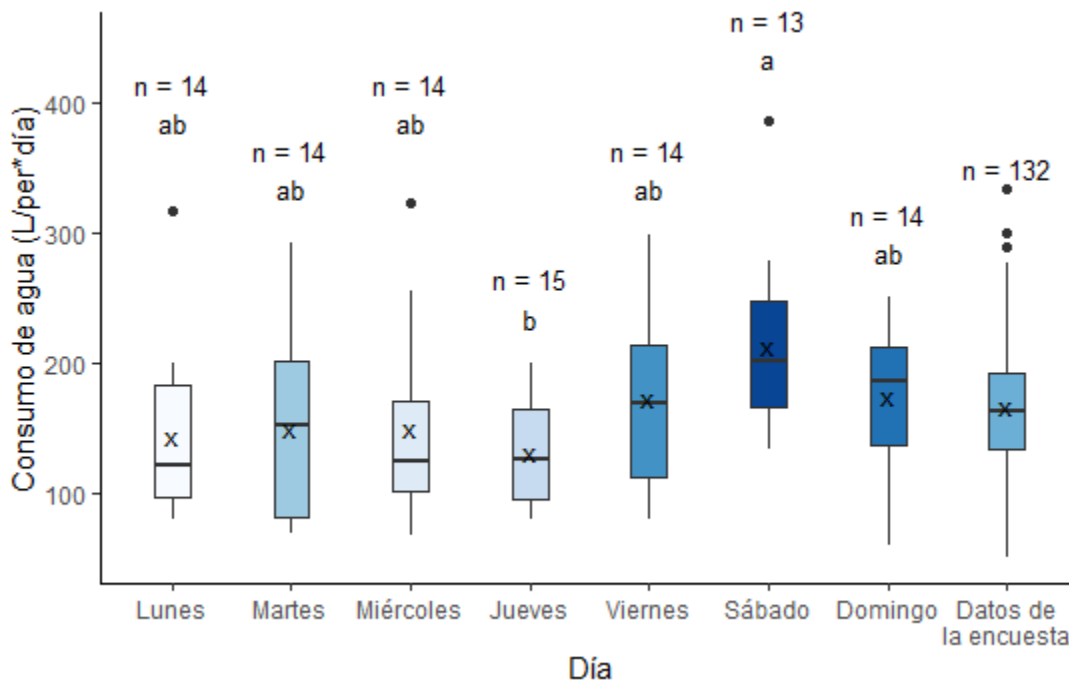
Dinamarca	Consumo promedio en un bloque de 84 apartamentos de en la ciudad de Copenhague	119.00	(Revitt et al., 2011)
Países Bajos	Consumo promedio nacional en los hogares neerlandeses	134.00	(Krozer et al., 2010)
España (Barcelona; Zaragoza; Málaga; Madrid y Sevilla)	Consumo promedio suministrado por las empresas prestadoras de agua: EMASA; EMASESA; Aguas de Barcelona; Empresa Canal de Isabel II Madrid; y Oficina municipal del Agua Zaragoza	280.00; 263.01; 304.11; 352.05; 309.59	(Tortajada et al., 2019)
Grecia	Consumo promedio de 3 hogares en la ciudad de Atenas	135.60	(Noutsopoulos et al., 2018)
Irlanda	Consumo promedio nacional de los hogares irlandeses, según la EPA	148.00	(Z. Li et al., 2010)

En el caso de la vivienda de estudio, según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, indicó que existen diferencias estadísticamente significativas (valor  $p = 0.03509$ ) en el consumo de agua potable a lo largo de la semana (ver **Figura 15**); adicionalmente, con el análisis de la prueba post hoc de Dunn, se determina que los días de mayor consumo son los sábados, mientras que los jueves son los días de menor consumo. La **Tabla 10** muestra la relación del consumo de agua con el uso de la lavadora, la prueba Mann-Whitney U indica que existen diferencias

estadísticamente significativas con el consumo per cápita de agua potable respecto al uso de la lavadora en el hogar (valor  $p = 2.769e-09$ ).

**Figura 15.**

*Variación del consumo de agua potable en la vivienda de estudio en los diferentes días de la semana (98 días de monitoreo)*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos, n es igual al tamaño del conjunto de datos. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según la prueba Kruskal-Wallis. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 75

**Tabla 10.**

*Variación del consumo de agua potable respecto al uso de la lavadora*

<b>¿Se hizo uso de la lavadora?</b>	<b>n</b>	<b>Consumo per cápita</b>
Si*	48	199.98 ± 64.5 <sup>a</sup>
No	50	123.06 ± 44.4 <sup>b</sup>

\*Nota: Días en que se usó la lavadora: 4 lunes, 7 martes, 7 miércoles, 3 jueves, 6 viernes, 11 sábados y 10 domingos.

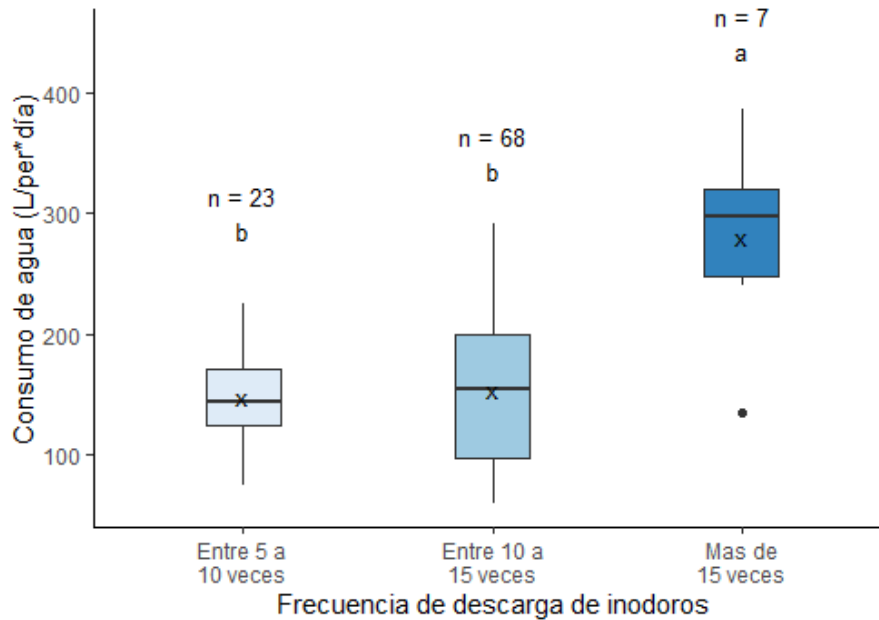
Arbués et al. (2010), afirman que el consumo de agua doméstico, más que por el número de integrantes del hogar, está influenciado directamente por el conjunto de actividades de limpieza doméstica. Willis et al. (2013) respaldan esta información, manifestando que las actividades de mayor consumo de agua en los hogares son el uso de la ducha con un 33% del consumo total de agua (49.7 L/per\*día) y la lavadora con un 19% del total de consumo de agua (30.0 L/per\*día). Teniendo en cuenta estas afirmaciones, se realizó una exploración detallada, de los 98 días de monitoreo de consumo de agua, encontrándose que en 48 días realizaron uso de la lavadora (se realizaron 83 lavados en total); de estos, el sábado representa el mayor uso de la lavadora (23% del uso total en el periodo de estudio y 39% del número total de lavadas durante el período de monitoreo), mientras que el jueves fue el de menor uso de la lavadora (6% del uso total en el periodo de estudio y 4% del número total de lavadas durante el periodo de monitoreo). Con base en esta información, se podría tener un indicio de que el uso de la lavadora es el determinante que mayor afecta el consumo de agua potable en este hogar.

Finalmente, en la vivienda de estudio el agua consumida para la descarga de inodoros representa el 10% del consumo total de agua potable. Aproximadamente, se consumen 15.03 ±

4.38 L/per\*día (coeficiente de variación del 21%) de agua potable para la descarga de inodoro, valor inferior en comparación con países como Dinamarca (Revitt et al., 2011), Irlanda (Z. Li et al., 2010), Grecia (Noutsopoulos et al., 2018), Países Bajos (Krozer et al., 2010) e India (Mandal et al., 2011), donde han determinado que el volumen de agua usado para la descarga de inodoros es de 28.56, 40, 37.2, 39 y 25 L/per\*día, respectivamente. Con base en la **Figura 16** se observa que, a medida que aumenta la frecuencia de descargas de inodoros en el hogar, se presenta un aumento en el consumo per cápita de agua de hasta 89% (i.e., para menos de 10 y más de 15 descargas se presentan diferencias estadísticamente significativas). Según la prueba Kruskal-Wallis, se determina que existen diferencias significativas en el consumo de agua potable entre las diferentes frecuencias de descarga de inodoro (valor  $p = 0.002101$ ) y la prueba post hoc de Dunn evidencia un consumo superior cuando descargan el inodoro más de 15 veces. Campisano & Modica (2010) sugieren que la reutilización de AGC para la descarga de inodoros, representa un ahorro de agua potable a nivel doméstico entre el 10% al 30%, indicando que éste es uno de los usos con mayor potencial por el alto volumen de agua que demanda y los menores requerimientos de calidad del agua respecto a otros usos domésticos.

**Figura 16.**

*Consumo de agua potable relacionado con la frecuencia de descarga de inodoros*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos, n es igual al tamaño del conjunto de datos. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según la prueba Kruskal-Wallis. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

### 5.3 Producción de AGC en la vivienda de estudio

El requerimiento doméstico de agua en duchas, bañeras y lavamanos termina convirtiéndose en producción de AGC (Mandal et al., 2011), por consiguiente, así como el consumo de agua varía entre países debido a su localización geográfica y a las condiciones sociodemográficas y económicas, también lo hace la producción de AGC (Boyjoo et al., 2013).

La **Tabla 11** presenta una comparación de la producción de AGC en diferentes países del mundo, de acuerdo con datos reportados en la literatura. Según los resultados obtenidos en esta

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 78

investigación, la producción media de AGC en la vivienda de estudio es de  $33.83 \pm 4.10$  L/per\*día y representa el 21% del consumo de agua potable en el hogar. La producción promedio de AGC es superior a la reportada en India, pero, se encuentra por debajo del valor determinado en Grecia, Ghana, Alemania, Países Bajos, Irlanda y Dinamarca.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 79

**Tabla 11.**

*Volúmenes de producción promedio de las AGC (L/per\*día)*

País de estudio	Contexto	AGC (lavamanos)	AGC (duchas)	Total AGC	Consumo agua promedio	Referencia
Colombia	Producción promedio en una vivienda residencial ubicada en Bucaramanga	1.9	31.9	33.83 *	160.73	Este estudio
India	Dato extraído de la observación hecha en un hogar ubicado en SVNIT en Surat	7	19	26*	n.d.	(I. Shaikh & Ahammed, 2022)
Grecia	Producción promedio de 3 hogares en la ciudad de Atenas	11.3	37.5	48.8*	135.60	(Noutsopoulos et al., 2018)
Ghana	Producción promedio en tres comunidades urbanas (Ayigya, Bomso y Kentinkrono) en la metrópoli de Kumasi	n.d.	n.d.	43.36	120.00	(Dwumfour-Asare et al., 2017)
Alemania	Dato determinado mediante el monitoreo de 10 unidades de apartamentos ubicados al norte de la ciudad de Stuttgart.	n.d.	n.d.	48	n.d.	(Morandi et al., 2021b)
Países Bajos	Producción promedio nacional en los hogares neerlandeses	4	38	42*	134.00	(Krozer et al., 2010)
Irlanda	Producción promedio nacional de los hogares irlandeses, según la EPA	n.d.	56	n.d.	148.00	(Z. Li et al., 2010)
Dinamarca	Producción promedio en un bloque de 84 apartamentos de en la ciudad de Copenhague	n.d.	n.d.	42.8	119.00	(Revitt et al., 2011)

*Nota:* \*valores estimados con base en información de producción de lavamanos y ducha

La **Figura 17** muestra la evolución de la producción de AGC en el hogar a lo largo de la semana. Según la prueba de ANOVA, se determinó que no existen diferencias significativas

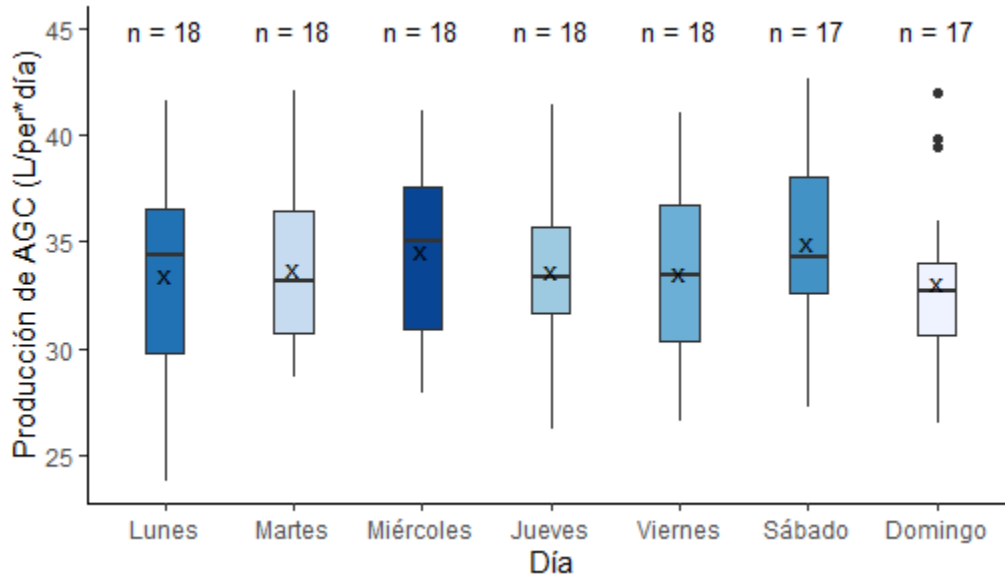
Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 80

respecto a la producción de AGC en los diferentes días (valor  $p = 0.856$ ), concluyendo que la producción de AGC es constante con el pasar de los días; este hallazgo refuerza el estudio hecho por I. Shaikh & Ahammed (2022), donde concluyeron que la generación de AGC es similar entre durante los días laborales como los fines de semana, afirmando la inalterabilidad en los hábitos de los individuos a lo largo de la semana. Por consiguiente, en este estudio se puede sugerir una posible una estabilidad en los patrones de higiene y cuidado personal, relacionados con la producción de AGC en la vivienda de estudio.

Teniendo en cuenta que este estudio se centra específicamente en la producción de AGC, y en la vivienda de estudio se pudo observar que el 94% del volumen que corresponde a AGC es aportado por las duchas, mientras que solamente el 6% es aportado por los lavamanos. Se podría concluir que la consistencia en la producción de AGC durante toda la semana está relacionada a ciertos hábitos de consumo consistentes y la distribución uniforme de patrones de uso del agua a lo largo de la semana, (por ejemplo, el hábito que cada miembro del hogar tiene de ducharse diariamente).

**Figura 17.**

*Variación de la producción de AGC en la vivienda de estudio a lo largo de la semana (124 días de monitoreo)*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos, n es igual al tamaño del conjunto de datos. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según ANOVA. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

#### **5.4 Caracterización de las AGC generadas en la vivienda de estudio**

La **Tabla 12** presenta los estadísticos descriptivos para cada parámetro de calidad del AGC analizado y la **Tabla 13** presenta una comparación de los resultados de este estudio con los reportados en la literatura para otros contextos. Asimismo, desde la **Tabla 3E** hasta la **Tabla 13E** del **Apéndice E**, se presentan las variaciones de cada parámetro de calidad con respecto a las diferentes campañas de muestreo que se llevaron a cabo. Finalmente, en el Anexo F se presenta la

exploración de los componentes presentes en los productos de cuidado e higiene personal que se utilizaron en la vivienda de estudio durante el período de monitoreo. Esto se realizó para conocer los compuestos orgánicos e inorgánicos que podrían ejercer un efecto sobre la calidad de las AGC (Delhiraja & Philip, 2020b; Kadewa et al., 2020).

**Tabla 12.**

*Calidad del AGC generada en la vivienda de estudio*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>pH</b>		27	7.49	0.12	2%	7.20	7.67
<b>CE</b>	μS/cm	27	188.07	9.13	5%	173.57	207.00
<b>Turbiedad</b>	NTU	27	280.95	74.81	27%	172.00	470.00
<b>NT</b>	mgN/L	26	6.37	1.84	29%	3.47	11.70
<b>PT</b>	mgP/L	23	0.74	0.33	45%	0.30	1.51
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	26	187.05	49.87	27%	119.00	361.00
<b>SST</b>	mg/L	24	214.58	49.88	23%	104.00	292.00
<b>DQO</b>	mgO <sub>2</sub> /L	27	879.68	163.51	19%	553.66	1200.00
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mgO <sub>2</sub> /L	26	387.92	92.08	24%	199.00	610.00
<b>CF</b>	UFC/100 mL	10	1.87E+05	4.03E+05	216%	50.00	1.30E+06
<b>CT</b>	UCF/100 mL	10	4.13E+05	1.09E+06	264%	600.00	3.50E+06
<b>Cloruros</b>	mgCl <sup>-</sup> /L	7	6.30	1.58	25%	3.00	7.70

n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación; CE = conductividad eléctrica; CF = coliformes fecales; CT = coliformes totales

**Tabla 13.***Características del AGC en esta investigación, en comparación con otros estudios*

Parámetro	B/manga, Colombia	Surat, India	Misisipi, EE. UU.	Atenas, Grecia	Ayigya y Bomso, Ghana	Stuttgart, Alemania	Lloret de Mar, España	Basiskele, Turquía	Kampala, Uganda
	Este estudio	(I. Shaikh & Ahammed, 2022)	(Lalley et al., 2023)	(Noutsopoulos et al., 2018)	(Dwumfour-Asare et al., 2017)	(Morandi et al., 2021b)	(Atanasova et al., 2017)	(Oktor & Çelik, 2019)	(Katukiza et al., 2015)
	AGC de una vivienda familiar	AGC analizando por separado cada fuente en un hogar ubicado en El SVNIT	AGC del Centro de Entrenamiento de Fuerzas Conjuntas	AGC analizando por separado cada fuente de tres hogares diferentes	AGC de 20 hogares dentro de Bomso y Ayigya,	AGC de 10 unidades de apartamentos ubicados en Stuttgart	AGC de las habitaciones de un hotel de Costa Brava	AGC analizando por separado cada fuente de un hogar	Se recolectaron AGC ( duchas) en 10 hogares en un barrio marginal de Bwaise III
pH	7.49±0.12	7.23±0.26; 7.33±0.22		7.60±0.20; 7.50±0.10	6.80	8.40±0.30	7.10±0.30	7.96; 8.00	7.60±0.40
CE [µS/cm]	188.07±9.13	797.00±139.00; 816.00±144.00		318.00±278.00; 318.00±30.00	1346.00	737.00±51.00	784.00±65.6 0		756.00± 261.00
Turbiedad [NTU]	280.95±74.81	143.00±43.00; 185.00±64.00	59.60±147.8 0		445.50				
NT [mgN/L]	6.16±1.51				15.80	28.30±7.10	9.50±5.60	14.30; 10.60	
PT [mgP/L]	0.64±0.19				11.90	1.90±0.50		2.25; 1.67	4.30± 1.90
Grasas y aceites [mg/L]	187.05±49.87	11.00±10.00; 58.00±33.00							4.80±1.20
SST [mg/L]	214.58±49.88			90.50±68.00; 73.50±38.00	458.00		43.40±32.40		1532.00±633.0 0
DQO [mgO <sub>2</sub> /L]	879.68±163.51	189.00±100.00; 236.00 ±101.00	287.60 ± 529.40	427.00±192.00; 390.00±125.00	620.00	328.00±211.0 0	139.00±83.0 0	1171.00; 654.00	4675.00±170.0 0
DBO <sub>5</sub> [mgO <sub>2</sub> /L]	387.92±92.08	160.00 ± 78.00; 161.00 ± 62.00	163.40 ± 323.00	305.00±129.00; 263.00±83.00	172.30		103.80±36.8 0	568.00; 385.00	
DQO:N:P	100:0.7:0.07						100:6.7:0.4		100:1.09:0.09

Considerando los coeficientes de variación en los diferentes parámetros de calidad, se determinó que, a excepción del pH, la CE y la DQO, los demás parámetros presentan variabilidad alta ( $CV > 20\%$ ), lo que representa un desafío en el tratamiento de estas aguas, ya que las tecnologías empleadas deben asegurar la consistencia en la calidad del efluente a lo largo de las variaciones de carga contaminante (Antonopoulou et al., 2013). Los coeficientes de variación más altos observados, fueron las relacionadas con el contenido microbiológico y de nutrientes, esta discusión se detalla a continuación en el documento, específicamente donde se exponen los parámetros de calidad correspondientes a la concentración de nutrientes y carga microbiológica.

El AGC analizada en este estudio se caracterizó por valores de pH cercanos a la neutralidad ( $7.49 \pm 0.12$ ). El pH del AGC se encuentra directamente influenciado por el uso de jabones a base de hidróxido de sodio (Oteng-Peprah, de Vries, et al., 2018). Este componente, que actúa como regulador de pH, se identificó como ingrediente activo en el champú (**Tabla 2F**) y el acondicionador para cabello (**Tabla 3F**) que utilizaron en la vivienda de estudio mientras se realizaron los muestreos. Finalmente, se observó una tendencia similar en los valores de pH para AGC en estudios anteriores desarrollados en India ( $7.33 \pm 0.22$ ) y Grecia ( $7.50 \pm 0.10$ ), pero se encuentra por debajo del valor de pH hallado en AGC producidas en Alemania ( $8.40 \pm 0.30$ ). Finalmente, con base en la **Figura 2E** del **Apéndice E**, se puede concluir que el pH no presentó diferencias estadísticamente significativas en las tres campañas de muestreo realizadas.

Los valores de CE ( $188.07 \pm 9.13 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) se encuentran por debajo del rango reportado en la literatura (valor mínimo:  $318.00 \pm 30.00 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; valor máximo:  $1346 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). La CE está relacionada directamente con las concentraciones de sales solubles (F. Li, Gulyas, et al., 2009). I. N. Shaikh & Ahammed (2022) afirma que las sales solubles encontradas en las AGC son

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 85

procedentes de algunos productos de higiene y cuidado personal (i.e., cloruro de sodio, sales de magnesio y sulfato de sodio). A partir del análisis de la composición de los productos de cuidado e higiene personal utilizados en la residencia de estudio, se encontró que: i) el cloruro de sodio estaba presente en el champú (**Tabla 2F**), acondicionador para el cabello (**Tabla 3F**), jabón corporal (**Tabla 5F**) y jabón de manos (**Tabla 6F**), utilizado como agente espesante y regulador de la viscosidad; ii) las sales de magnesio se encontraron en el champú (**Tabla 2F**) y el producto utilizado como desodorante (**Tabla 10F**) principalmente como agentes reguladores de pH y antiacné; y iii) el sulfato de sodio se encontró en jabón de manos (**Tabla 6F**) como agente espumante y en la crema dental (**Tabla 7F**) como surfactante y tensioactivo. Finalmente, F. Li, Gulyas, et al. (2009) afirman que pueden llegar a encontrarse sales de cloro debido al cloro residual que presenta el agua de uso doméstico después de haber pasado por procesos de desinfección durante su potabilización.

Con respecto a las campañas de muestreo, la **Figura 3E (Apéndice E)** muestra que existen diferencias significativas en las tres campañas de muestreo para los valores de CE (valor  $p = 0.00657$ ), siendo la primera campaña la que presenta los valores más altos. Este hallazgo puede estar vinculado a la variación en los patrones de consumo de los individuos, específicamente, en la cantidad de productos de cuidado e higiene personal empleada por los residentes, los cuales pueden contribuir a la variación en la CE del AGC. Es importante resaltar que la variación en los patrones de consumo, incluida la cantidad de producto utilizado, sugiere un aspecto relevante que podría influir en la carga contaminante de las AGC. En tal sentido, se sugiere que futuras investigaciones aborden sistemáticamente la relación entre la cantidad de productos de cuidado

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 86

personal utilizados y la carga contaminante en las aguas residuales, con el fin de esclarecer de manera más precisa la influencia de dichos factores sobre la calidad de las AGC.

Los valores de turbiedad fueron relativamente altos ( $280.95 \pm 74.81$  NTU) en comparación con los encontrados en India ( $185 \pm 64$  NTU), pero bajos en comparación con los reportados en Ghana ( $445.5$  NTU). La **Figura 4E (Apéndice E)**, muestra que existen diferencias estadísticamente significativas en las campañas de muestreo con respecto a los valores de turbiedad (valor  $p = 0.004339$ ), siendo la tercera campaña, la que presentó valores más altos de turbiedad en comparación con las primeras dos campañas. Delhiraja & Philip (2020), afirman que la turbiedad en las AGC está relacionada el uso de jabones sólidos y la presencia de hebras de cabello. Partiendo de este supuesto, se comparó el tipo de jabones que se utilizaron durante el período de monitoreo, con base en la información suministrada en la **Tabla 1F (Apéndice F)**, y se encontró que en las primeras dos campañas en la vivienda de estudio utilizaron jabones corporales líquidos, mientras que durante la última campaña hicieron uso de jabones corporales sólidos.

Los valores de SST determinados en el AGC de la vivienda de estudio ( $214.58 \pm 49.88$  mg/L) se encuentran muy por encima de los valores reportados en Grecia ( $90.50 \pm 68.00$  mg/L y  $73.50 \pm 38.00$  mg/L) y España ( $43.40 \pm 32.40$  mg/L), pero por debajo de los reportados en Ghana ( $458.00$  mg/L) y Uganda ( $1532.00 \pm 633.00$  mg/L). La relativamente alta concentración de SST en las AGC estudiadas puede atribuirse a la presencia de hebras de cabello y células de piel que son expulsadas mientras las personas se duchan (Khanam & Patidar, 2022). Es importante señalar que, en las AGC se vuelve relevante las mediciones de turbiedad y SST para comprender la naturaleza de partículas y coloides contenidas, debido a que pueden provocar obstrucciones y

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 87

colmataciones en tuberías, filtros y membranas utilizados para el tratamiento de estas aguas (Delhiraja & Philip, 2020).

El contenido de grasas y aceites en esta investigación ( $187.05 \pm 49.87$  mg/L) fue considerablemente alto en comparación con los reportados en India ( $11.00 \pm 10.00$  y  $58.00 \pm 33.00$  mg/L) y Uganda ( $4.80 \pm 1.20$  mg/L). Las fuentes de grasas y aceites en las AGC pueden ser expulsadas durante la ducha (grasas corporales y sebo capilar) (I. N. Shaikh & Ahammed, 2020) e introducidas por medio de los productos de cuidado personal utilizados debido a su contenido de aceites y ácidos grasos (Abdel-Shafy et al., 2014). Con base en esta información, se exploró en el Anexo F la lista de productos de cuidado personal utilizados, para identificar qué componentes contribuyeron con el contenido de grasas y aceites en las AGC analizadas. Se identificaron componentes como: i) Palmato de Sodio, Kernelato de palma de sodio (derivados del aceite de palma) en el jabón corporal (**Tabla 5F**); ii) parafina líquida, aceite de argán, aceite de almendras, aceite de aguacate, aceite de jojoba, alcohol cetearílico, alcohol bencílico, Cloruro de Behentrimonio, aceite de coco, Citronelol, D-Limoneno, Linalol (derivados de aceites esenciales, naturales y vegetales) en el acondicionador de cabello (**Tabla 3F**), crema para peinar (**Tabla 4F**) y crema corporal (**Tabla 9F**); iii) alcohol bencílico, Eucaliptol, mentol y timol (derivados de aceites esenciales del eucalipto, menta tomillo y orégano) en el enjuague bucal (**Tabla 8F**).

El contenido de grasas y aceites requiere de atención en la descarga de las AG en cuerpos superficiales y en el reúso para el riego. Cuando estas aguas son descargadas a cuerpos superficiales producen una película translúcida que se forma en la superficie del agua, reduciendo la penetración de luz, la difusión de oxígeno, y los procesos de fotosíntesis de plantas sumergidas, de esta manera se perturba la vida en los ecosistemas acuáticos (Oteng-Peprah, Acheampong, et

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 88

al., 2018). Finalmente, cuando estas aguas son utilizadas para riego, forman una capa delgada en el suelo, donde se acumulan las grasas y aceites, evitando la penetración del agua, de esta manera se ve afectada la porosidad y capacidad de infiltración del suelo, reduciendo significativamente la capacidad del suelo para transmitir agua (Travis et al., 2008).

Los valores promedio de NT ( $6.37 \pm 1.84$  mgN/L) y PT ( $0.74 \pm 0.33$  mgP/L) en las AGC estudiadas son bajos en comparación con los reportados en literatura. Según J. Li et al. (2024), una de las fuentes de nitrógeno en las AG puede ser la urea, teniendo en cuenta esta afirmación, se realizan un hallazgo en la vivienda de estudio, donde el niño de 12 años que reside en esta testifica haber ejercido prácticas de micción en la ducha en ocasiones eventuales. Kadewa et al. (2020), afirman que los productos de cuidado e higiene personal realizan un aporte significativo de nutrientes medidos en términos de NT y PT. Con base en esta premisa, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los componentes presentes en cada producto que fue usado en la vivienda de estudio. Se identificaron particularmente en champús, acondicionadores, cremas para peinar, jabón corporal y jabón de manos (enumerados desde la **Tabla 2F** hasta la **Tabla 6F** del **Apéndice F**), una serie de compuestos que contribuyen al aporte de NT. Entre estos compuestos se encuentran: Cocamidopropil Betaína ( $C_{19}H_{38}N_2O_3$ ), Metilcloroisotiazolinona ( $S(C_2HCl)C(O)N(CH_3)$ ), Metilisotiazolinona ( $C_4H_5NOS$ ), Cloruro de Behentrimonio  $C_{25}H_{54}ClN$ , Bis-Aminopropil Dimeticona ( $C_6H_{17}N_3$ ), DMDM Hidantoína ( $C_7H_{12}N_2O_4$ ), Estearamidopropil Dimetilamina ( $C_{23}H_{48}N_2O$ ), Pantenol ( $C_9H_{19}NO_4$ ), Biotina ( $C_{10}H_{16}N_2O_3S$ ), Niacinamida ( $C_6H_6N_2O$ ) y EDTA tetrasódico ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ) Es relevante destacar, que todos estos compuestos, son de origen orgánico, por ende, contribuyen al aporte de nitrógeno orgánico en las AGC.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 89

Para las concentraciones de fósforo, se identificó el Monofluorofosfato de sodio en la crema dental (**Tabla 7F**) que se utiliza como fuente de flúor para fortalecer el esmalte dental y ayudar en la prevención de caries dentales, siendo este uno de los ingredientes presentes en las cremas dentales a base de fósforo (Comber et al., 2013).

En relación con los coeficientes de variación altos en cuanto al contenido de nutrientes (**Tabla 12**), es pertinente señalar que las AGC presentan deficiencia de nutrientes (Eriksson et al., 2009) dado que las fuentes de contribución de N y P en estas aguas son limitadas. Como se mencionó anteriormente, se identificaron dos fuentes de aporte de nutrientes en las AGC, por consiguiente, la alta variación observada en esta investigación puede estar asociada a estas dos actividades específicas que son variables en cuanto a su frecuencia y la cantidad de producto utilizado en el cepillado de dientes, estos aspectos pueden introducir una variabilidad adicional en los niveles de nutrientes.

El AGC del presente estudio exhibe una alta carga de contaminantes orgánicos en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> con valores de  $879.68 \pm 163.51$  mgO<sub>2</sub>/L y  $387.92 \pm 92.08$  mgO<sub>2</sub>/L, respectivamente. Kadewa et al. (2020) explican que la alta concentración de materia orgánica en AGC está relacionada con la presencia de alcoholes grasos utilizados como emolientes en productos de cuidado personal. Asimismo, en el Anexo F se puede evidenciar que más del 70% de los componentes en los productos de cuidado e higiene personal utilizados en la residencia de estudio, son sustancias de origen orgánico, como ácidos grasos, aceites minerales, vitaminas, siliconas, glicerina, entre otros. Los valores de DQO y DBO<sub>5</sub> en este estudio, se encuentran por encima de los determinados en India, EE. UU., Grecia, Alemania y España, pero se encuentran por debajo de los hallados en Turquía y Uganda. Finalmente, las concentraciones altas de materia

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 90

orgánica podrían atribuirse a la tendencia a un menor consumo de agua en los países de ingresos bajos y medios en comparación con los países de ingresos altos (Khanam & Patidar, 2022), lo que da como resultado AGC poco diluidas (I. N. Shaikh & Ahammed, 2020).

Con el fin de corroborar los valores de la DQO y verificar que no hubo ninguna interferencia durante su determinación, se llevaron a cabo posteriores análisis de Cloruros, ya que este puede ser causante de ruido en la lectura de la DQO con concentraciones por encima de los 2000 mgCl<sup>-</sup>/L (APHA-AWWA-WEF, 2017; Romero Rojas, 2001). La concentración de Cloruros en el AGC estudiada fue de  $6.30 \pm 1.58$ , por lo que se descartó interferencia alguna en el análisis de la DQO.

Dado que las concentraciones de DBO<sub>5</sub> y SST para ARD típicas son del mismo orden de magnitud (SST: 200 mg/L; DQO: 400 mgO<sub>2</sub>/L y DBO<sub>5</sub>: 200 mgO<sub>2</sub>/L) (Romero Rojas, 2001) y considerando que los sólidos suspendidos en el AR contienen cerca de un 75% de materia orgánica, mientras que los sólidos disueltos comprenden cerca de un 40% de materia orgánica (Metcalf et al., 2014; Romero Rojas, 2001). Con base en esta información, y al revisar las concentraciones de SST y materia orgánica en las AGC analizadas, se determinó que la materia orgánica representada por DQO (879.68 mgO<sub>2</sub>/L) y DBO<sub>5</sub> (387.92 mgO<sub>2</sub>/L) es alta en comparación con los valores de SST (214.58 mg/L). A partir de este hallazgo, se puede inferir que existe una alta concentración de materia orgánica disuelta en el AGC analizada.

Algunas sustancias orgánicas como el triclosán (presente en pastas de dientes, desodorantes y cosméticos), polietileno tereftalato – PET (utilizado en la producción de los envases de productos de aseo personal), escualenos (presente en cremas hidratantes, lociones y demás productos para el cuidado de la piel), benzofenonas (utilizadas como filtro UV) y el aluminio (presente en envases

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 91

de aerosoles y desodorantes) han sido identificados en las AGC, generando una preocupación ante la exposición humana de estos, por ser sustancias peligrosas que producen daños en el sistema endocrino de las personas (Eriksson et al., 2002; Palmquist & Hanæus, 2005; Thomaidi et al., 2015). Adicionalmente estos productos son eliminados durante la ducha liberando estos químicos en las AGC, contaminando las mismas y siendo difíciles de eliminar con los tratamientos convencionales empleados actualmente (Körgmaa et al., 2020).

En relación con la biodegradabilidad y el contenido de nutrientes presentes en el AGC estudiada, se determinó una relación DQO:DBO<sub>5</sub> de 2.27. Este valor sugiere que la fracción biodegradable en las AGC analizadas es alta, dado que una relación DQO/DBO<sub>5</sub> inferior a 2.50 indica una fácil biodegradabilidad de las aguas grises (F. Li, Gulyas, et al., 2009; I. N. Shaikh & Ahammed, 2022). Adicionalmente, se ha evaluado la idoneidad de un tratamiento biológico mediante el análisis de la relación DQO:N:P, donde los valores recomendados por Ziemba et al. (2018) y Katukiza et al. (2015) son 100:5:1 y 100:20:1, respectivamente. La indagación revela que la relación de materia orgánica y nutrientes en las AGC de este estudio se sitúan por debajo de las preconizadas (100:0.7:0.07). En conclusión, en lo que respecta a la relación DQO:DBO<sub>5</sub>, es viable pensar en incorporar un proceso biológico para su tratamiento. Sin embargo, surge un limitante, debido bajo contenido de nutrientes, como se refleja en la relación DQO:N:P. No obstante, es importante señalar que este bajo contenido de nutrientes, no implica la ausencia total de los mismos.

Finalmente, los resultados revelaron una variabilidad significativa en el contenido de materia orgánica a lo largo de las tres campañas de muestreo realizadas (**Figuras 9E y 10E del Apéndice E**). Notablemente, las concentraciones más elevadas de materia se identificaron en la

primera campaña, mientras que las concentraciones más bajas se evidenciaron en la segunda campaña. Estas fluctuaciones podrían estar vinculados a factores específicos relacionados con las actividades realizadas en las fuentes de producción de las AGC, tales como cambios en las prácticas de higiene personal y uso de productos destinados para estas actividades. Un análisis más detallado de estos aspectos específicos podría proporcionar perspectivas adicionales sobre las dinámicas subyacentes a las variaciones en la composición de AGC.

Con respecto a la carga microbiológica del AGC, es de esperarse la presencia de coliformes fecales y totales, debido a la limpieza anal hecha en las duchas (Ottoson & Axel Stenstrom, 2003) y el lavado de manos después de usar el inodoro (Blanky et al., 2015), lo que hace evidente la necesidad de incorporar de procesos de desinfección durante el tratamiento de las AG con fines de reutilización (Benami et al., 2013; O'Toole et al., 2012), de lo contrario coexiste el riesgo de propagación de enfermedades gastrointestinales asociadas a la reutilización de estas aguas (Vuppaladadiyam et al., 2019).

En relación con los coeficientes de variación altos (**Tabla 12**) asociados a la carga microbiológica de las AGC, O'Toole et al. (2012) afirman que esta variabilidad es esperada cuando se analizan las AGC en hogares individuales ya que se reduce el número de contribuyentes de estas aguas y tan solo la contribución microbiana de una sola persona puede marcar la diferencia.

Los resultados de la correlación de Spearman entre los parámetros de calidad medidos en las AGC se presentan en la **Tabla 14**. Se encontró una asociación significativa entre la turbiedad y la presencia de grasas y aceites ( $\rho = 0.67$ , valor  $p = 0.001$ ), que podría deberse principalmente a: i) el hecho de que ambos parámetros de calidad están relacionados con la presencia de partículas suspendidas en el agua; y ii) como se mencionó anteriormente, el uso de jabones sólidos aumenta

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 93

la turbiedad en el AGC, y se conoce que estos jabones se obtienen mediante la saponificación de grasas con hidróxido de sodio (Metcalf et al., 2014).

Seguidamente, se determinó una fuerte correlación positiva entre la turbiedad y la materia orgánica medida en términos de DQO ( $\rho = 0.63$ , valor  $p = 0.002$ ), esta asociación puede deberse a la presencia de materia orgánica en forma de partículas suspendidas en el AGC y esta materia en suspensión a su vez, contribuye a la turbiedad en el agua (Sawyer et al., 2001). Asimismo, se determinó un vínculo entre la presencia de grasas y aceites con el contenido de materia orgánica en el agua medido en función de DQO ( $\rho = 0.61$ , valor  $p = 0.003$ ) y DBO<sub>5</sub> ( $\rho = 0.60$ , valor  $p = 0.004$ ), lo que podría estar relacionado precisamente a que la materia orgánica biodegradable está compuesta principalmente por hidratos de carbono (aproximadamente entre un 25 – 50%) y grasas y aceites (aproximadamente un 10% de materia orgánica biodegradable), que para sus procesos de descomposición requieren hacer uso del oxígeno presente en el AGC (Metcalf et al., 2014). Finalmente, la correlación significativa entre la DQO y la DBO<sub>5</sub> es común, ya que ambos parámetros miden el requerimiento de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica presente en el agua (Sawyer et al., 2001).

En cuanto a las correlaciones entre otros equivalentes de calidad, como pH y grasas y aceites, CE y SST, se evidenciaron moderadas, no alcanzaron el umbral de 0.6 en el coeficiente de correlación de Spearman, significando relaciones más débiles entre estos.

**Tabla 14.***Matriz de correlación de Spearman que muestra la relación entre los contaminantes generados en la vivienda de estudio para el AGC*

	pH	CE	Turbiedad	NT	PT	Grasas	SST	DQO	DBO <sub>5</sub>
pH	1	0.3 valor p=0.186	-0.15 valor p=0.516	-0.1 valor p=0.680	-0.18 valor p=0.432	-0.28 valor p=0.215	0.19 valor p=0.417	-0.32 valor p=0.157	-0.28 valor p=0.223
CE		1	0.02 valor p=0.939	0.26 valor p=0.262	0.27 valor p=0.236	0.2 valor p=0.598	0.33 valor p=0.139	0.36 valor p=0.110	0.34 valor p=0.127
Turbiedad			1	0.08 valor p=0.720	-0.34 valor p=0.136	0.67* valor p=0.001	0.15 valor p=0.512	0.63* valor p=0.002	0.22 valor p=0.329
NT				1	0.25 valor p=0.280	0.3 valor p=0.187	0.2 valor p=0.389	0.33 valor p=0.148	0.19 valor p=0.414
PT					1	-0.42 valor p=0.060	-0.17 valor p=0.467	-0.07 valor p=0.758	-0.17 valor p=0.474
Grasas						1	0.26 valor p=0.246	0.61* valor p=0.003	0.6* valor p=0.004
SST							1	0.16 valor p=0.498	0.4 valor p=0.074
DQO								1	0.62* valor p=0.003
DBO <sub>5</sub>									1

*Nota: \*valor p < 0.05; \*\*valor p < 0.001*

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 95

### **5.5 Evaluación del desempeño del sedimentador + FLA y del sedimentador + MUF**

El análisis de los parámetros de calidad medidos en el AGC cruda y el AGC tratada mediante el tren de tratamiento del sedimentador más el FLA y el sedimentador más la MUF, se resumen en la **Tabla 15**. Adicionalmente en el **Apéndice E**, desde la **Figura 11E** hasta la **Figura 19E** se muestra la variación de cada parámetro de calidad en las diferentes etapas de tratamiento. Finalmente, también en el **Apéndice E**, desde la **Tabla 14E** hasta la **Tabla 22E** se muestra en detalle cada día de operación del tren de tratamiento tanto del FLA como de la MUF para cada parámetro analizado.

Considerando los valores promedio de pH en el afluente y el efluente en ambos trenes de tratamiento (sedimentador + FLA y sedimentador + MUF) se observa que no se producen cambios significativos. Esto puede estar relacionado con el hecho de que el enfoque principal de las tecnologías utilizadas en esta investigación (sedimentador, FLA y MUF) se encuentra en la eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica por medio de procesos físicos y/o biológicos propios de cada uno, en lugar de procesos químicos de ajuste de pH. Por lo tanto, no se agregan productos químicos durante el tratamiento que puedan influir en el pH de las AGC. Para los demás parámetros de calidad del AGC se presentaron cambios notables derivados de cada tren de tratamiento, los cuales se discuten a continuación.

**Tabla 15.***Características de las AGC en cada efluente del tren de tratamiento y porcentajes promedio de remoción*

Parámetro	Unidad	Afluente			Efluente sedimentador + FLA				Efluente sedimentador + UF			
		promedio	DE	CV	promedio	DE	CV	remociones	promedio	DE	CV	remociones
<b>pH</b>		7.54	0.07	1%	7.27	0.13	2%	-	7.70	0.06	1%	-
<b>CE</b>	μS/cm	184.28	5.20	3%	171.41	8.35	5%	-	180.18	4.62	3%	-
<b>Turbiedad</b>	NTU	342.30	79.15	23%	8.99	3.87	43%	97%	0.59	0.26	43%	99.99%
<b>NT</b>	mgN/L	6.48	1.38	21%	0.83	0.74	89%	87%	4.13	1.33	32%	36%
<b>DQO</b>	mgO <sub>2</sub> /L	888.44	192.70	22%	83.19	38.54	46%	91%	213.07	81.03	38%	76%
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mgO <sub>2</sub> /L	377.78	119.09	32%	33.71	18.64	55%	91%	91.21	36.22	40%	76%
<b>PT</b>	mgP/L	0.57	0.13	24%	0.10	0.05	49%	82%	0.51	0.12	24%	9%
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	218.11	65.72	30%	3.21	2.39	74%	99%	3.73	1.88	50%	98%
<b>SST</b>	mg/L	209.11	44.82	21%	6.04	4.03	67%	97%	2.39	1.89	79%	99%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 97

### ***5.5.1 Eficiencias del tren de tratamiento del sedimentador más el FLA***

En este estudio, tren de tratamiento del sedimentador más el FLA logró una remoción promedio de 97% tanto para la turbiedad como para los SST. Se lograron eliminaciones similares usando FLA en estudios previos: Friedler & Alfiya 2010) trataron las AGC provenientes de los lavamanos del edificio de la Facultad de Ciencias Civiles y Ambientales del Technion (Instituto Tecnológico de Israel) logrando porcentajes de eliminación del 92% y 94% para turbidez y SST, respectivamente; (I. Shaikh & Ahammed, 2021) trataron las AG (lavamanos, duchas y lavanderías) del albergue para niñas Madre Teresa Bhavan ubicado en el Instituto Nacional de Tecnología Sardar Vallabhbhai, Surat, India, obteniendo porcentajes de remoción del 98% para la turbiedad; Radin Mohamed et al. (2016) trataron las AGC provenientes de las abluciones en las mezquitas Parit Raja y Pintas Puding, ubicadas en la ciudad de Parit Raja, Malasia, obteniendo porcentaje de remoción del 85% para SST; finalmente, ShiGuang et al. (2021) trataron AGC de las duchas en un complejo de apartamentos para estudiantes en Facultad de Ingeniería Agrícola ZhongKai en Guangzhou, China, donde obtuvieron eliminaciones por encima del 87% para la turbiedad.

Ghaitidak & Yadav (2016) afirman que los mecanismos dominantes responsables de la eliminación tanto de la turbiedad como de los SST en un FLA pueden ser la filtración y adsorción dentro del medio granular. Adicionalmente, dado que la turbiedad es una medida indirecta de los SST, es posible concluir que la reducción de SST conduce a la reducción de la turbiedad (Ghaitidak & Yadav, 2016).

La remoción de grasas y aceites en el tren de tratamiento del sedimentador más el FLA fue del 99%, esto puede estar relacionado con el hecho de que en el FLA se mantuvo una columna de agua de 5 cm por encima del medio filtrante y dado que, la densidad de las grasas y aceites es

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 98

menor que la del agua, lo más probable es que estas hayan quedado estancadas sobre el medio filtrante y las paredes del FLA (Ghaitidak & Yadav, 2016). Finalmente, el sedimentador posiblemente pudo presentar una remoción parcial de grasas y aceites; sin embargo debido a limitaciones en el presupuesto, no se pudo llevar a cabo una evaluación específica de la concentración de grasas y aceites exclusivamente en el efluente del sedimentador en el presente estudio. Por lo tanto, si bien esta hipótesis no puede ser confirmada, tampoco puede ser refutada.

En cuanto a la remoción de nutrientes, el tren de tratamiento del sedimentador más el FLA logró remociones superiores al 80% tanto para NT como para PT. Entre los procesos presentes en el FLA, se destaca la adsorción y filtración que ocurren en el lecho de arena durante el paso del AGC. En estos procesos, las partículas en suspensión pueden ser adsorbidas o retenidas por los poros del lecho de arena. Estos procesos resultan especialmente efectivos en la remoción de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos que contienen nitrógeno y fósforo (Freitas et al., 2023; Hamisi et al., 2022; Maiyo et al., 2023).

En lo que respecta al nitrógeno, Verma et al. (2017) afirman que la eliminación del nitrógeno en el FLA se debe principalmente a que la comunidad microbiana dominante en este tipo de filtros, son precisamente los microorganismos nitrificantes. Asimismo, Nakhla & Farooq (2003) en su programa piloto, operaron durante dos años un FLA con las mismas condiciones de operación del presente estudio: i) tasa de filtración de 0.18 m/h; ii) profundidad de arena de 0.55 m y iii) tamaño de arena  $> 0.7$  mm. Estos autores demostraron que bajo estas condiciones, en el FLA se presentaban procesos simultáneos de nitrificación-desnitrificación, obteniendo de esta manera porcentajes de remoción del NT superiores al 50%. Es fundamental destacar que en el marco de esta investigación no se realizó la medición del oxígeno disuelto, ni se determinaron

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria. 99

condiciones aerobias o anaerobias, con el propósito de verificar la presencia de condiciones propicias para los procesos de nitrificación-desnitrificación en el FLA operado. Sin embargo, tampoco se puede descartar esta posibilidad, dado que, a pesar de que el FLA se considera un sistema de filtración, ello no excluye la existencia de una capa biológica que contribuya a la degradación tanto de materia orgánica como de nutrientes.

En lo que concierne a la eliminación del fósforo, autores como Arias et al. (2001) determinaron que la eliminación del fósforo en los FLA es consecuencia de las reacciones de precipitación química con Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Aluminio (Al) presentes en la arena. Aunque este fenómeno pudo haber ocurrido en el FLA del presente estudio, no se pudo demostrar, debido a que no se realizó un análisis específico del contenido de Ca, Fe y Al del material filtrante. Finalmente, la eliminación del P en el FLA del presente estudio pudo deberse a procesos de adsorción en el lecho filtrante (Hamisi et al., 2022). Se recomienda para estudios futuros, realizar un análisis más profundo en el contenido de Ca, Fe y Al del material filtrante y cómo la variación de estos iones y el pH en el agua a tratar, afectan los mecanismos de reducción del P en los FLA.

El tren de tratamiento del sedimentador más el FLA presentó una modesta reducción en la CE (sales disueltas en el agua de origen inorgánico). El hecho de que se hubiera presentado una remoción en el contenido de nutrientes, pero no se hubiera presentado reducción en la CE, se debe principalmente, como se mencionó en la sección de caracterización de las AGC, el contenido de nutrientes en estas aguas es aportado principalmente mediante los componentes de productos de cuidado e higiene personal, los cuales son de naturaleza orgánica y no influyen en la CE del agua.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.100

El tren de tratamiento del sedimentador más el FLA presentó remociones por encima del 90% para DQO y DBO<sub>5</sub>. Katukiza et al. (2014) en su estudio trataron AG provenientes de diez hogares representativos ubicados en el barrio marginal de Bwaise III, en la ciudad de Kampala, Uganda mediante un FLA, obteniendo remociones de DQO y DBO<sub>5</sub> del 70%; Friedler & Alfiya (2010) trataron las AGC provenientes de los lavamanos del edificio de la Facultad de Ciencias Civiles y Ambientales del Technion (Instituto Tecnológico de Israel) logrando porcentajes de remoción de 65% y 57% para DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente; Finalmente, I. N. Shaikh & Ahammed (2021) trataron las AG (lavamanos, duchas y lavanderías) del albergue para niñas Madre Teresa Bhavan ubicado en el Instituto Nacional de Tecnología Sardar Vallabhbai, Surat, India, obteniendo porcentajes de remoción del 88% y 76% para DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente.

La eliminación de materia orgánica en un FLA se realiza mediante la acción combinada de: i) procesos físicos como el filtrado y la adsorción, que eliminan principalmente la materia orgánica suspendida (Freitas et al., 2023; Maiyo et al., 2023) y ii) procesos biológicos que se llevan a cabo en la biocapa donde las comunidades de microorganismos que la componen degradan la materia orgánica a medida que el AGC pasa a través de ella (Ghaitidak & Yadav, 2015; Munavalli et al., 2022; I. N. Shaikh & Ahammed, 2022). Con base en esta premisa, se infiere que la eliminación de materia orgánica en el FLA en el contexto de este estudio se llevó a cabo predominantemente mediante procesos físicos como filtración y adsorción. No obstante, esta conclusión no implica la exclusión de la posibilidad de que también hayan ocurrido procesos biológicos en el FLA que contribuyeron a la degradación de la materia orgánica y los nutrientes.

En conclusión, un análisis de los coeficientes de variación correspondientes a los parámetros de calidad en el efluente del sedimentador más el FLA revela que mientras el pH y la

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.101

CE exhiben valores de variación relativamente bajos, los demás parámetros muestran un grado considerable de variabilidad, con coeficientes que superan el 40%. Se destaca que el contenido de SST, grasas y aceites y NT presentan las mayores fluctuaciones. De estos hallazgos se puede discernir que, el tren de tratamiento del sedimentador más el FLA utilizado en esta investigación carece de robustez al no mantener la consistencia en la calidad del efluente. En consecuencia, estos hallazgos muestran la necesidad de realizar en el futuro ajustes operativos que mejoren la eficiencia del FLA, como la instalación de piezómetros para monitorear la pérdida de carga y determinar la frecuencia óptima de operaciones de mantenimiento, así como la exploración de tecnologías alternativas.

### ***5.5.2 Eficiencias del tren de tratamiento del sedimentador más la MUF***

El tren de tratamiento del sedimentador más la MUF demostró que no puede reducir significativamente la CE. Esto se debe principalmente a que la UF no tiene la capacidad de eliminar los iones monovalentes (Ashfaq & Qiblawey, 2018), debido a que el tamaño de poro de la ultrafiltración se encuentra dentro del rango de 0.01 – 0.1  $\mu\text{m}$ , mientras que las sales monovalentes presentan un tamaño de poro entre 0.0001 – 0.001  $\mu\text{m}$ .

En el tren de tratamiento del sedimentador + MUF, se logró reducción en la turbiedad de 342.30 NTU en el afluente a 0.59 NTU en el permeado de la membrana, correspondiente a un porcentaje de remoción del 99.99%. Estos datos son consistentes con estudios anteriores, donde también han observado eliminaciones totales de la turbiedad: Lalley et al. (2023) trataron las AGC (lavamanos + duchas) del Centro de Entrenamiento de Fuerzas Conjuntas Camp Shelby al sur de Hattiesburg, Misisipi, EE. UU., donde obtuvieron remociones por encima del 98% para la turbiedad; Ward et al. (2015) trataron AGC sintética que ellos mismos formularon, obteniendo

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.102

remociones de turbiedad superiores al 99%; finalmente, F. Li, Gulyas, et al. (2009) trataron AG ( duchas, lavamanos, lavadoras, lavavajillas y fregaderos de cocina) provenientes de una urbanización ecológica ubicada en Flintenbreite, Lübeck, Alemania, logrando eficiencias de remoción por encima del 99% para la turbiedad.

El tren de tratamiento del sedimentador + MUF, alcanzó remociones del 76% de contaminantes orgánicos medidos en términos de DQO y DBO<sub>5</sub>, lo que puede deberse a la presencia de ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos (presentes en productos de higiene y cuidado personal) en las AGC. Estos compuestos hidrófobos generalmente se encuentran adheridos a otras partículas sólidas y pueden ser retenidos parcialmente por la MUF (Kamińska & Marszałek, 2020; F. Li, Gulyas, et al., 2009). Asimismo, la naturaleza porosa de la MUF disminuye la capacidad de eliminación de materia orgánica y nutrientes, por lo que es probable que permanezcan productos de cuidado personal en el permeado de la membrana (Guilbaud et al., 2010; Wu, 2019), por esta razón, es posible que las aguas tratadas por MUF no cumplan con los estándares requeridos para su reutilización.

Los SST pasaron del 209.11 mg/L en el afluente a 2.39 mg/L en el permeado de la MUF, logrando así una eliminación del 99%. Al realizar un análisis de los valores de turbiedad, SST y DQO tanto en el afluente como en el permeado de la MUF, se evidencia que, a pesar de lograrse una reducción prácticamente completa de la turbiedad y los SST, persiste un contenido residual de materia orgánica en el permeado de la membrana. Este remanente de materia orgánica en el permeado de la membrana constituye un indicador revelador del contenido de materia orgánica disuelta inherente al AGC analizada (Nghiem et al., 2006). Además, teniendo en cuenta los bajos porcentajes de remoción del 36% y 9% alcanzados para NT y PT, se refuerza aún más la conclusión

de que existe un contenido de materia orgánica que contribuye a la carga de nutrientes y se encuentra en forma disuelta en el AGC. Este resultado demuestra que la UF no es eficiente en cuanto a la remoción de nutrientes y materia orgánica de forma soluble, ya que estos permanecen en el agua permeada. Asimismo, la remoción eficiente de nutrientes demanda tecnologías de tratamiento que incluyan procesos biológicos, los cuales no son intrínsecamente parte de las membranas de ultrafiltración (Aslan & Cakici, 2007; Kamińska & Marszałek, 2020; Nakhla & Farooq, 2003).

Finalmente, al examinar los coeficientes de variación asociados a los parámetros de calidad en el efluente del tratamiento del sedimentador más la MUF, se observan valores estables para el pH y la CE, mientras que para los demás factores es evidente una variabilidad significativa (CV > 40%). Especialmente se destacan las pronunciadas variaciones en el contenido de grasas y aceites, así como de los SST. Al igual que el tren de tratamiento del sedimentador más el FLA, el sedimentador más la MUF no mantuvo la consistencia en la calidad del efluente. La alta variabilidad observada en el efluente de este tren de tratamiento podría estar asociada a problemas relacionados ensuciamiento de la membrana (Ceconet et al., 2019; Wu, 2019). Por lo que se recomienda para futuras investigaciones abordar la comprensión de los factores de operación que influyen en la calidad del efluente para proponer técnicas de mejoras en cuanto al rendimiento de esta tecnología.

### ***5.5.3 Comparación de los dos trenes de tratamiento (sedimentador + FLA vs sedimentador +MUF)***

En este estudio se realizó la comparación de los efluentes en los dos tratamientos evaluados (sedimentador + FLA y sedimentador + MUF) mediante la prueba t - pareada (o en su defecto la

no paramétrica, Wilcoxon). Los resultados de este análisis se ven reflejados en la **Tabla 16**. En un análisis en conjunto con los resultados de la **Tabla 15** se puede llegar a determinar cuál de los dos trenes de tratamientos es el más eficiente con respecto a la remoción de carga contaminante.

**Tabla 16.**

*Comparación de los efluentes en cada tren tratamiento (sedimentador + FLA vs sedimentador + MUF)*

<b>Parámetro</b>	<b>Prueba estadística aplicada</b>	<b>Valor p</b>
CE	Prueba t-pareada	0.01487*
Turbiedad	Prueba t-pareada	0.00023**
NT	Prueba t-pareada	0.06767
PT	Prueba t-pareada	0.000014**
Grasas y aceites	Prueba de rango con signo de Wilcoxon	0.23610
SST	Prueba de rango con signo de Wilcoxon	0.00891*
DQO	Prueba t-pareada	0.00855*
DBO <sub>5</sub>	Prueba t-pareada	0.00943*

\*valor  $p < 0.05$ ; \*\*valor  $p < 0.001$

En relación con la CE, se evidencian diferencias estadísticamente significativas entre los efluentes del tren de tratamiento de la MUF y el tren de tratamiento del FLA (valor  $p = 0.01487$ ). Aunque la reducción de CE en el sistema compuesto por el sedimentador y el FLA fue moderada, esta resultó ser superior en comparación con la disminución de CE observada en el sistema de tratamiento mediante MUF.

Con respecto a la turbiedad (valor  $p = 0.00023$ ) y la concentración de SST (valor  $p = 0.00891$ ), existen diferencias estadísticas significativas en los efluentes de los trenes de tratamiento

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.105

del FLA y la MUF. Siendo el tren de tratamiento del sedimentador + MUF la tecnología más eficiente para eliminar la turbiedad y los SST en el AGC (**Tabla 15**).

Para los nutrientes medidos en términos de PT (valor  $p = 0.000014$ ) se presentan diferencias estadísticamente significativas en el AGC tratada mediante el sedimentador + MUF y el sedimentador + FLA. Denotando de esta manera que el tren de tratamiento del FLA es más eficiente en la remoción de PT, en comparación con el tren de tratamiento de la MUF (**Tabla 15**). Con respecto a la materia orgánica representada por DQO (valor  $p = 0.00855$ ) y  $DBO_5$  (valor  $p = 0.00943$ ), se evidencia que existen diferencias estadísticamente significativas en los efluentes del sedimentador + FLA y sedimentador + MUF, siendo el tren de tratamiento del FLA más eficiente en la remoción de materia orgánica (**Tabla 15**).

Finalmente, para los parámetros de NT y grasas y aceites, no se encontraron diferencias significativas entre los efluentes de ambos trenes de tratamiento.

## **5.6 Propuesta de sistemas de tratamiento y reúso de AGC aplicable al contexto de estudio**

De acuerdo con el análisis de percepción social en la zona de estudio, se identificaron los principales usos para los cuales las personas están dispuestas a usar las AGC tratadas, siendo estos principalmente la descarga de inodoros, limpieza de pisos y riego de jardines (**Figura 11**). Además, se observó que la principal razón de rechazo para el reúso de AGC en la comunidad encuestada fue la preocupación por el posible riesgo para la salud que esto conlleva (**Figura 9**).

Las AGC estudiadas mostraron alta variabilidad respecto a su composición (especialmente contenido de nutrientes y materia orgánica). Lo que representa un desafío en la selección de tecnologías apropiadas para tratamiento (Atanasova et al., 2017). Estos sistemas de tratamiento deben asegurar ser constantes al producir efluentes de alta calidad, superando las variaciones en la

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.106

calidad del afluente (Wu, 2019). Asimismo, los sistemas de tratamiento descentralizados deben ser asequibles, requerir poca energía, compactos de manera que requieran poco espacio, fáciles de operar y mantener por personas que no sean técnicos y/o profesionales y asegurar efluentes de alta calidad (Prajapati et al., 2019; Rakesh et al., 2020).

Las características del AGC analizadas en esta investigación, en términos de su biodegradabilidad, sugieren que pueden ser fácilmente tratable mediante procesos de tratamiento biológico teniendo en cuenta el valor de la relación DQO:DBO<sub>5</sub> por 2.27 (F. Li, Gulyas, et al., 2009; I. N. Shaikh & Ahammed, 2022). Sin embargo presentan deficiencias en el contenido de nutrientes que se evidencia la relación DQO:TN:TP por valor de 100:0.7:0.07 (Katukiza et al., 2015; I. N. Shaikh, Mansoor Ahammed, et al., 2019; Ziemba et al., 2018).

Analizando las concentraciones microbiológicas de las AGC estudiadas, se vuelve necesario la incorporación de procesos de desinfección para su tratamiento. Friedler & Gilboa (2010) evaluaron la eficiencia de desinfección UV para tratar AGC en Israel. Allí incorporaron la desinfección UV como proceso complementario a un contactor biológico rotatorio (RBC) y el resultado fue un efluente de muy alta calidad que pudo ser reutilizado en la descarga de inodoros sin ningún tipo de restricción. Asimismo, Kamińska & Marszałek (2020) evaluaron la eficiencia de un RBC para el tratamiento de las AG (duchas, lavaplatos y lavadora) de un hogar familiar en Silesia, Polonia, obteniendo porcentajes de remoción 92% y 99% para DQO y DBO<sub>5</sub>, respectivamente. Boyjoo et al. (2013) recomiendan que para el tratamiento y reúso de las AG, se complemente la tecnología de RBC precedida por procesos como la filtración gruesa, y seguida por procesos de sedimentación/filtración y finalizar con desinfección (cloración o UV) de manera que se logre la eliminación de materia orgánica, sólidos y microorganismos.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.107

En Colombia, aún no existe una normativa que regule la reutilización de AG específicamente, se cuenta con la Resolución 1256 de 2021 (Minambiente, 2021), que reglamente el reúso de las AR en general, aquí señala que el AR tratada puede ser destinada para uso agrícola (ej., irrigación de cultivos) e industrial (ej., generación de energía, minería e hidrocarburos). A nivel de América Latina, Chile es el único país que cuenta con un reglamento establecido donde se disponen las condiciones sanitarias básicas para la reutilización de las AG (Ministerio de Salud, 2018). En este reglamento, se establece que las AG tratadas pueden ser destinadas para usos urbanos (ej., descarga de inodoros y riego de jardines privados), riego de áreas recreativas y de servicios (ej., riego de áreas verdes públicas), e industriales (ej., uso en torres de refrigeración y en condensadores evaporativos).

Teniendo en cuenta la normativa vigente mencionada anteriormente, es preciso orientarse por la normativa dispuesta en Chile, especialmente, donde se analiza la calidad del AG tratada para usos urbanos, en este reglamento, mencionan específicamente tres parámetros de calidad que son de interés en el presente estudio, ya que fueron analizados en los efluentes de los trenes de tratamiento evaluados, estos parámetros son turbiedad, SST y DBO<sub>5</sub>. En la **Tabla 17**, se observa el límite máximo de cada uno de estos parámetros, que debe cumplir el AG tratada para su uso en aplicaciones urbanas. Asimismo, en la **Tabla 18**, se realiza una comparación de los límites máximos permitidos por la normativa Chilena vs la calidad de los efluentes proporcionados en cada uno de los dos trenes de tratamiento evaluados en este proyecto.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.108

**Tabla 17.**

*Parámetros de calidad para usos urbanos*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo</b>
Turbiedad	NTU	5
SST	mg/L	10
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	10
CF	UFC/100 mL	10

*Fuente:* Proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises. Ministerio de Salud, Chile.

**Tabla 18.**

*Límites máximos permitidos por la normativa Chilena vs la calidad de los efluentes*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo</b>	<b>Efluente Sed + FLA</b>	<b>Cumplió el Sed + FLA</b>	<b>Efluente el Sed + MUF</b>	<b>Cumplió el Sed + MUF</b>
Turbiedad	NTU	5	8.99	No	0.59	Si
SST	mg/L	10	6.04	Si	2.39	Si
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	10	33.71	No	91.21	No
CF	UFC/100 mL	10	-	-	-	-

*Fuente:* Proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises. Ministerio de Salud, Chile.

Con base en la **Tabla 18**, la calidad en el efluente del tren de tratamiento del sedimentador + FLA cumple para el parámetro de SST, pero no cumple con los valores de turbiedad y DBO<sub>5</sub>. Adicionalmente, en lo que respecta al tren de tratamiento del sedimentador + MUF, su efluente cumple con los parámetros de turbiedad y SST, pero no cumple con los valores permitidos de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.109

DBO<sub>5</sub>. Ambos tratamientos presentan falencias con respecto a la eliminación prevista de materia orgánica medida en términos de DBO<sub>5</sub> y su concentración supera el límite máximo para su reutilización. Esta situación podría estar relacionado con la carga microbiológica considerablemente elevada detectada en el AGC analizada, la cual no fue medida en los efluentes de cada uno de los tratamientos, debido las limitaciones y alcances en el presente estudio.

En la vivienda de estudio, el consumo de agua destinado a la descarga de inodoros representa aproximadamente el 10% del consumo total de agua potable. Se estima que se utilizan en promedio 15.03 L/per\*día de agua potable para este fin. Asimismo, la producción de AGC en esta vivienda representa alrededor del 21% del consumo total de agua potable, con un promedio de producción de 33.83 L/per\*día. Considerando los volúmenes de producción de AGC y el requerimiento de agua para descarga de inodoros, la implementación de un sistema de tratamiento y reúso donde el AGC tratada sea destinada a la descarga de inodoros, se visualiza como una alternativa prometedora, ya que el volumen producido de AGC abastece la demanda de descarga de inodoros. Finalmente, se podría reducir hasta un 10% el consumo total de agua potable, lo que equivaldría a una disminución de aproximadamente 15.03 L/per\*día. Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas con anterioridad a lo largo de esta sección, se proponen dos sistemas de tratamiento y reúso de AGC (**Figura 18**).

El primer sistema propuesto, se fundamenta en la recolección de las AGC que son generadas en la vivienda y captación de estas en un tanque homogeneizador, del tanque homogeneizador, las AGC se distribuyen a un sistema de tratamiento con el fin de remover la carga contaminante y que la calidad del AGC tratada cumpla con los estándares establecidos para aplicaciones urbanas, tales como descarga de inodoros y riego de jardines. Este sistema de

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.110

tratamiento consta de procesos secuenciales, iniciando con una etapa de sedimentación, posteriormente se propone la implementación de un FLA, seguido por una MUF, la fase inclusiva del sistema de tratamiento involucra un proceso de desinfección con el objetivo de asegurar la inocuidad microbiológica del efluente. Finalmente, estas AGC tratadas ingresan a un tanque de almacenamiento donde son distribuidas a los puntos de reúso (descarga de inodoros y riego de jardines).

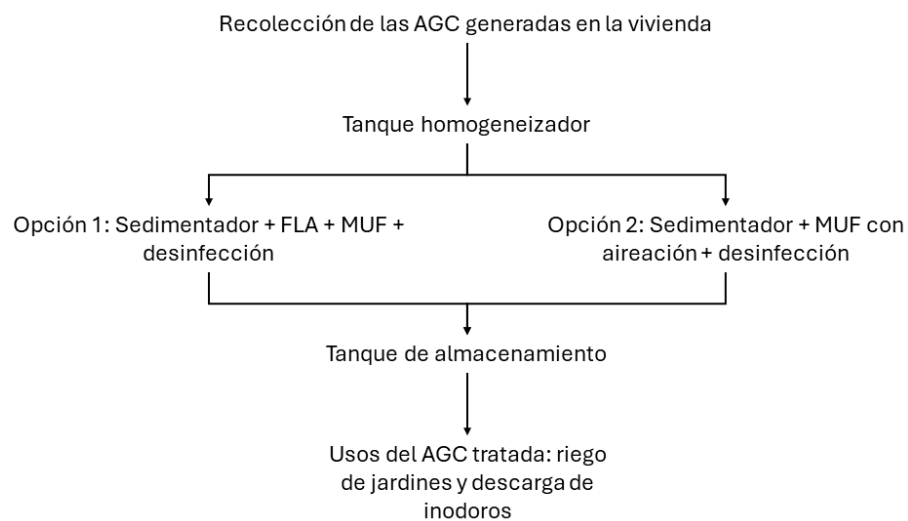
El segundo sistema propuesto, se basa en la recolección de las AGC que son producidas en el hogar, y captación de estas en un tanque homogeneizador, del tanque homogeneizador, las AGC se distribuyen hacia un sistema de tratamiento con el fin de asegurar que la calidad del efluente del tratado cumpla con los estándares establecidos para aplicaciones urbanas, tales como descarga de inodoros y riego de jardines. Este sistema de tratamiento consta de una serie de procesos secuenciales, comenzando con una etapa de sedimentación seguida por una MUF donde se implementa la aireación en el tanque de la MUF para garantizar un suministro continuo de oxígeno, promoviendo así la actividad metabólica de los microorganismos y mejorando la eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos y nutrientes. Finalmente, se lleva a cabo una etapa de desinfección antes de que las AGC tratadas sean almacenadas en un tanque de almacenamiento y distribuidas para su reutilización en los puntos designados (descarga de inodoros y riego de jardines).

La propuesta de realizar un suministro continuo de oxígeno al tanque de la MUF se basa en una serie de reuniones que se llevaron a cabo con el ingeniero de la empresa Martin Membrane Systems (empresa que donó la MUF utilizada en este proyecto). Durante estas reuniones, el ingeniero destacó la importancia de la aireación en el tanque de la MUF para garantizar un

suministro continuo de oxígeno, con el objetivo de mejorar la eficiencia de esta, relacionada a la remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes. Esta recomendación se fundamenta en la experiencia de la empresa en proyectos descentralizados, donde la adición de aire ha demostrado incrementar la eficiencia de la tecnología. En consonancia con este consejo, se ha integrado la aireación al sistema propuesto, con la convicción de optimizar su desempeño.

### Figura 18.

#### *Propuesta de sistemas de tratamiento y reúso de AGC*



## 6. Conclusiones

### 6.1 Objetivo específico 1

El consumo per cápita de agua para la zona residencial de estudio (barrio La Victoria) es de  $166.25 \pm 47.17$  L/per\*día. Este valor está influenciado significativamente por el número de habitantes que componen el hogar y tiende a incrementar con la frecuencia de prácticas de higiene y uso del agua (i.e., lavado de manos, cepillado de dientes, duchas y descarga de inodoros).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.112

Se encontró una disposición mayoritaria hacía la aceptación del reúso de AGC, siendo mayor en mujeres (75%), personas en edades entre 20 y 59 años (>70%), e individuos con niveles de formación técnico y profesional (>71%). Las principales razones de rechazo del reúso de AGC son riesgos a la salud (94%), requerimientos de espacio en la vivienda (56%) y producción de malos olores (53%).

Los usos más aceptados del AGC tratada incluyen actividades que implican el menor contacto posible con el agua, como descarga de inodoros (95%), limpieza de pisos (81%) y riego de jardines (67%).

Se resalta la disposición de las personas encuestadas a invertir en infraestructura para el reúso del AGC (73%), efectuar actividades de operación entre diaria y una vez por semana (77%) y actividades de mantenimiento entre semanal y mensual (64%).

## **6.2 Objetivo específico 2**

El consumo promedio de agua en la vivienda de estudio fue de  $160.73 \pm 67.12$  L/per\*día (CV = 42%), identificando que existen diferencias significativas en el consumo de agua a lo largo de la semana siendo los sábados los días de mayor consumo y los jueves los días de menor consumo. Este fenómeno está relacionado con el uso de la lavadora, siendo este el determinante que mayor afecta el consumo de agua potable en esta vivienda.

La producción media de AGC es de  $33.83 \pm 4.10$  L/per\*día y representa el 21% del consumo de agua potable en el hogar. La mayor producción de AGC se concentra en la franja horaria de 5:00 h a las 14:00 h, con un aporte de 94% proveniente de duchas y 6% de lavamanos. Para el caso de estudio abordado en esta investigación se determinó que no existen diferencias significativas respecto a la producción de AGC en los diferentes días de la semana.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.113

Se determinó que en promedio se estiman 15.03 L/per\*día, esto representa aproximadamente el 10% del del consumo de agua potable.

En general, la calidad de las AGC estudiadas, está altamente influenciada por los productos de cuidado e higiene personal que se utilizan en la vivienda de estudio.

Finalmente, se observa que el contenido de materia orgánica, nutrientes y carga microbiológica en las AGC presentan alta variabilidad, lo que representa un desafío en el tratamiento de estas aguas, ya que las tecnologías empleadas deben asegurar la consistencia en la calidad del efluente a lo largo de las variaciones de carga contaminante.

### **6.3 Objetivo específico 3**

En cuanto a la evaluación de los dos trenes de tratamiento de las AGC, se determinó que tanto el sedimentador + FLA, como el sedimentador + MUF son eficientes en la eliminación de turbiedad, SST y grasas y aceites contenidos en el agua, presentando porcentajes de remoción superiores al 97%. En lo que respecta a la remoción de nutrientes, se evidenció que el sedimentador + FLA es más eficiente en comparación con el sedimentador + MUF. Con relación a la eliminación de materia orgánica, igualmente se pudo determinar que el tren del tratamiento del FLA fue más eficiente en comparación con el tren de tratamiento de la MUF. Esto se debe principalmente a que en la biocapa del FLA preexisten comunidades de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica a medida que el agua fluye. Mientras que, la materia orgánica que subsiste en el permeado de la membrana se debe principalmente al contenido de materia orgánica disuelta en el AGC analizada y que es capaz de atravesar por los poros de esta.

## **7. Recomendaciones**

Es necesario que en futuras investigaciones se profundice en los aspectos que afectan la variabilidad de la calidad de las AGC, y de continuar monitoreando la calidad de los AGC (es decir, en uno y varios hogares) para establecer características típicas en contextos similares al de la presente investigación:

Indagar con más detalle qué otras actividades pueden influir en el consumo de agua potable y producción de AGC a nivel residencial.

Se sugiere que futuras investigaciones aborden sistemáticamente la relación entre la cantidad de productos de cuidado e higiene personal utilizados en las fuentes de producción de AGC y la carga contaminante en las aguas residuales, con el fin de esclarecer de manera más precisa la influencia de dichos factores sobre la calidad de las AGC.

Identificar y monitorear las actividades que pueden alterar la composición de las AGC, como el cepillado de dientes y la micción durante la ducha.

Se requiere que futuras investigaciones aborden un análisis más profundo para discernir la variabilidad microbiológica, considerando factores como el uso de productos antimicrobianos y/o productos farmacéuticos, para así proporcionar una comprensión más holística de la dinámica microbiológica en las AGC.

Se recomienda para futuras investigaciones, evaluar en más detalle factores operativos de las dos tecnologías evaluadas (FLA y MUF) como la pérdida de carga para estimar la periodicidad de sus mantenimientos.

Es necesario de investigaciones posteriores que evalúen en detalle las condiciones aerobias y anaerobias de las FLA, así como también la evaluación de parámetros de calidad pertinentes

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.115

como la DQO soluble y el oxígeno disuelto, con el fin de realizar estimaciones más precisas con respecto a la eficiencia de esta tecnología.

Se recomienda futuras investigaciones, que analicen el contenido de Ca, Fe y Al del material filtrante y cómo la variación de estos iones y el pH en el agua a tratar, afectan los mecanismos de reducción del P en los FLA.

Adicionalmente, es necesario evaluar las concentraciones microbiológicas en los efluentes de estos sistemas de tratamiento y estudiar la incorporación de procesos complementarios como la desinfección, para evaluar si se logra obtener efluentes que alcancen los estándares para la reutilización no restringida del agua.

Finalmente, de este presenta trabajo de investigación, surgen dos propuestas de sistemas de tratamiento y reúso de AGC que se puedan aplicar a una zona residencial. Sin embargo, es necesario que se realicen las respectivas evaluaciones de viabilidad técnica y económica, así como una evaluación del ciclo de vida para estos sistemas propuestos.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.116

### Referencias Bibliográficas

- Abdelrahman, R. M., Khamis, S. E., & Rizk, Z. E. (2020). Public attitude toward expanding the reuse of treated wastewater in the United Arab Emirates. *Environment, Development and Sustainability*, 22(8), 7887–7908. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00551-w>
- Abdel-Shafy, H. I., El-Khateeb, M. A., & Shehata, M. (2014). Greywater treatment using different designs of sand filters. *Desalination and Water Treatment*, 52(28–30), 5237–5242. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.813007>
- Akpan, V. E., Omole, D. O., & Bassey, D. E. (2020). Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries. *Heliyon*, 6(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05246>
- Al Hamed, F. H., Kandhan, K., Liu, Y., Ren, M., Jaleel, A., & Alyafei, M. A. M. (2023). Wastewater Irrigation: A Promising Way for Future Sustainable Agriculture and Food Security in the United Arab Emirates. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w15122284>
- Al-Gheethi, A. A. S., Noman, E. A., Radin Mohamed, R. M. S., Bala, J. D., & Mohd Kassim, A. H. (2019). Qualitative characterization of household greywater in developing countries: a comprehensive review. *Management of Greywater in Developing Countries: Alternative Practices, Treatment and Potential for Reuse and Recycling*, 1–31.
- Al-Khatib, I. A., Al Shami, A. A. H. U., Garcia, G. R., & Celik, I. (2022). Social Acceptance of Greywater Reuse in Rural Areas. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6603348>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.117

Álvarez-Trujillo, J. D., & Bonilla, B. D. (2020). Propuesta de opciones tecnológicas para el tratamiento y reúso de aguas grises provenientes de ducha y lavamanos en una vivienda unifamiliar del área metropolitana de Bucaramanga AMB [Recurso electrónico]. UIS.

Antonopoulou, G., Kirkou, A., & Stasinakis, A. S. (2013a). Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods. *Science of the Total Environment*, 454–455, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.045>

Antonopoulou, G., Kirkou, A., & Stasinakis, A. S. (2013b). Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods. *Science of the Total Environment*, 454–455, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.045>

APHA-AWWA-WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (E. W. Rice, R. B. Baird, & A. D. Eaton, Eds.; 23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Arbués, F., García-Valiñas, M. Á., & Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: A state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32(1), 81–102. [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(03)00005-2)

Arbués, F., Villanúa, I., & Barberán, R. (2010). Household size and residential water demand: An empirical approach. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 54(1), 61–80. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2009.00479.x>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.118

Arias, C. A., Bubba, M. Del, & Brix, H. (2001). PHOSPHORUS REMOVAL BY SANDS FOR USE AS MEDIA IN SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED REED BEDS. In *Wat. Res* (Vol. 35, Issue 5).

Ashfaq, M. Y., & Qiblawey, H. (2018). Laundry wastewater treatment using ultrafiltration under different operating conditions. *AIP Conference Proceedings*, 2022. <https://doi.org/10.1063/1.5060682>

Aslan, S., & Cakici, H. (2007). Biological denitrification of drinking water in a slow sand filter. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.012>

ASTM. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *ASTM C136-06*.

Atanasova, N., Dalmau, M., Comas, J., Poch, M., Rodriguez-Roda, I., & Buttiglieri, G. (2017). Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities. *Journal of Environmental Management*, 193, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.041>

Bakare, B. F., Mtsweni, S., & Rathilal, S. (2017). Characteristics of greywater from different sources within households in a community in Durban, South Africa. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(4), 520–528. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.092>

Benami, M., Gross, A., Herzberg, M., Orlofsky, E., Vonshak, A., & Gillor, O. (2013). Assessment of pathogenic bacteria in treated graywater and irrigated soils. *Science of the Total Environment*, 458, 298–302.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.119

- Blanky, M., Rodríguez-Martínez, S., Halpern, M., & Friedler, E. (2015). *Legionella pneumophila: From potable water to treated greywater; quantification and removal during treatment. Science of the Total Environment*, 533, 557–565.
- Boyjoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. In *Water Science and Technology* (Vol. 67, Issue 7, pp. 1403–1424). <https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>
- Buyukkamaci, N., & Alkan, H. S. (2013). Public acceptance potential for reuse applications in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 80(1), 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.001>
- Campisano, A., & Modica, C. (2010). Experimental investigation on water saving by the reuse of washbasin grey water for toilet flushing. *Urban Water Journal*, 7(1), 17–24. <https://doi.org/10.1080/15730621003596739>
- Cecconet, D., Callegari, A., Hlavínek, P., & Capodaglio, A. G. (2019). Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. In *Clean Technologies and Environmental Policy* (Vol. 21, Issue 4, pp. 745–762). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01679-z>
- CEPAL. (2019). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. [www.cepal.org/es/suscripciones](http://www.cepal.org/es/suscripciones)
- Comber, S., Gardner, M., Georges, K., Blackwood, D., & Gilmour, D. (2013). Domestic source of phosphorus to sewage treatment works. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(10), 1349–1358. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.747003>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.120

- Crouch, M. L., Jacobs, H. E., & Speight, V. L. (2021). Defining domestic water consumption based on personal water use activities. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(7), 1002–1011. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.056>
- Cualla, R. A. L. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Segunda Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- De Gisi, S., Casella, P., Notarnicola, M., & Farina, R. (2015). Grey water in buildings: a mini review of guidelines, technologies and case studies. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/10286608.2015.1124868>
- Delhiraja, K., & Philip, L. (2020a). Characterization of segregated greywater from Indian households: part A—physico-chemical and microbial parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08369-0>
- Delhiraja, K., & Philip, L. (2020b). Characterization of segregated greywater from Indian households—part B: emerging contaminants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08370-7>
- Dolnicar, S., Hurlimann, A., & Grün, B. (2011). What affects public acceptance of recycled and desalinated water? *Water Research*, 45(2), 933–943. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.030>
- Dolnicar, S., Saunders, C., & Dolniar, S. (2005). *Marketing Recycled Water: Review of Past Studies and Research Agenda 2005*. <https://ro.uow.edu.au/commpapers/69>
- Dolnicar, S., & Schäfer, A. I. (2009). Desalinated versus recycled water: Public perceptions and profiles of the accepters. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 888–900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.003>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.121

- Domínguez, I., Ward, S., Mendoza, J. G., & Rincón, C. I. (2017). End-user cost-benefit prioritization for selecting rainwater harvesting and greywater reuse in social housing. *Water*, 9(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w9070516>
- Dwumfour-Asare, B., Adantey, P., Biritwum Nyarko, K., & Appiah-Effah, E. (2017). Greywater characterization and handling practices among urban households in Ghana: The case of three communities in Kumasi Metropolis. *Water Science and Technology*, 76(4), 813–822. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.229>
- Ekeren, K. M., Hodgson, B. A., Sharvelle, S. E., & De Long, S. K. (2016). Investigation of pathogen disinfection and regrowth in a simple graywater recycling system for toilet flushing. *Desalination and Water Treatment*, 57(54), 26174–26186. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1159992>
- Eriksson, E., Andersen, H. R., Madsen, T. S., & Ledin, A. (2009). Greywater pollution variability and loadings. *Ecological Engineering*, 35(5), 661–669. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.015>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Etikan, I., Alkassim, R., & Abubakar, S. (2016). Comparison of snowball sampling and sequential sampling technique. *Biometrics and Biostatistics International Journal*, 3(1), 55.
- Fielding, K. S., Dolnicar, S., & Schultz, T. (2019). Public acceptance of recycled water. In *International Journal of Water Resources Development* (Vol. 35, Issue 4, pp. 551–586). Routledge. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1419125>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.122

Fielding, K. S., & Roiko, A. H. (2014). Providing information promotes greater public support for potable recycled water. *Water Research*, 61, 86–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.002>

Fowdar, H. S., Hatt, B. E., Breen, P., Cook, P. L. M., & Deletic, A. (2017). Designing living walls for greywater treatment. *Water Research*, 110, 218–232.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018>

Freitas, B. L. S., Terin, U. C., Fava, N. M. N., Maciel, P. M. F., Garcia, L. A. T., Medeiros, R. C., Oliveira, M., Fernandez-Ibañez, P., Byrne, J. A., & Sabogal-Paz, L. P. (2022). A critical overview of household slow sand filters for water treatment. In *Water Research* (Vol. 208). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117870>

Freitas, B. L. S., Terin, U. C., & Sabogal-Paz, L. P. (2023). Household slow sand filters in intermittent and continuous flow for a long-term surface water treatment: Efficiencies assessment and operational challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110090>

Friedler, E., & Alfiya, Y. (2010). Physicochemical treatment of office and public buildings greywater. *Water Science and Technology*, 62(10), 2357–2363.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2010.499>

Friedler, E., Chavez, D. F., Alfiya, Y., Gilboa, Y., & Gross, A. (2021). Impact of suspended solids and organic matter on chlorine and UV disinfection efficiency of greywater. *Water* (Switzerland), 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020214>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.123

Friedler, E., & Gilboa, Y. (2010). Performance of UV disinfection and the microbial quality of greywater effluent along a reuse system for toilet flushing. *Science of the Total Environment*, 408(9), 2109–2117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.051>

Galvis-Castaño, G., & Latorre-Montero, J. (1999). Filtración en múltiples etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. ISBN: 958-8030-20-X. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/255.9-99FI-17025.pdf>

Garcia-Cuerva, L., Berglund, E. Z., & Binder, A. R. (2016). Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for water reuse in the U.S. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.006>

García-García, J. A., Reding-Bernal, A., & López-Alvarenga, J. C. (2013). Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica. *Investigación En Educación Médica*, 2(8), 217–224.

Gardner, E. A. (2003). Some examples of water recycling in Australian urban environments: a step towards environmental sustainability. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(4), 21–31.

Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2013a). Characteristics and treatment of greywater - a review. *Environmental Science and Pollution Research* .

Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2013b). Characteristics and treatment of greywater-a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795–2809. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.124

- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2015). Effect of coagulant in greywater treatment for reuse: selection of optimal coagulation condition using Analytic Hierarchy Process. *Desalination and Water Treatment*, 55(4), 913–925. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.924036>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2016). Greywater treatment for reuse: Comparison of reuse options using analytic hierarchy process. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 6(1), 108–124. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.177>
- Ghunmi, L. A., Zeeman, G., Fayyad, M., & Van Lier, J. B. (2011). Grey water treatment systems: A review. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 41, Issue 7, pp. 657–698). <https://doi.org/10.1080/10643380903048443>
- Gu, Q., Chen, Y., Pody, R., Cheng, R., Zheng, X., & Zhang, Z. (2015). Public perception and acceptability toward reclaimed water in Tianjin. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.013>
- Guilbaud, J., Massé, A., Andrès, Y., Combe, F., & Jaouen, P. (2010). Laundry water recycling in ship by direct nanofiltration with tubular membranes. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 148–154.
- Hamisi, R., Renman, A., Renman, G., Wörman, A., & Thunvik, R. (2022). Long-term phosphorus sorption and leaching in sand filters for onsite treatment systems. *Science of the Total Environment*, 833, 155254. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155254>
- Jabornig, S. (2014). Overview and feasibility of advanced grey water treatment systems for single households. *Urban Water Journal*, 11(5), 361–369. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.783086>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.125

- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S., & Harrasi, A. Al. (2008). Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environmental Monitoring and Assessment*, 137(1–3), 315–327. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9767-2>
- Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, 50(2), 157–164. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0113>
- Jorgensen, B., Graymore, M., & O’Toole, K. (2009). Household water use behavior: An integrated model. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.009>
- Kadewa, W. W., Knops, G., Pidou, M., Jeffrey, P., Jefferson, B., & Le Corre, K. S. (2020a). What is the impact of personal care products selection on greywater characteristics and reuse? *Science of the Total Environment*, 749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141413>
- Kadewa, W. W., Knops, G., Pidou, M., Jeffrey, P., Jefferson, B., & Le Corre, K. S. (2020b). What is the impact of personal care products selection on greywater characteristics and reuse? *Science of the Total Environment*, 749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141413>
- Kamińska, G., & Marszałek, A. (2020). Advanced treatment of real grey water by SBR followed by ultrafiltration-performance and fouling behavior. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010154>
- Kant, S., & Jaber, F. H. (2020). Advanced filtration in greywater treatment: a modelling approach with water reuse perspectives. *Urban Water Journal*, 17(9), 795–812. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1828498>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.126

- Kant, S., Jaber, F. H., & Karthikeyan, R. (2018). Evaluation of a portable in-house greywater treatment system for potential water-reuse in urban areas. *Urban Water Journal*, 15(4), 309–315. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1457165>
- Katukiza, A. Y., Ronteltap, M., Niwagaba, C. B., Kansiime, F., & Lens, P. N. L. (2014). Grey water treatment in urban slums by a filtration system: Optimisation of the filtration medium. *Journal of Environmental Management*, 146, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.033>
- Katukiza, A. Y., Ronteltap, M., Niwagaba, C. B., Kansiime, F., & Lens, P. N. L. (2015). Grey water characterisation and pollutant loads in an urban slum. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(2), 423–436. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0451-5>
- Kaur, B., Shrestha, N. K., Ghimire, U., Paul, P. K., Rudra, R., Goel, P., & Daggupati, P. (2023). Future water security under climate change: a perspective of the Grand River Watershed. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5), 1433–1446. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.362>
- Khanam, K., & Patidar, S. K. (2022). Greywater characteristics in developed and developing countries. *Materials Today: Proceedings*, 1494–1499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.022>
- Kõrgmaa, V., Laht, M., Rebane, R., Lember, E., Pachel, K., Kriipsalu, M., Tenno, T., & Iital, A. (2020). Removal of hazardous substances in municipal wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 81(9), 2011–2022. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.264>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.127

Köster, S., Hadler, G., Opitz, L., & Thoms, A. (2023). Using Stormwater in a Sponge City as a New Wing of Urban Water Supply—A Case Study. *Water (Switzerland)*, 15(10).  
<https://doi.org/10.3390/w15101893>

Krozer, Y., Hophmayer-Tokich, S., van Meerendonk, H., Tijmsa, S., & Vos, E. (2010). Innovations in the water chain - experiences in The Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.11.013>

Lalley, J., Zetterholm, S. G., Waisner, S., Martinez-Guerra, E., Wamsley, M., Gurtowski, L., Wade, R., Pranger, S., & Griggs, C. (2023). Source separated graywater: Chemistry, unit operations, and criteria towards re-use. *Journal of Water Process Engineering*, 53.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103736>

Lazarova, V., Hills, S., & Birks, R. (2003). Using recycled water for non-potable, urban uses: a review with particular reference to toilet flushing. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(4), 69–77.

Leiva, E., Rodríguez, C., Sánchez, R., & Serrano, J. (2021). Light or dark greywater for water reuse? Economic assessment of on-site greywater treatment systems in rural areas. *Water (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/w13243637>

Li, F., Gulyas, H., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Treatment of household grey water with a UF membrane filtration system. *Desalination and Water Treatment*, 5(1–3), 275–282.  
<https://doi.org/10.5004/dwt.2009.550>

Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, The, 407, 3439–3449.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.128

- Li, J., Wu, B., Xu, M., Han, X., Xing, Y., Zhou, Y., Ran, M., & Zhou, Y. (2024). Nitrogen source affects non-aeration microalgal-bacterial biofilm growth progression and metabolic function during greywater treatment. *Bioresource Technology*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129940>
- Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. In *Desalination* (Vol. 260, Issues 1–3, pp. 1–8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035>
- López, A. (2015). Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR Río Frío, Bucaramanga Santander [Trabajo de grado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Mahmoudi, A., Mousavi, S. A., & Darvishi, P. (2021). Greywater as a sustainable source for development of green roofs: Characteristics, treatment technologies, reuse, case studies and future developments. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 295). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112991>
- Maiyo, J. K., Dasika, S., & Jafvert, C. T. (2023). Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 20, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021019>
- Mandal, D., Labhasetwar, P., Dhone, S., Dubey, A. S., Shinde, G., & Wate, S. (2011). Water conservation due to greywater treatment and reuse in urban setting with specific context to developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.001>
- March, J. G., Gual, M., & Orozco, F. (2004). Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). In *DESALINATION* (Vol. 164). ELSEVIER.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.129

MAVDT. (2010). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

MAVDT. (2018). Política Nacional de Edificaciones Sostenibles CONPES 3919.

Memon, F. A., Butler, D., Han, W., Liu, S., Makropoulos, C., Avery, L. M., & Mce, M. P. (2005). Economic assessment tool for greywater recycling systems. *Engineering Sustainability*, 158(3), 155–161. <https://doi.org/10.1680/ensu.2005.158.3.155>

Méndez, J. O. M. (2020). Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 49, 28–37.

Metcalf & Eddy, Abu-Orf, M., Bowden, G., Burton, F. L., Pfrang, W., Stensel, H. D., ... & AECOM (Firm). (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery. reuse* (Vol. 5). McGraw-Hill New York.

Minvivienda. (2017). Resolución 0330 por la cual se adopta el Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico - RAS. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

Morandi, C., Schreiner, G., Moosmann, P., & Steinmetz, H. (2021a). Elevated vertical-flow constructed wetlands for light greywater treatment. *Water (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182510>

Morandi, C., Schreiner, G., Moosmann, P., & Steinmetz, H. (2021b). Elevated vertical-flow constructed wetlands for light greywater treatment. *Water (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182510>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.130

- Mourad, K. A., Berndtsson, J. C., & Berndtsson, R. (2011). Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2447–2453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.004>
- Msaki, G. L., Njau, K. N., Treydte, A. C., & Lyimo, T. (2022). Social knowledge, attitudes, and perceptions on wastewater treatment, technologies, and reuse in Tanzania. *Journal of Water Reuse and Desalination*. <https://doi.org/10.2166/wrd.2022.096>
- Mu'azu, N. D., Abubakar, I. R., & Blaisi, N. I. (2020). Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia: Implications for water management policy. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137659>
- Munavalli, G. R., Sonavane, P. G., Koli, M. M., & Dhamangaokar, B. S. (2022). Field-scale decentralized domestic wastewater treatment system: Effect of dynamic loading conditions on the removal of organic carbon and nitrogen. *Journal of Environmental Management*, 302, 114014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114014>
- Najmi, M., Mehrnia, M. R., Tashauoei, H. R., Iranpoury, A., & Alivand, M. S. (2020). Removal of personal care products (PCPs) from greywater using a submerged membrane bioreactor (SMBR): The effect of hydraulic retention time. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104432>
- Nakhla, G., & Farooq, S. (2003). Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 96).
- Nautiyal, R., Uliana, S., Raj, I., Shah, B., Rathore, K., & Singh, A. (2017). Decentralized treatment of grey water by natural coagulants in the presence of coagulation aid. *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.11159/awspt17.158>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.131

- Nazari, B., & Keshavarz, M. (2023). Water population density: Global and regional analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(1–2), 431–445. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04473-6>
- Nghiem, L. D., Oschmann, N., & Schäfer, A. I. (2006). Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration. *Desalination*, 187(1–3), 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.087>
- Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I., & Koumaki, E. (2018a). Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management*, 216, 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>
- Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I., & Koumaki, E. (2018b). Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management*, 216, 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>
- Ogoshi, M., Suzuki, Y., & Asano, T. (2001). Water reuse in Japan. *Water Science and Technology*, 43(10), 17–23.
- Oh, K. S., Leong, J. Y. C., Poh, P. E., Chong, M. N., & Lau, E. Von. (2018). A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 171, pp. 17–29). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.267>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.132

- Oktor, K., & Çelik, D. (2019). Treatment of wash basin and bathroom greywater with *Chlorella variabilis* and reusability. *Journal of Water Process Engineering*, 31(December 2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100857>
- Olupot, P. W., Menya, E., Jjagwe, J., Wakatuntu, J., Kavuma, T., Wabwire, A., Kavuma, S., Mcmondo, S. O., Nabuuma, B., & Kalibbala, H. M. (2021). Development and appraisal of handwash-wastewater treatment system for water recycling as a resilient response to COVID-19. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5).  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106113>
- ONU. (2020, December 10). Objetivos y metas de desarrollo sostenible.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & deVries, N. K. (2018). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3909-8>
- Oteng-Peprah, M., de Vries, N. K., & Acheampong, M. A. (2018). Greywater characterization and generation rates in a peri urban municipality of a developing country. *Journal of Environmental Management*, 206, 498–506.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.068>
- O’Toole, J., Sinclair, M., Malawaraarachchi, M., Hamilton, A., Barker, S. F., & Leder, K. (2012). Microbial quality assessment of household greywater. *Water Research*, 46(13), 4301–4313. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.001>
- Ottoson, J., & Axel Stenström, T. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. In *Water Research* (Vol. 37).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.133

- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M. L., & Zaraza-Peña, J. M. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Oyebode, O. J., & Waterway, O. (2023). Characterization of Wastewater and Evaluation of Recycling Technologies Using Analytical Hierarchical Process for a University Community. *Nature Environment and Pollution Technology*, 22(1), 355–368. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.035>
- Palmarin, M. J., & Young, S. (2019). Comparison of the treatment performance of a hybrid and conventional membrane bioreactor for greywater reclamation. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.012>
- Palmquist, H., & Hanæus, J. (2005). Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary Swedish households. *Science of the Total Environment*, 348(1–3), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.052>
- Patil, Y. M., Patki, V. K., Jahagirdar, S., Karale, R., & Angathekar, V. (2020). Greywater treatment by vegetated vermifilter: A low cost material for rural sanitation in India. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6946–6950. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.395>
- Penn, R., Hadari, M., & Friedler, E. (2012). Evaluation of the effects of greywater reuse on domestic wastewater quality and quantity. *Urban Water Journal*, 9(3), 137–148. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.652132>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.134

- Penn, R., Schütze, M., & Friedler, E. (2013). Modelling the effects of on-site greywater reuse and low flush toilets on municipal sewer systems. *Journal of Environmental Management*, 114, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.044>
- Pinto, U., & Maheshwari, B. L. (2010). Reuse of greywater for irrigation around homes in Australia: Understanding community views, issues and practices. *Urban Water Journal*, 7(2), 141–153. <https://doi.org/10.1080/15730620903447639>
- Política Pública de Vivienda y Hábitat de Bucaramanga, 1 (2015). <https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/Documento-Politica-Publica-de-Vivienda-y-Habitat-de-Bucaramanga.pdf>
- Portman, M. E., Vdov, O., Schuetze, M., Gilboa, Y., & Friedler, E. (2022). Public perceptions and perspectives on alternative sources of water for reuse generated at the household level. *Water Reuse*, 12(1), 157–174. <https://doi.org/10.2166/wrd.2022.002>
- Prajapati, B., Jensen, M. B., Jørgensen, N. O. G., & Petersen, N. B. (2019). Grey water treatment in stacked multi-layer reactors with passive aeration and particle trapping. *Water Research*, 161, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.096>
- Prats-Rico, D. (2016). La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas. *Agua y Territorio*, 8, 10–21. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3292>
- Proyecto de Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias Básicas Para La Reutilización de Aguas Grises, 1 (2018). [https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/05/15\\_Reglamento-Aguas-Grises\\_Consulta-P%C3%BAblica.pdf](https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/05/15_Reglamento-Aguas-Grises_Consulta-P%C3%BAblica.pdf)
- R Core Team. (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing (R version 4.2.3 (2023-03-15 ucrt)). <https://www.R-project.org/>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.135

- Radin Mohamed, R. M. S., Adnan, M. N., Mohamed, M. A., & Mohd Kassim, A. H. (2016). Conventional Water Filter (Sand and Gravel) for Ablution Water Treatment, Reuse Potential, and Its Water Savings. *Journal of Sustainable Development*, 9(1), 35. <https://doi.org/10.5539/jsd.v9n1p35>
- Radingoana, M. P., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges. In *Physics and Chemistry of the Earth* (Vol. 116). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102853>
- Rakesh, S., Ramesh, Dr. P., Murugaragavan, Dr. R., Avudainayagam, Dr. S., & Karthikeyan, Dr. S. (2020). Characterization and treatment of grey water: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 34–40. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1a.8316>
- Ramon, G., Green, M., Semiat, R., & Dosoretz, C. (2004). Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. *Desalination*, 170(3), 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.02.100>
- Resolución 1256 de 2021, 1 (2021).
- Revitt, D. M., Eriksson, E., & Donner, E. (2011). The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. *Water Research*, 45(4), 1549–1560. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.027>
- Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486–499.
- Rico Amorós, A. M., Arahetes Hidalgo, A., & Morote Seguido, Á. F. (2016). Depuración y reutilización de aguas residuales regeneradas en las regiones de Murcia y Valencia. Libro

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.136

Homenaje al Profesor Alfredo Morales Gil, 1169–1202.

<https://doi.org/10.14198/librohomenajealfredomorales2016-52>

Rock, C., Solop, F. I., & Gerrity, D. (2012). Survey of statewide public perceptions regarding water reuse in Arizona. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 61(8), 506–517. <https://doi.org/10.2166/aqua.2012.070>

Romero Rojas, J. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales. In Bernardo-Servin-Massieu (Vol. 1, Issue 55, pp. 1–15). <http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residuales.pdf>

Ruiz, C. A., Salazar, D. M., & González, N. R. (2020). La prestación de los servicios de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Análisis y prospectiva. Universidad Nacional de Colombia-FCE-CID.

Sabogal-Paz, L. P., Campos, L. C., Bogush, A., & Canales, M. (2020). Household slow sand filters in intermittent and continuous flows to treat water containing low mineral ion concentrations and Bisphenol A. *Science of the Total Environment*, 702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135078>

Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2001). *Química para ingeniería ambiental*.

Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768.

Shaikh, I., & Ahammed, M. M. (2021). Coagulation Followed by Continuous Sand Filtration for Treatment of Graywater. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 25(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000640](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000640)

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.137

Shaikh, I., & Ahammed, M. M. (2022). Quantity and quality characteristics of greywater from an Indian household. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3).  
<https://doi.org/10.1007/s10661-022-09820-0>

Shaikh, I. N., & Ahammed, & M. M. (2021). Effect of operating mode on the performance of sand filters treating greywater. *Environmental Science and Pollution Research*, 38209–38223.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13413-8/Published>

Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M. (2020). Quantity and quality characteristics of greywater: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 261). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>

Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M. (2022). Granular media filtration for on-site treatment of greywater: A review. In *Water Science and Technology* (Vol. 86, Issue 5, pp. 992–1016). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.269>

Shaikh, I. N., Ahammed, M. M., & Krishnan, M. P. S. (2019). Graywater treatment and reuse. In *Sustainable water and wastewater processing* (pp. 19–54). Elsevier.

Shaikh, I. N., Mansoor Ahammed, M., & Sukanya Krishnan, M. P. (2019). Graywater treatment and reuse. In *Sustainable Water and Wastewater Processing*. Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816170-8.00002-8>

Shemer, H., Wald, S., & Semiat, R. (2023). Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. In *Membranes* (Vol. 13, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes13060612>

ShiGuang, C., QiuLi, C., & Yu, Z. (2021). Technical and economical viability of a graywater recycling system employing an integrated preliminary settlement and filtration process. *Water Supply*, 21(8), 4239–4253. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.176>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.138

Singh, V., Kaur, A., & Gupta, N. C. (2020). Comparative analysis of the filtration potential of light greywater through various media. *Malaysian Journal of Science*, 39(3), 159–172. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol39no3.12>

Soares Ascensão, É., Melo Marinangelo, F., Meschini Almeida, C. F., Kagan, N., & Dias, E. M. (2023). Applications of Smart Water Management Systems: A Literature Review. In *Water* (Switzerland) (Vol. 15, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w15193492>

Šostar-Turk, S., Petrinić, I., & Simonič, M. (2005). Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.11.002>

Superservicios, (2023). Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado. Vigencia 2022. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-los-Servicios-Publicos-Domiciliarios-de-Acueducto-y-Alcantarillado-Vigencia-2022.pdf>

Teh, X. Y., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Chong, M. N. (2015). Decentralized light greywater treatment using aerobic digestion and hydrogen peroxide disinfection for non-potable reuse. *Journal of Cleaner Production*, 99, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.015>

Thaher, R. A., Mahmoud, N., Al-Khatib, I. A., & Hung, Y. T. (2020). Reasons of acceptance and barriers of house onsite greywater treatment and reuse in Palestinian rural areas. *Water* (Switzerland), 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061679>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.139

- Thomaidi, V. S., Stasinakis, A. S., Borova, V. L., & Thomaidis, N. S. (2015). Is there a risk for the aquatic environment due to the existence of emerging organic contaminants in treated domestic wastewater? Greece as a case-study. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.10.023>
- Tortajada, C., González-Gómez, F., Biswas, A. K., & Buurman, J. (2019). Water demand management strategies for water-scarce cities: The case of Spain. *Sustainable Cities and Society*, 45, 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.044>
- Travis, M. J., Weisbrod, N., & Gross, A. (2008). Accumulation of oil and grease in soils irrigated with greywater and their potential role in soil water repellency. *Science of the Total Environment*, 394(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.004>
- Tyagi, V. K., Khan, A. A., Kazmi, A. A., Mehrotra, I., & Chopra, A. K. (2009). Slow sand filtration of UASB reactor effluent: A promising post treatment technique. *Desalination*, 249(2), 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.049>
- UN WATER. (2019). UN World Water Development Report 2019 | UN-Water. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2019>
- Verma, S., Daverey, A., & Sharma, A. (2017). Slow sand filtration for water and wastewater treatment—a review. In *Environmental Technology Reviews* (Vol. 6, Issue 1, pp. 47–58). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1278278>
- Villar-Navascués, R. A., & Pérez-Morales, A. (2018). Factors Affecting Domestic Water Consumption on the Spanish Mediterranean Coastline. *Professional Geographer*, 70(3), 513–525. <https://doi.org/10.1080/00330124.2017.1416302>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.140

- Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., & Zhao, M. (2019). A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 18, Issue 1, pp. 77–99). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9>
- Ward, L., Page, M., Jurevis, J., Nelson, A., Rivera, M., Hernandez, M., Chappell, M., & Dusenbury, J. (2015). Assessment of biologically active GAC and complementary technologies for gray water treatment. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 5(3), 239–249. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.088>
- Willis, R. M., Stewart, R. A., Giurco, D. P., Talebpour, M. R., & Mousavinejad, A. (2013). End use water consumption in households: Impact of socio-demographic factors and efficient devices. *Journal of Cleaner Production*, 60, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.006>
- Wu, B. (2019). Membrane-based technology in greywater reclamation: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 656, pp. 184–200). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.347>
- Xiao, C., Ye, J., Esteves, R. M., & Rong, C. (2016). Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 28(14), 3866–3878.
- Ziamba, C., Larivé, O., Reynaert, E., & Morgenroth, E. (2018). Chemical composition, nutrient-balancing and biological treatment of hand washing greywater. *Water Research*, 144, 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.005>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.141

Zipf, M. S., Pinheiro, I. G., & Conegero, M. G. (2016). Simplified greywater treatment systems: Slow filters of sand and slate waste followed by granular activated carbon. *Journal of Environmental Management*, 176, 119–127.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.035>

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.142

## Apéndices

### Apéndice A. Revisión de literatura con un eje central de las AGC

#### *Búsqueda y selección de literatura*

Se realizó una revisión de la literatura que abordó como eje principal las características cuantitativas y cualitativas de las AGC, los procesos para su tratamiento y la percepción social hacia el reúso de estas aguas. Para esto, se utilizaron las bases de datos académicas Science Direct®, Web of Science ® y Scopus®. Se identificaron palabras claves relacionadas a los objetivos específicos abordados en la presente investigación. Estas palabras clave identificadas se organizaron para definir dos ecuaciones de búsqueda utilizada, que se indica a continuación:

(Greywater OR "Grey water" OR "Light Greywater") AND (characteristics OR characterization) AND (treatment OR technologies) AND (cost OR maintenance OR operation) AND (domestic OR buildings OR houses OR apartments OR residential OR cities) AND (reuse) AND ("toilet flushing").

(Greywater OR Graywater OR "Grey water" OR "Gray water" OR "Light Greywater") AND (treatment OR technologies) AND (cost OR maintenance OR operation) AND (domestic OR buildings OR houses OR apartments OR residential OR cities) AND (handwash OR shower) AND (reuse OR "toilet flushing") AND (reuse) AND ("economic feasibility" OR "environmental feasibility" OR "social feasibility")

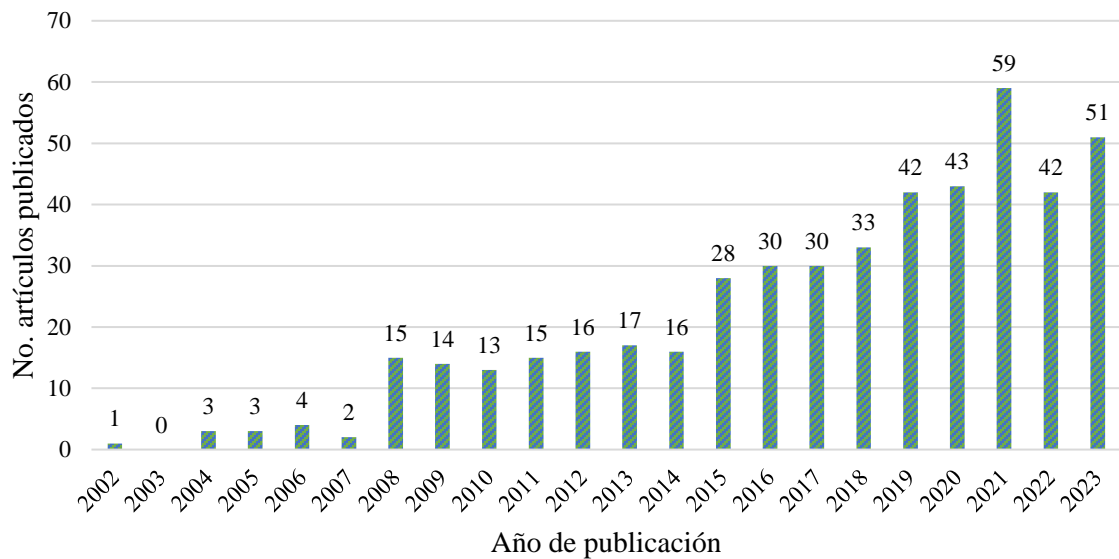
La búsqueda se centró en artículos de investigación científica en inglés publicados entre 2002 y 2023 en revistas científicas indexadas. A partir de ello, se encontraron 477 artículos.

### ***Tendencias en los avances de investigación***

En la **Figura 1A** se observa que el crecimiento del interés por parte de la comunidad científica en este ámbito de investigación es notable a partir del año 2008. De 2008 a 2021 el número de artículos publicados aumentó alrededor de 15 a 59, siendo el año 2021 el pico de producción científica en el tema.

### **Figura 1A.**

*Distribución del número de artículos encontrados por año; n = 477 artículos*



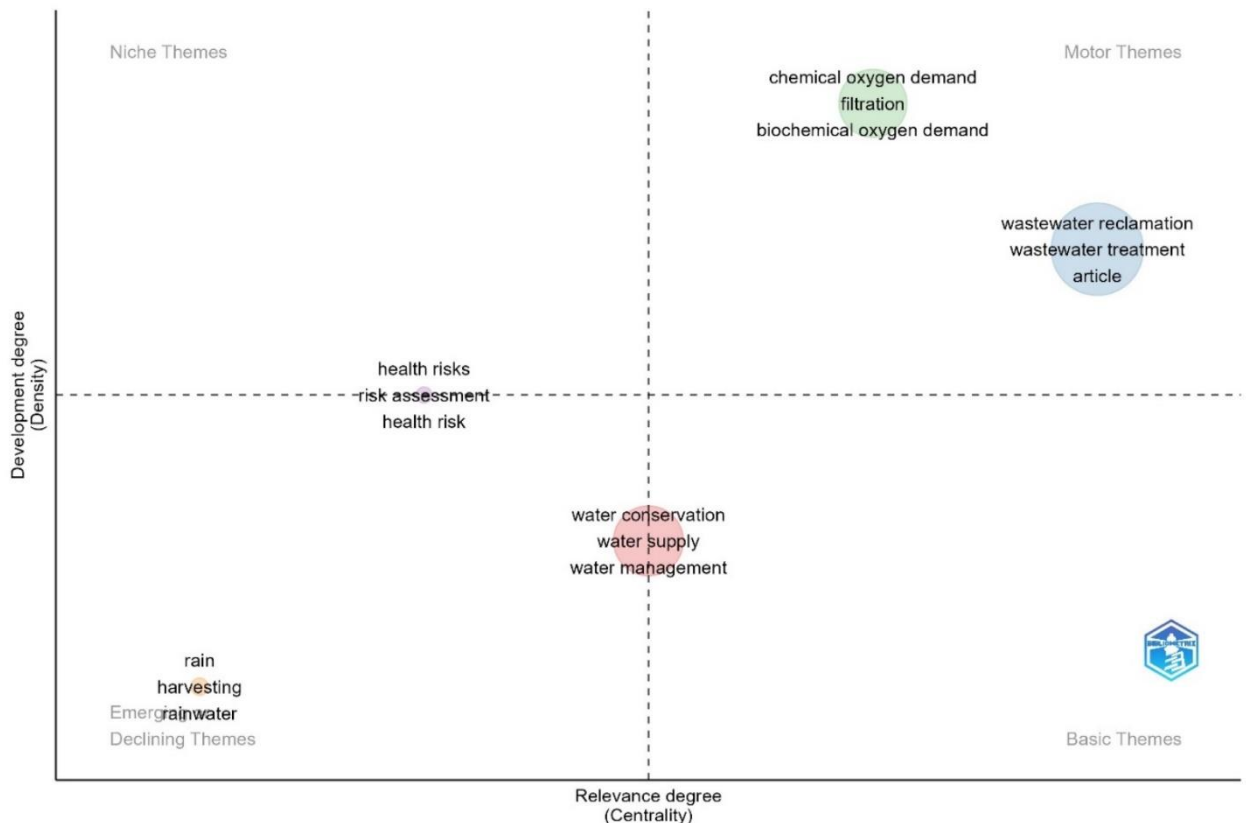
A partir del análisis del mapa temático (**Figura 2A**), se constata que aquellos temas que exhiben tanto un elevado grado de desarrollo en la investigación como una destacada relevancia en la comunidad científica están vinculados principalmente a: i) la caracterización de las aguas, donde se puede observar que los parámetros de calidad de mayor relevancia son la DQO y DBO<sub>5</sub>; ii) con el tratamiento y la recuperación de las aguas también son definidos como enfoques de

estudio con una alta producción científica y relevancia, siendo los procesos de filtración identificados como los métodos más estudiado para el tratamiento de estas aguas.

Adicionalmente, se evidencia un interés en el estudio de las AGC que va enfocado hacia temáticas relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico, específicamente en los ámbitos de administración, suministro y conservación del agua. Esta observación plantea una oportunidad para futuras investigaciones enfocadas en este ámbito, dado que, como se evidencia en el mapa temático, constituye un tema que relevancia intermedia para el cual, hasta la fecha, la producción literaria ha sido limitada.

### Figura 2A.

Mapa temático sobre los conceptos y/o enfoques vinculados al estudio de las AGC



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.145

### *Criterios de selección de los artículos*

Una vez obtenida la base de datos de 477 artículos, se procedió con un proceso de selección, con la finalidad de identificar los artículos relevantes, teniendo en cuenta los objetivos de investigación. Para definir los criterios de selección de los artículos, se tomó como base el estudio de revisión sistemática desarrollado en el grupo GPH en el año 2018 (Reyes-Torres et al., 2018). Fueron considerados los siguientes filtros:

**Título y resumen:** se excluyeron los artículos con título y/o resumen que no tenían relación con las AGC, caracterización y tratamiento. Fueron descartados 207 artículos.

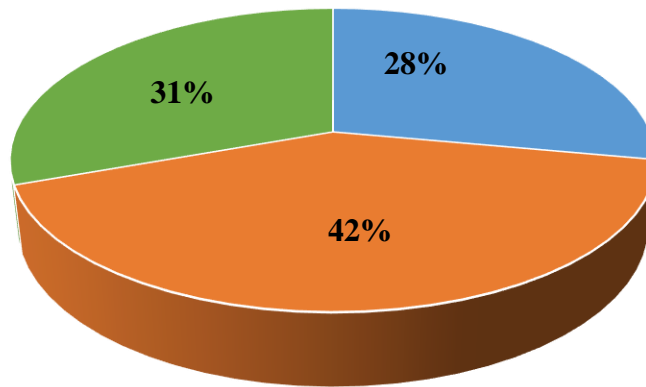
**Resumen:** Cada resumen se leyó nuevamente para seleccionar artículos que abordaran los ejes de interés correspondientes a las AGC. Fueron descartados 82 artículos.

**Contenido:** Se leyó el documento completo para identificar los que incluyen la caracterización de las AGC, estrategias innovadoras sobre el tratamiento de AGC y percepción social hacia el reúso de estas aguas. Fueron descartados 34 artículos.

En total fueron seleccionados 154 artículos, y estos a su vez se clasificaron relacionando la orientación de cada artículo con los tres objetivos específicos del presente estudio. En la **Figura 3A** se observa el porcentaje de artículos seleccionados que abordaron como enfoque metodológico: i) percepción social hacia el reúso de AGC, ii) características cuantitativas y cualitativas de las AGC y iii) sistemas de tratamiento y reúso de las AGC.

**Figura 3A.**

*Enfoque metodológico de los artículos seleccionados, según los objetivos específicos planteados en la presente investigación; n = 154 artículos*

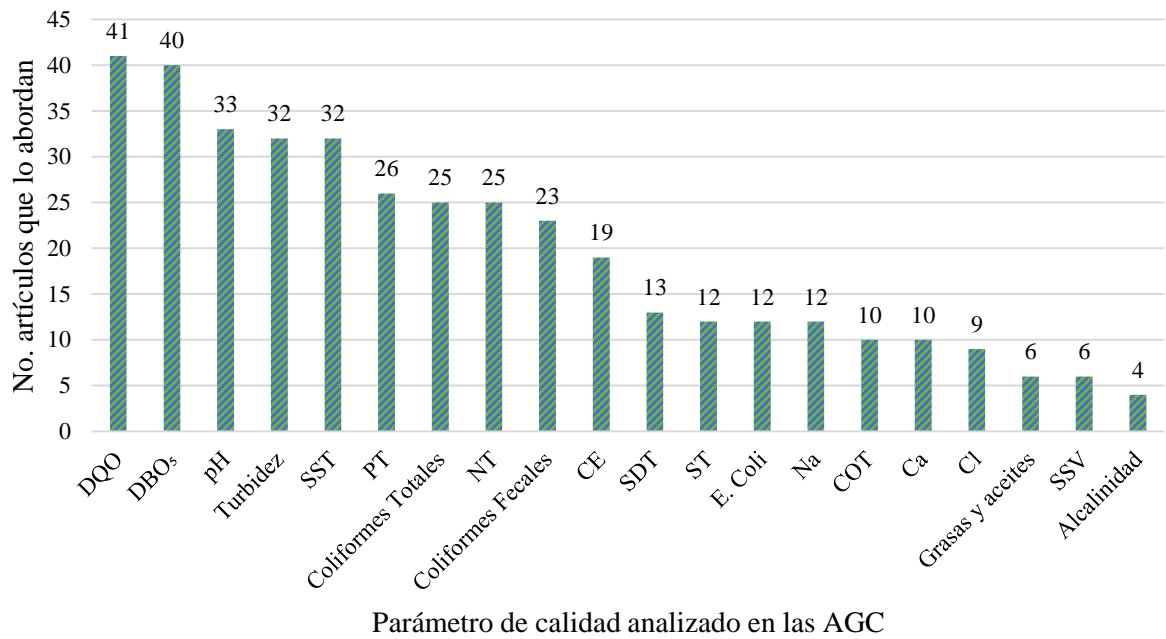


■ Percepción social ■ Caracterización ■ Tecnologías de tratamiento

La **Figura 4A** presenta un resumen con los principales parámetros de calidad que son analizados en las AGC. Esta gráfica fue determinante en el proceso de selección de parámetros que se tuvieron en cuenta para su análisis en el presente estudio. Se observa que un cuarto de los artículos seleccionados analizan la cantidad de materia orgánica presente en el AGC medida en términos de DQO y DBO<sub>5</sub>. Seguidamente, los parámetros fisicoquímicos mayormente estudiados son pH, Turbiedad, SST, PT, NT y conductividad eléctrica (CE).

**Figura 4A.**

*Parámetros de calidad más estudiados en las AGC, con base en los artículos seleccionados; n = 154 artículos*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.148

## **Apéndice B**

*Definiciones básicas que se brindaron a los encuestados sobre AGC y los diferentes tratamientos que se pueden aplicar in situ para su posible reutilización en usos no potables:*

Las aguas residuales (AR) son todo tipo de agua que ha sido utilizada y contaminada por diferentes actividades antrópicas, ya sea a nivel industrial, agrícola y ganadero y doméstico.

Las aguas residuales domésticas (ARD) se refiere a cualquier agua que ha sido utilizada en las diferentes actividades dentro del hogar (preparación de alimentos, limpieza y aseo general, lavado de ropa, etc.) y generalmente es canalizada a la red de alcantarillado para recibir su posterior tratamiento.

Las aguas grises (AG) son ARD producidas en los puntos de duchas, bañeras, lavamanos, lavaplatos, lavadero, lavadoras, excluyendo de esta manera, las aguas que son producidas en los puntos de inodoros y orinales.

Las aguas grises claras (AGC) son las aguas producidas exclusivamente en las duchas, bañeras y lavamanos.

El tratamiento de las AR hace referencia a la implementación de tecnologías especializadas con el fin de remover los contaminantes presentes y, de esta manera obtener agua con la calidad suficiente para ser reutilizada y/o vertida nuevamente al medio ambiente e incorporarse al ciclo del agua.

La reutilización del AGC en este cuestionario sugiere cualquier actividad (riego de jardines, descarga de inodoros, lavado de autos, entra otros) en donde se utilice AGC después de ser tratadas, con el propósito de reducir el consumo de agua potable y obtener un impacto positivo sobre el medio ambiente, especialmente, el recurso hídrico.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.149

*Cuestionario aplicado en la zona de estudio, con el fin de conocer los hábitos de consumo del agua potable y percepción social sobre la reutilización de aguas grises claras:*

#### Información general

1. Sexo del encuestado
2. Edad
3. Estado civil
4. Nivel educativo
5. Ocupación laboral
6. ¿Cuál es el consumo promedio de agua en la vivienda? (Revisar las últimas 3 facturas del servicio del agua): \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/mes
7. Aproximadamente, ¿Cuál es el área de su vivienda residencial?: \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

#### Hábitos de consumo de agua potable

1. Generalmente, ¿Con qué frecuencia realizan actividades de aseo en las duchas/bañeras y lavamanos?
2. Aproximadamente, ¿Cuántas veces al día, se lavan las manos en el hogar?
3. Aproximadamente, ¿Cuántas veces al día, los miembros del hogar se cepillan los dientes?
4. Generalmente, ¿Cuántas veces al día, los miembros del hogar se duchan?
5. Aproximadamente, ¿Cuántas veces al día descargan los sanitarios en el hogar?

#### Percepción social

1. ¿Estaría dispuesto(a) a reutilizar las AGC provenientes de su propia vivienda y considerando que estas pasarán por un tratamiento previo para reducir sus contaminantes?

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.150

Si

No

\*Nota: Si su respuesta a esta pregunta es NO favor diríjase a la pregunta número 3 y una vez respondida esta pregunta, se da por finalizada la encuesta

2. ¿En qué actividades estaría dispuesto(a) a utilizar las AGC tratadas?

Descarga de inodoros

Riego de jardines

Lavado de autos/motos

Lavado de ropa

Lavado de manos

Limpieza de pisos

Otras, ¿Cuáles?:

3. ¿Qué razón le impediría reutilizar las AGC tratadas?

Costos de implementación

Riesgo sanitario

Requiere mantenimiento

Requiere espacio

Producción de malos olores

Otra, ¿Cuál?:

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.151

4. ¿Cuánto dinero estaría dispuesto a invertir inicialmente para implementar un sistema de reutilización de AGC dentro de su vivienda?

Menos de 700 dólares

Entre 700 – 1400 dólares

No estaría dispuesto a pagar

5. ¿Con qué frecuencia estaría dispuesto a realizar actividades de operación del sistema de reutilización de AGC?

Diaria

Semanal

Quincenal

Mensual

Trimestral

Semestral

Anual

Nunca

6. ¿Con qué frecuencia estaría dispuesto a realizar actividades de mantenimiento al sistema de reutilización de AGC?

Diaria

Semanal

Quincenal

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.152

Mensual

Trimestral

Semestral

Anual

Nunca

7. Si tuviera las condiciones económicas y técnicas para instalar un sistema de tratamiento y reúso de AGC dentro de su vivienda, ¿Dónde lo ubicaría?

Patio de la vivienda

Parqueadero de la vivienda

Habitación auxiliar de la vivienda

Otra, ¿Cuál?:

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.153

**Figura 1B.**

*Formato proporcionado para las jornadas de aforos en la vivienda de estudio*

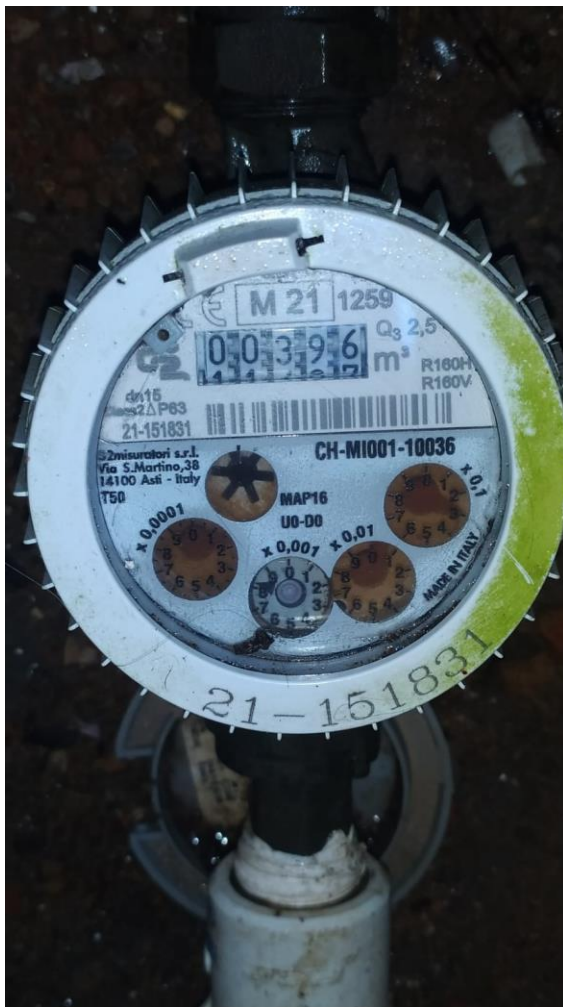
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL GRUPO DE INVESTIGACIÓN RECURSOS HÍDRICOS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL - GPH PROYECTO DE INVESTIGACIÓN "EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUAS GRISES CLARAS, APLICABLES A UN SECTOR RESIDENCIAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA, CASO DE ESTUDIO: BARRIO LA VICTORIA"										
Fecha:		Día:		Hora inicio:			Hora fin:		Estado del tiempo:	
INFORMACIÓN DE LA VIVIENDA										
Dirección:						Barrio:				
Área residencial:						Estrato socioeconómico:				
No. Duchas en la vivienda:			No. Lavamanos en la vivienda:			No. Sanitarios en la vivienda:				
USOS DEL AGUA POTABLE										
No. Personas que residen en la vivienda:										
No. Personas que permanecieron en la vivienda durante el día:										
No. Personas que permanecieron en la vivienda durante la noche:										
¿Recibieron visitas?. (Si la respuesta es SI, favor especificar el número de personas que visitó la vivienda y el tiempo que pernoctaron):										
¿Se hizo uso de la lavadora?. (Si la respuesta es SI, favor especificar el número de lavados):										
No. Total de descargas de los sanitarios:										
PRODUCCIÓN DE AGUAS GRISES EN LAS DIFERENTES FUENTES										
DUCHAS					LAVAMANOS					
USO	LECTURA INICIAL	LECTURA FINAL	CONSUMO (L)	OBSERVACIONES	USO	CONSUMO (ML)	CONSUMO (L)	OBSERVACIONES		
Total consumo (L):					Total consumo (L):					
Observaciones:										
Realizó:					Revisó:					
Nombre:					Nombre: Jessica Patricia Burgos Arias					
Cargo:					Cargo: Investigadora					
Firma:					Firma:					

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.154

## Apéndice C

### Figura 1C.

*Medidor de agua, utilizado para tomar la lectura del consumo de agua doméstico en la vivienda de estudio*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.155

**Figura 2C.**

*Medidor de flujo instalado para tomar la lectura de la producción de AGC en las duchas de la vivienda de estudio*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.156

**Figura 3C.**

*Medidores de flujos instalados en las duchas para la cuantificación de la producción de AGC*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.157

**Figura 4C.**

*Disposición de elementos para la recolección de muestras de AGC en las duchas*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.158

**Figura 5C.**

*Disposición de elementos para la recolección de muestras de AGC en los lavamanos*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.159

**Figura 6C.**

*Contenedor plástico de capacidad de 208 L, utilizado para la disposición de las AGC recolectadas de todas las fuentes en la vivienda de estudio*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.160

**Figura 7C.**

*Detalle de la alimentación del tanque sedimentador con el AGC a tratar, mediante una bomba sumergible (110 W). Detalle de la distribución manual de AGC desde el tanque sedimentador, hacia el FLA y MUF*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.161

**Figura 8C.**

*Detalle de la distribución manual de AGC desde el tanque sedimentador, hacia el FLA y MUF*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.162

**Figura 9C.**

*Prototipos construidos en el laboratorio para el tratamiento de las AGC. 1: tanque sedimentador; 2: FLA; y 3: MUF*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.163

**Figura 9C.**

*Recolección de las AGC en los efluentes del FLA y la MUF para su posterior análisis de calidad*



## Apéndice D

Cálculos desarrollados para determinar las condiciones de funcionamiento de los trenes de tratamiento a escala de laboratorio.

### *Bomba sumergible*

Teniendo en cuenta que la entrada de AGC al sistema de tratamiento se realizó con ayuda de una bomba sumergible de 110 V. En la **Figura 1D** se muestra la bomba utilizada para este fin. Asimismo, en la **Tabla 1D** se muestran todas las especificaciones técnicas de la bomba.

### **Figura 1D.**

*Bomba sumergible, para bombear el AGC desde el tanque donde se transportó, hasta el tanque sedimentador*



Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.165

**Tabla 1D.**

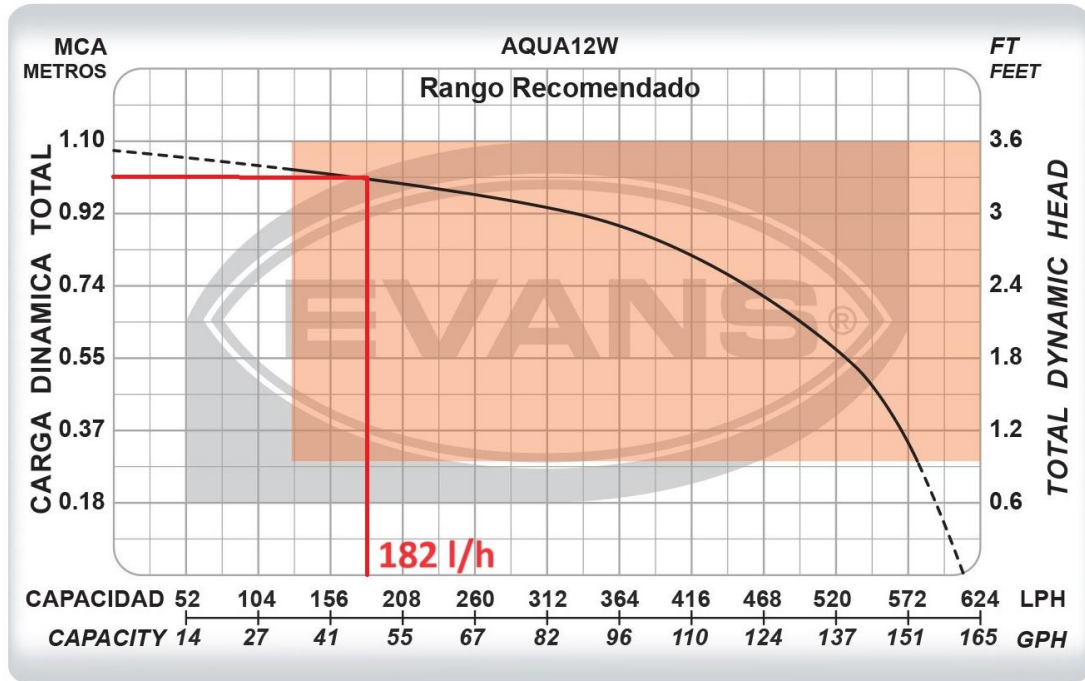
*Especificaciones técnicas de la bomba sumergible*

Tipo	Sumergible
Potencia	0.02 HP
Voltaje	110 V
Fase	1 F
Presión máxima	1.5 Psi
Diámetro de descarga	1/2 Pulgada
Caudal máximo	10.2 L/min
Altura máxima de elevación	1.08 m
Trabajo continuo	8 horas
Caudal de operación	0.182 m <sup>3</sup> /h

Teniendo en cuenta que las AGC se bombearon a una altura de 1 m. Con base en especificaciones de operación de la bomba y la **Figura 2D**, y se determina que el caudal de entrada del AGC al sistema de tratamiento es de 182 L/h (0.182 m<sup>3</sup>/h).

**Figura 2D.**

*Curva característica de la bomba*



### *Tanque sedimentador*

Es importante tener en cuenta que este sedimentador, ya se encontraba construido en el laboratorio, su diseño y especificaciones hidráulicas se encuentran en el trabajo de Álvarez & Bonilla (2020). Ellos definieron un TRH igual a 2.5 horas. Asimismo se aclara que tanto el sedimentador, como el FLA y la MUF se operaron en flujo discontinuo (tipo Batch).

Teniendo en cuenta que las dimensiones del sedimentador son las siguientes: Largo = 0.61 m; Alto = 0.42 m; y Ancho = 0.16 m. la relación ancho/largo del tanque es aproximadamente 0.2623, por consiguiente, el ancho del tanque es aproximadamente una cuarta parte de su longitud.

Finalmente, se tiene que el caudal de entrada es el caudal de la bomba sumergible que alimentó el sedimentador con el AGC. Este caudal es de 182 L/h o 0.182 m<sup>3</sup>/h.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.167

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.168

### ***Cálculos para el funcionamiento del FLA***

Altura del medio filtrante: capa de arena fina, se encuentra en la capa superior del filtro y sirve para retener las partículas suspendidas y los microorganismos presentes en el agua a tratar.

Las consideraciones realizadas en la Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (Minvivienda, 2017), establece que la profundidad del medio filtrante en filtros intermitentes de arena puede variar entre 45 – 90 cm y el diámetro efectivo de la arena debe encontrarse dentro del rango de 0.25 – 0.75 mm. Asimismo, Galvis-Castaño, G., & Latorre-Montero, J. (1999), recomiendan una profundidad del medio filtrante que se encuentre dentro del rango de 0.5 – 1 m. Teniendo en cuenta estas consideraciones, para el presente proyecto se asumió una profundidad del medio filtrante de 0.55 m y una tamaño efectivo de arena  $\leq 0.70$  mm.

$$\underline{\textit{Altura del medio filtrante = 0.55 m}}$$

Finalmente, siguiendo las guías establecidas por el Centro de tecnología asequible de agua y saneamiento (CAWST, por sus siglas en inglés) para la construcción de un FLA para el tratamiento de las ARD, se utilizó grava de separación con diámetro entre 0.7 – 6 mm y grava de drenaje con un tamaño entre 6 – 12 mm.

Altura del FLA: Se refiere a la altura total del FLA.

$$\textit{Altura FLA = Altura medio filtrante + Altura grava separación + Altura grava de drenaje}$$

$$\textit{Altura FLA = 0.55 m + 0.05 m + 0.05 m}$$

$$\underline{\textit{Altura FLA = 0.65 m}}$$

Sección transversal del FLA: Se construyó de forma cuadrada y cada uno de sus lados medía 29 cm.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.169

$$\text{Sección transversal FLA} = 0.29 \text{ m} * 0.29 \text{ m}$$

$$\underline{\text{Sección transversal FLA} = 0.0841 \text{ m}^2}$$

Volumen del FLA:

$$\text{Volumen FLA} = \text{Altura medio filtrante} * \text{Sección transversal}$$

$$\text{Volumen FLA} = 0.55 \text{ m} * 0.0841 \text{ m}^2$$

$$\underline{\text{Volumen FLA} = 0.046 \text{ m}^3}$$

Área superficial del FLA:

$$\text{Área superficial FLA} = (\text{Volumen FLA}) / (\text{Altura FLA})$$

$$\text{Área superficial FLA} = (0.046 \text{ m}^3) / (0.65 \text{ m})$$

$$\underline{\text{Área superficial FLA} = 0.071 \text{ m}^2}$$

Caudal del FLA: Para determinar el caudal, se necesita realizar una observación, fijar cuánto tiempo se tarda en filtrar cierta cantidad de agua. Para esta observación, se decidió medir el tiempo que tardaba el filtro en filtrar 18 L de agua. Finalmente se pudo determinar que el FLA, en promedio, tardaba 1.5 horas en filtrar los 18 L de agua.

$$\text{Caudal} = (18 \text{ L}) / (1.5 \text{ h})$$

$$\underline{\text{Caudal} = 12 \text{ L/h} = 0.012 \text{ m}^3/\text{h} = 0.288 \text{ m}^3/\text{día}}$$

\*Nota: Es importante aclarar que este caudal de operación del FLA se determinó teniendo en cuenta el volumen filtrado del AGC durante las etapas experimentales en el laboratorio. Durante las etapas experimentales todo el sistema de tratamiento funcionó tipo Batch (No funcionó de manera continua).

Tasa de filtración: La tasa de filtración, también conocida como tasa de carga hidráulica (HLR por sus siglas en inglés), es una medida de cuánto contacto se produce entre las partículas a

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.170

medida que fluye el agua (varía entre 0.008 a 0.38 m/h). Se determina dividiendo la tasa de flujo (caudal) sobre el área superficial del FLA.

$$\text{Tasa de filtración} = (\text{Caudal FLA}) / (\text{Área superficial FLA})$$

$$\text{Tasa de filtración} = (0.288 \text{ m}^3/\text{día}) / (0.071 \text{ m}^2)$$

$$\underline{\text{Tasa de filtración} = 4.31 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{día} = 0.17 \text{ m/h}}$$

Galvis-Castaño, G., & Latorre-Montero, J. (1999) recomiendan tasas de filtración lenta en arena dentro del rango de 0.1 – 0.3 m/h para el tratamiento del agua. Sin embargo, para el tratamiento específicamente de AG, se recomiendan tasas de filtración que varíen entre 0.008 – 0.38 m/h (Verma et al., 2017; Katukiza et al., 2014). Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se determina que la tasa de filtración a la que operó el FLA en las etapas experimentales se encuentra dentro de los rangos recomendados.

### ***Cálculos para el funcionamiento de la MUF***

La MUF se operó sumergida, manteniendo una columna de agua de 5 cm por encima de la cota superior de la MUF, por recomendación del fabricante. Sabiendo que la densidad del fluido es 1000 kg/m<sup>3</sup> y la aceleración de la gravedad es de 9.8 m/s<sup>2</sup>. Se procede a determinar la presión hidrostática:

$$\text{Presión hidrostática} = \rho * g * h$$

$$\text{Presión hidrostática} = (1000 \text{ Kg/m}^3) * (9.8 \text{ m/s}^2) * (0.05 \text{ m})$$

$$\underline{\text{Presión hidrostática} = 490 \text{ Pascales} = 4.9 \text{ mbar}}$$

Se contabilizó el tiempo que le demoraba la MUF en filtrar 5 L de agua. Este tiempo promedio fue aproximadamente de 20 min (0.33 h). Teniendo en cuenta que, el área de la membrana es de 0.45 m<sup>2</sup>, se procede a calcular el flujo de permeado:

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.171

$$\text{Flujo de permeado} = (\text{Volumen filtrado}) / (\text{Tiempo de filtrado} * \text{Área de la membrana})$$

$$\text{Flujo de permeado} = (5L) / (0.33 \text{ h} * 0.45 \text{ m}^2)$$

$$\underline{\text{Flujo de permeado} = 33.33 \text{ L/m}^2 * \text{h}}$$

## Apéndice E

Análisis estadísticos

### *Análisis estadístico correspondiente a los datos de consumo de agua potable*

Consumo promedio de agua en el hogar:

160.73 ± 67.12 L/per\*día (coeficiente de variación = 42%)

### **Tabla 1E.**

*Variación del consumo de agua potable durante días de la semana (L/per\*día)*

<b>Día</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Lunes	14	143.34	65.40	46%	80.05	317.10
Martes	14	148.96	69.71	47%	68.65	291.77
Miércoles	14	149.02	69.48	47%	67.60	323.62
Jueves	15	131.39	43.08	33%	80.04	199.56
Viernes	14	171.68	73.31	43%	80.04	298.13
Sábado	13	212.31	70.91	33%	133.10	385.80
Domingo	14	174.22	55.04	32%	59.14	250.55

*Nota:* n = número de días monitoreados; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.172

Con el objetivo de verificar si existen diferencias significativas del consumo de agua potable, entre los diferentes días de la semana, primero se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Anderson Darling (conjunto de datos tiene más de 50 observaciones):

```
Anderson-Darling normality test
```

```
data: df$cons_perc  
A = 1.2208, p-value = 0.003337
```

Según la prueba de Anderson-Darling, los datos no presentan distribución normal (valor  $p = 0.003337$ ).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)  
Df F value Pr(>F)  
group 6 0.5474 0.7708  
91
```

Según la prueba de Levene, si hay homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.7708$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica denominada Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test
```

```
data: df$cons_perc and df$day  
kruskal-wallis chi-squared = 13.55, df = 6, p-value = 0.03509
```

La prueba de Kruskal-Wallis me indica que si existen diferencias significativas en el consumo de agua potable entre los diferentes días de la semana (valor  $p = 0.03509$ )

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.173

Con el fin de identificar específicamente qué días de la semana son diferentes respecto al consumo de agua potable, se aplica una prueba post hoc llamada Test de Dunn:

```
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.

      Comparison      Z      P.unadj      P.adj
1   Friday - Monday  1.14981263  0.250221052  1.00000000
2   Friday - Saturday -1.49305339  0.135423211  1.00000000
3   Monday - Saturday -2.62137230  0.008757656  0.18391078
4   Friday - Sunday -0.50512000  0.613474555  1.00000000
5   Monday - Sunday -1.65493263  0.097938164  1.00000000
6   Saturday - Sunday  0.99737572  0.318582172  1.00000000
7   Friday - Thursday  1.52414029  0.127473669  1.00000000
8   Monday - Thursday  0.35467132  0.722835838  1.00000000
9   Saturday - Thursday 3.01230375  0.002592730  0.05444733
10  Sunday - Thursday  2.03789545  0.041560390  0.87276819
11  Friday - Tuesday  0.89060632  0.373140410  1.00000000
12  Monday - Tuesday -0.25920632  0.795476058  1.00000000
13  Saturday - Tuesday  2.36701139  0.017932381  0.37658000
14  Sunday - Tuesday  1.39572632  0.162796927  1.00000000
15  Thursday - Tuesday -0.61830884  0.536371778  1.00000000
16  Friday - wednesday  0.92383789  0.355570722  1.00000000
17  Monday - wednesday -0.22597474  0.821221069  1.00000000
18  Saturday - wednesday  2.39962177  0.016412020  0.34465243
19  Sunday - wednesday  1.42895789  0.153016336  1.00000000
20  Thursday - wednesday -0.58450915  0.558877808  1.00000000
21  Tuesday - wednesday  0.03323158  0.973489916  1.00000000
```

Se procede a relacionar si la frecuencia con que se descargan los inodoros en la vivienda de estudio tiene incidencia directa en el consumo de agua potable. Primero, se halla la estadística descriptiva entre las diferentes frecuencias de descarga de inodoros: En la vivienda de estudio, el agua consumida para la descarga de inodoros representa el 10% del consumo total de agua potable. Aproximadamente, se consumen  $53.39 \pm 11.33$  L/día (Coeficiente de variación del 21%) de agua potable para la descarga de inodoros en la vivienda de estudio.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas del consumo de agua potable, entre la frecuencia de descarga de inodoros, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Anderson Darling (conjunto de datos tiene más de 50 observaciones):

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.174

#### Anderson-Darling normality test

```
data: df_toiletflushing$cons_perc  
A = 1.2208, p-value = 0.003337
```

Según la prueba de Anderson-Darling, los datos no presentan distribución normal (valor  $p = 0.003337$ ).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza la prueba de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)  
  Df F value Pr(>F)  
group 2  5.4807 0.005589 **  
  95
```

Según la prueba de Levene, no hay homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.005589$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal ni tampoco presentan homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba no paramétrica denominada Kruskal-Wallis:

#### kruskal-wallis rank sum test

```
data: df_toiletflushing$cons_perc and df_toiletflushing$toiletflushing  
kruskal-wallis chi-squared = 12.331, df = 2, p-value = 0.002101
```

La prueba de Kruskal-Wallis me indica que si existen diferencias significativas del consumo de agua potable entre las diferentes frecuencias de descarga de inodoros (valor  $p = 0.002101$ ).

Con el fin de identificar específicamente las diferentes frecuencias de descarga de inodoros que difieren respecto al consumo de agua potable, se aplica una prueba post hoc llamada Test de Dunn:

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.175

```
Dunn (1964) Kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

	Comparison	Z	P. unadj	P. adj
1	Between 10 and 15 times - Between 5 and 10 times	0.07784082	0.9379546766	1.000000000
2	Between 10 and 15 times - More than 15 times	-3.45706813	0.0005460868	0.001638260
3	Between 5 and 10 times - More than 15 times	-3.22247441	0.0012708852	0.003812656

Finalmente, se relaciona el uso de la lavadora en la vivienda de estudio con en el consumo de agua potable. Se procede a verificar si existen diferencias significativas del consumo de agua potable y el uso de la lavadora, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Anderson Darling (conjunto de datos tiene más de 50 observaciones):

```
Anderson-Darling normality test
```

```
data: df_machinewashing$cons_perc
A = 1.2208, p-value = 0.003337
```

Según la prueba de Anderson-Darling, los datos no presentan distribución normal (valor  $p = 0.003337$ ).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza la prueba de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
> leveneTest(cons_perc ~ as.factor(machinewashing), center=median, data = df_machinewashing)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 1 3.4863 0.06493 .
 96
```

Según la prueba de Levene, si hay homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.06493$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica denominada Mann-Whitney U:

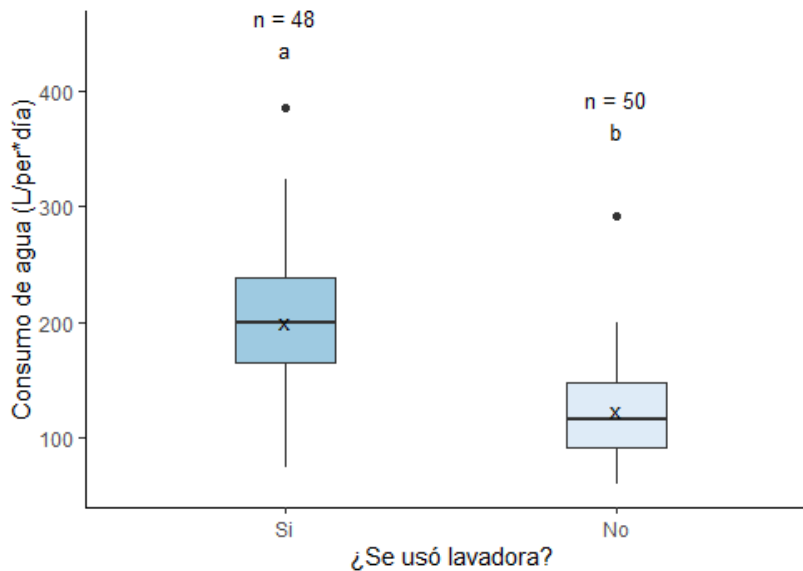
Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.176

```
wilcoxon rank sum test with continuity correction  
data: df_machinewashing$cons_perc by df_machinewashing$machinewashing  
W = 2037, p-value = 2.769e-09  
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

La prueba Mann-Whitney U indica que si existen diferencias significativas con el consumo de agua potable respecto al uso de la lavadora en el hogar (valor  $p = 2.769e-09$ ):

### Figura 1E.

*Variación del consumo de agua potable respecto al uso de la lavadora*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos, n es igual al tamaño del conjunto de datos. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según la prueba Mann-Whitney U. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

***Análisis estadístico correspondiente a la producción de AGC***

Producción promedio de AGC en la vivienda de estudio:

$33.83 \pm 4.10$  L/per\*día (coeficiente de variación = 12%). La producción de AGC representa el 25% del consumo de agua potable en el hogar, de esto el 94% de AGC es aportado por las duchas, mientras que solamente el 6% es aportado por los lavamanos.

**Tabla 2E.**

*Variación de la producción del AGC durante los días de la semana (L/per\*día)*

<b>Día</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Lunes	18	33.46	5.25	16%	23.79	41.61
Martes	18	33.74	3.87	11%	28.62	42.10
Miércoles	18	34.53	4.05	12%	27.94	41.14
Jueves	18	33.59	3.59	11%	26.22	41.46
Viernes	18	33.53	4.07	12%	26.55	41.08
Sábado	17	34.93	3.84	11%	27.23	42.66
Domingo	17	33.05	4.22	13%	26.47	42.00

*Nota:* n = número de días monitoreados; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas entre la producción de AGC y los diferentes días de la semana, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Anderson Darling (conjunto de datos tiene más de 50 observaciones):

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.178

#### Anderson-Darling normality test

```
data: df$LGW_perc  
A = 0.26635, p-value = 0.6845
```

Según la prueba de Anderson-Darling, los datos presentan distribución normal (valor  $p = 0.6845$ )

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos cumple con distribución normal):

#### Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: LGW_perc by day  
Bartlett's K-squared = 3.171, df = 6, p-value = 0.7871
```

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.7871$ )

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y presentan homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
day	6	44.9	7.484	0.433	0.856
Residuals	117	2023.6	17.296		

La prueba ANOVA me indica que no existen diferencias significativas entre los diferentes días de la semana con respecto a la producción de AGC (valor  $p = 0.856$ ).

### ***Análisis estadístico correspondiente a la caracterización de las AGC***

Se aplica estadística inferencial para evaluar si existen diferencias significativas durante las tres jornadas de muestreos en cada uno de los parámetros de calidad analizados. En caso de existir diferencias significativas, posteriormente se aplican pruebas post hoc para identificar en qué jornada se presenta la variabilidad.

Finalmente, se realizan las gráficas Boxplot para cada parámetro de calidad analizado donde se pueda observar la media de las tres jornadas de muestreos y donde se identifiquen con letras en qué jornadas se presentan variabilidad (en caso de que llegara a existir diferencias significativas respecto a las tres jornadas de muestreo):

#### **pH**

**Tabla 3E.**

*Valores del pH en las diferentes campañas de muestreo*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	7.47	0.16	2%	7.20	7.61
Segunda	8	7.46	0.14	2%	7.21	7.65
Tercera	11	7.54	0.06	1%	7.47	7.67

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas del pH con relación a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.180

```
shapiro-wilk normality test
```

```
data: df_pH$pH  
w = 0.89526, p-value = 0.01044
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor  $p = 0.01044$ )

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)  
  Df F value Pr(>F)  
group 2  2.4035 0.1118  
      24
```

Según la prueba de Levene, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.1118$ )

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

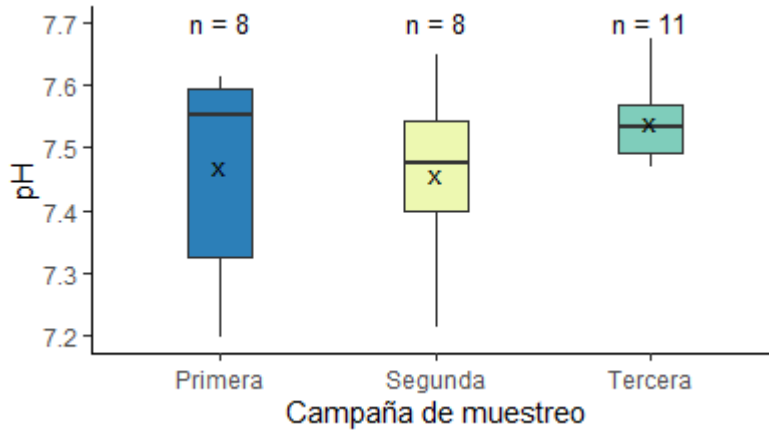
```
kruskal-wallis rank sum test
```

```
data: df_pH$pH and df_pH$jornada  
kruskal-wallis chi-squared = 1.4798, df = 2, p-value = 0.4772
```

La prueba Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de pH (valor  $p = 0.4772$ ):

**Figura 2E.**

*Variación del pH en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de dato; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.182

## CE

**Tabla 4E.**

*Valores de la CE en las diferentes campañas de muestreo*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	195.45	8.98	5%	180.27	207.00
Segunda	8	187.93	8.63	5%	178.10	205.67
Tercera	11	182.80	5.81	3%	173.57	193.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de CE y las tres jornadas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_EC$EC  
w = 0.93762, p-value = 0.1065
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos presentan distribución normal (valor p = 0.1065)

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos si cumple con distribución normal):

### Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: EC by jornada  
Bartlett's K-squared = 1.7862, df = 2, p-value = 0.4094
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.183

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor p = 0.4094)

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
jornada	2	740.9	370.4	6.241	0.00657	**
Residuals	24	1424.6	59.4			

La prueba ANOVA de una vía indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de CE (valor p = 0.00657). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Tukey, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
> tukey_EC <- TukeyHSD(anova_EC)
> print(tukey_EC)
  Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

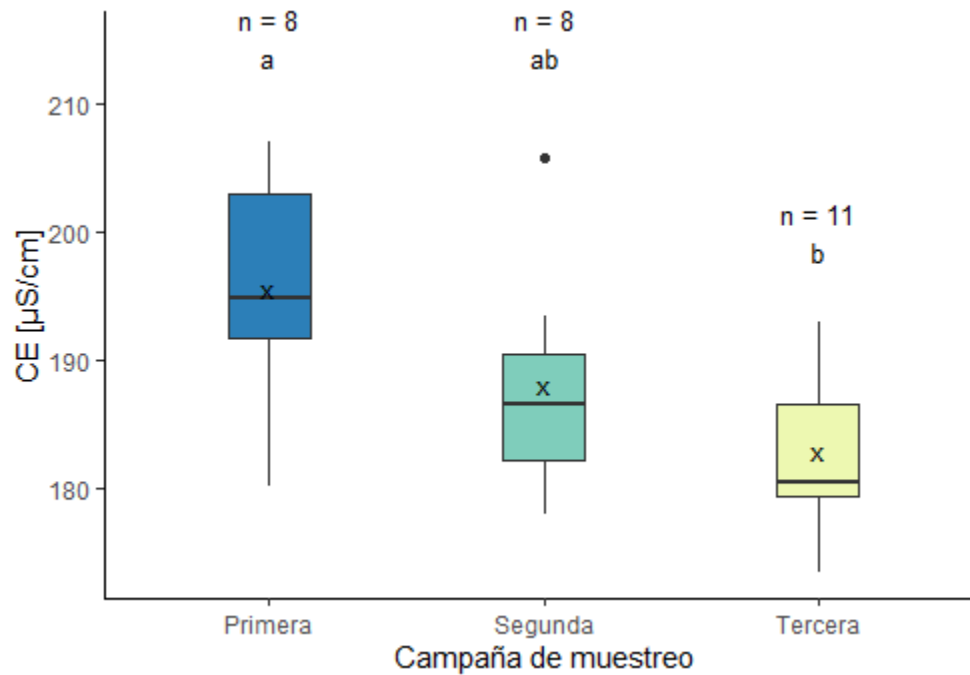
Fit: aov(formula = EC ~ jornada, data = df_EC)

$jornada
      diff      lwr      upr    p adj
second-first -7.516667 -17.13674  2.103408 0.1463371
third-first  -12.645833 -21.58596 -3.705702 0.0046665
third-second  -5.129167 -14.06930  3.810965 0.3405475

> cld_EC <- multcompLetters4(anova_EC, tukey_EC)
> print(cld_EC)
$jornada
 first second  third
  "a"   "ab"   "b"
```

**Figura 3E.**

*Variación de la CE en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según ANOVA. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.185

## Turbiedad

**Tabla 5E.**

*Variación de la Turbiedad en las diferentes campañas de muestreo (NTU)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	261.17	51.86	20%	208.00	373.33
Segunda	8	224.63	30.16	13%	172.00	258.67
Tercera	11	336.30	76.22	23%	211.67	470.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de la turbiedad y las tres jornadas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_Turbidity$Turbidity
w = 0.90454, p-value = 0.01702
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor p = 0.01702)

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2  2.1906 0.1337
  24
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.186

Según la prueba de Levene, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor p = 0.1337)

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test  
  
data: df_Turbidity$Turbidity and df_Turbidity$jornada  
kruskal-wallis chi-squared = 10.88, df = 2, p-value = 0.004339
```

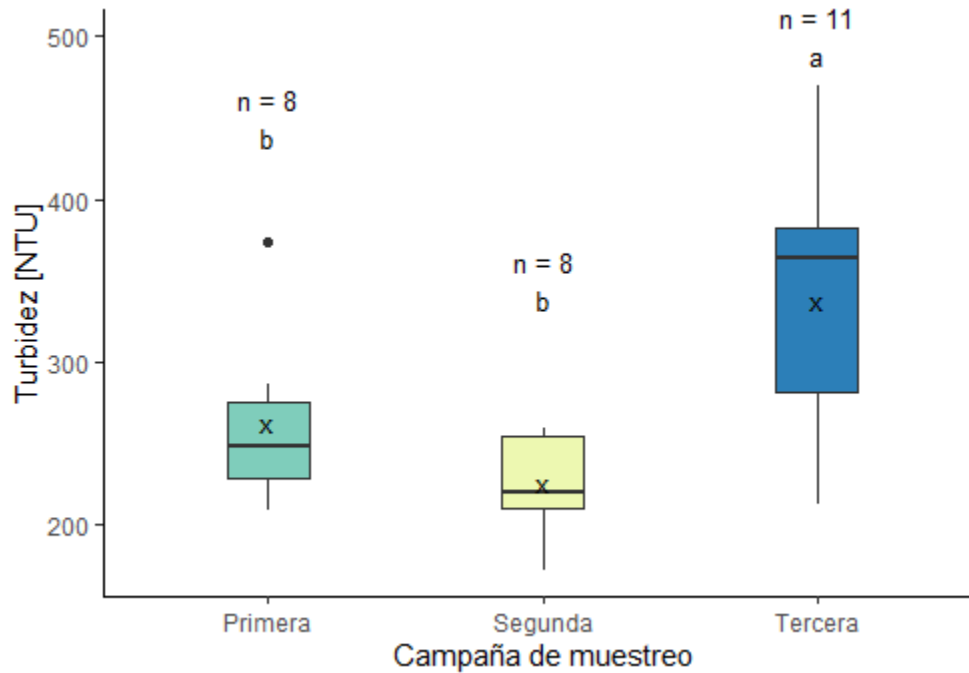
La prueba Kruskal-Wallis indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de turbiedad (valor p = 0.004339). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Dunn, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison  
p-values adjusted with the Bonferroni method.  
  
Comparison      Z      P.unadj      P.adj  
1 first - second 1.102396 0.270289385 0.810868154  
2 first - third  -2.027391 0.042622457 0.127867371  
3 second - third -3.213630 0.001310684 0.003932051
```

```
$jornada  
third first second  
"a"   "b"   "b"
```

**Figura 4E.**

*Valores de la Turbiedad en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según la prueba Kruskal-Wallis. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.188

**NT**

**Tabla 6E.**

*Valores del NT en las diferentes campañas de muestreo (mgN/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	6.11	2.62	43%	3.47	11.70
Segunda	8	6.50	1.70	26%	4.05	8.90
Tercera	10	6.48	1.30	20%	4.15	8.57

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas en los valores de NT y las tres jornadas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

`shapiro-wilk normality test`

```
data: df_TN$TN
W = 0.94999, p-value = 0.2317
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos presentan distribución normal (valor p = 0.2317)

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos si cumple con distribución normal):

`Bartlett test of homogeneity of variances`

```
data: TN by jornada
Bartlett's K-squared = 3.802, df = 2, p-value = 0.1494
```

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.1494$ )

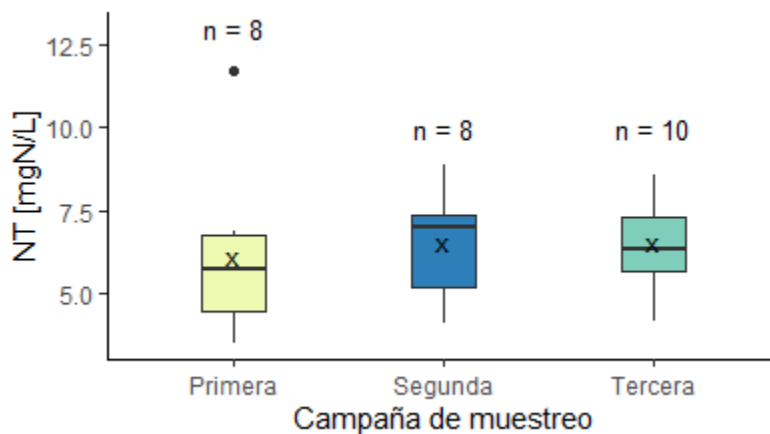
Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
jornada	2	0.82	0.410	0.113	0.894
Residuals	23	83.46	3.629		

La prueba ANOVA de una vía indica que no existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de NT (valor  $p = 0.894$ ).

### Figura 5E.

*Valores del NT en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.190

## PT

**Tabla 7E.**

*Valores del PT en las diferentes campañas de muestreo (mgP/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	7	0.81	0.31	38%	0.46	1.33
Segunda	6	0.96	0.47	49%	0.38	1.51
Tercera	10	0.57	0.13	22%	0.30	0.73

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas del PT con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_TP$TP
W = 0.86898, p-value = 0.006129
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor p = 0.006129)

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumple con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2    3.504 0.04959 *
      20
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.191

Según la prueba de Levene, los datos no presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.04959$ )

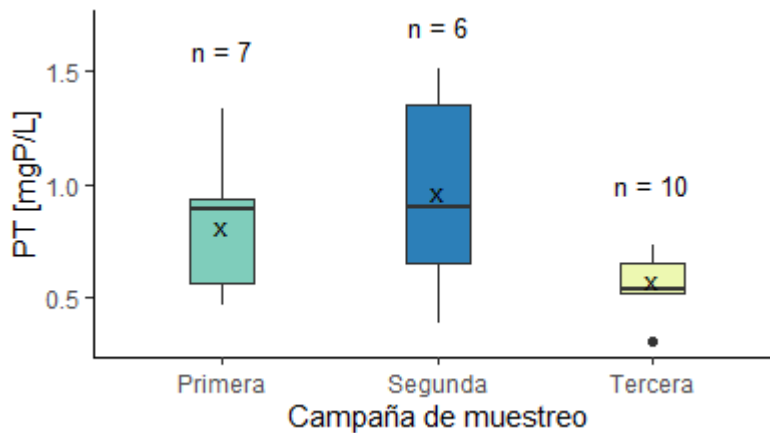
Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal ni con homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test  
  
data: df_TP$TP and df_TP$jornada  
kruskal-wallis chi-squared = 3.7833, df = 2, p-value = 0.1508
```

La prueba Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de PT (valor  $p = 0.1508$ ).

### Figura 6E.

*Valores del PT en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.192

### Grasas y aceites

**Tabla 8E.**

*Valores de Grasas y aceites en las diferentes campañas de muestreo (mg/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	182.25	31.72	17%	125.00	232.00
Segunda	8	162.25	26.59	16%	119.00	205.00
Tercera	10	210.72	66.22	31%	144.20	361.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de grasas y aceites con respecto a las tres jornadas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

#### shapiro-wilk normality test

```
data: df_0G$OG
W = 0.86704, p-value = 0.003101
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor p = 0.003101).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumplen con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 2 2.1233 0.1425
      23
```

Según la prueba de Levene, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.1425$ ).

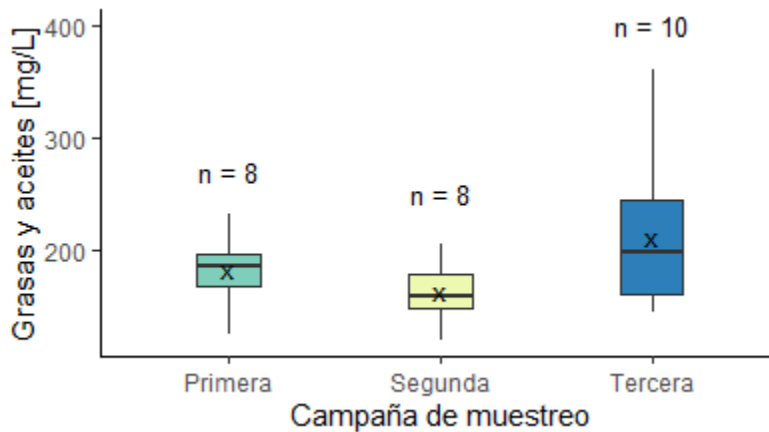
Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test  
data: df_OG$OG and df_OG$jornada  
kruskal-wallis chi-squared = 3.4566, df = 2, p-value = 0.1776
```

La prueba Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de grasas y aceites (valor  $p = 0.1776$ ).

### Figura 7E.

*Valores de grasa y aceites en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.194

## SST

**Tabla 9E.**

*Valores de los SST en las diferentes campañas de muestreo (mg/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	7	229.71	62.12	27%	104.00	292.00
Segunda	7	199.43	44.86	22%	123.00	268
Tercera	10	214.60	45.69	21%	130.00	276.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas en los valores de SST con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_TSS$TSS
w = 0.95364, p-value = 0.3242
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos presentan distribución normal (valor p = 0.3242)

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos si cumplen con distribución normal):

### Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: TSS by jornada
Bartlett's K-squared = 0.86113, df = 2, p-value = 0.6501
```

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.6501$ )

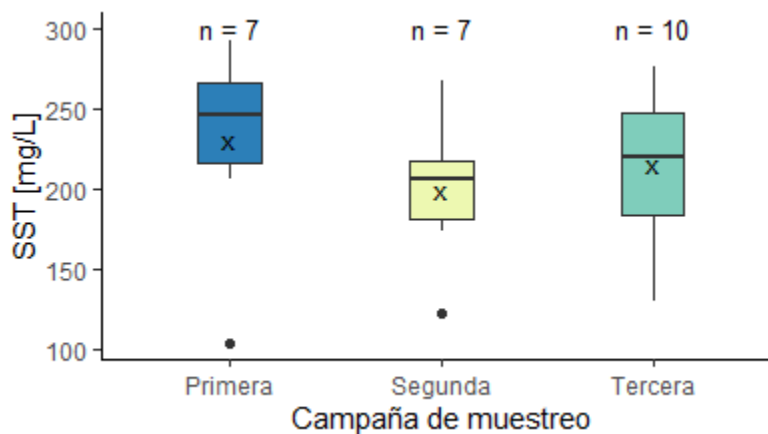
Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
jornada	2	3210	1605	0.624	0.545
Residuals	21	54016	2572		

La prueba ANOVA de una vía indica que no existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de SST (valor  $p = 0.545$ ).

### Figura 8E.

*Valores de los SST en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.196

## DQO

**Tabla 10E.**

*Valores de DQO en las diferentes campañas de muestreo (mgO<sub>2</sub>/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	982.50	116.09	12%	834.00	1155.00
Segunda	8	766.58	126.26	16%	553.66	930.33
Tercera	11	887.15	173.67	20%	637.00	1200.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de DQO con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_COD$COD  
w = 0.98031, p-value = 0.8693
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos presentan distribución normal (valor p = 0.8693).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos si cumplen con distribución normal):

### Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: COD by jornada  
Bartlett's K-squared = 1.4959, df = 2, p-value = 0.4733
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.197

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor p = 0.4733).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
jornada	2	187531	93766	4.434	0.023 *
Residuals	24	507570	21149		

La prueba ANOVA de una vía indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de DQO (valor p = 0.023). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Tukey, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
> tukey_COD <- TukeyHSD(anova_COD)
> print(tukey_COD)
  Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

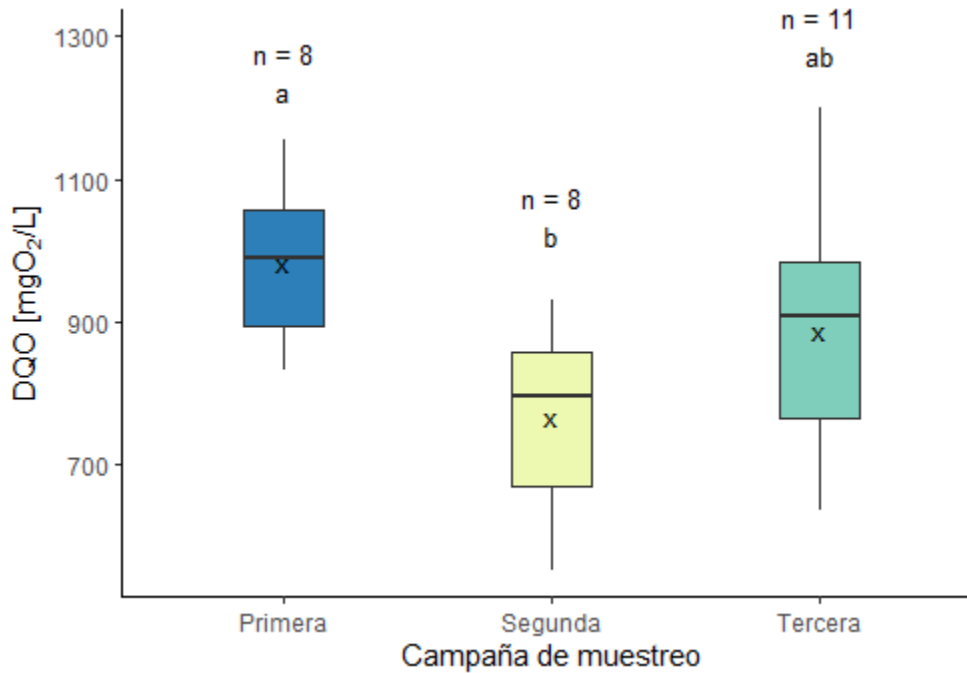
Fit: aov(formula = COD ~ jornada, data = df_COD)

$jornada
      diff      lwr      upr    p adj
second-first -215.92500 -397.51029 -34.33971 0.0176619
third-first  -95.34924 -264.10015  73.40167 0.3512405
third-second 120.57576  -48.17515 289.32667 0.1961367

> cld_COD <- multcompLetters4(anova_COD, tukey_COD)
> print(cld_COD)
$jornada
  first  third second
   "a"   "ab"   "b"
```

**Figura 9E.**

*Valores de la DQO en las tres campañas de muestreo*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según ANOVA. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.199

## DBO<sub>5</sub>

**Tabla 11E.**

*Variación de la DBO<sub>5</sub> en las diferentes campañas de muestreo (mgO<sub>2</sub>/L)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	8	453.63	55.93	12%	366.00	549.00
Segunda	8	342.13	53.10	16%	275.00	415.00
Tercera	10	372.00	113.76	31%	199.00	610.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de DBO<sub>5</sub> con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

### shapiro-wilk normality test

```
data: df_BOD$BOD
w = 0.98306, p-value = 0.9314
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos presentan distribución normal (valor p = 0.9314).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Bartlett (el conjunto de datos si cumplen con distribución normal):

### Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: BOD by jornada
Bartlett's K-squared = 5.7189, df = 2, p-value = 0.0573
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.200

Según la prueba de Bartlett, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.0573$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos si cumplen con distribución normal y homogeneidad de varianzas, se utiliza prueba paramétrica ANOVA de una vía:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
jornada	2	53849	26925	3.917	0.0344 *
Residuals	23	158101	6874		

La prueba ANOVA de una vía indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de  $DBO_5$  (valor  $p = 0.0344$ ). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Tukey, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
> tukey_BOD <- TukeyHSD(anova_BOD)
> print(tukey_BOD)
  Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

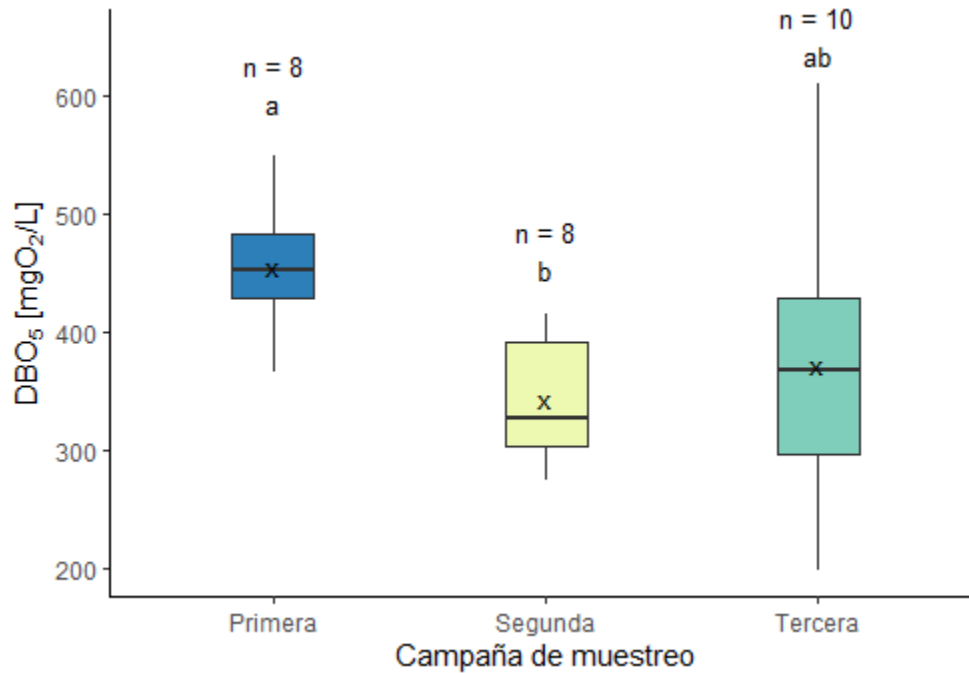
Fit: aov(formula = BOD ~ jornada, data = df_BOD)

$jornada
      diff      lwr      upr    p adj
second-first -111.500 -215.31633  -7.683666 0.0336952
third-first  -81.625 -180.11382  16.863822 0.1172169
third-second  29.875  -68.61382 128.363822 0.7309305

> cld_BOD <- multcompLetters4(anova_BOD, tukey_BOD)
> print(cld_BOD)
$jornada
 first  third second
  "a"   "ab"   "b"
```

**Figura 10E.**

*Valores de la DBO<sub>5</sub> en las diferentes campañas de muestreo*



*Nota 1:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de muestras analizadas en cada campaña. *Nota 2:* Las letras indican grupos que muestran diferencias estadísticamente significativas según ANOVA. Grupos con letras diferentes son significativamente diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ).

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.202

### Coliformes fecales

**Tabla 12E.**

*Valores de CF en las diferentes campañas de muestreo (UFC/100 mL)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	4	4,65E+05	5,62E+05	121%	7,90E+04	1,30E+06
Segunda	3	210.00	260.00	124%	50.00	510.00
Tercera	3	1933.33	750.56	39%	1500.00	2800.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de CF con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

#### shapiro-wilk normality test

```
data: df_CF$CF
w = 0.53595, p-value = 9.625e-06
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor p = 9.625e-06).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumplen con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2  1.0056 0.4131
      7
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.203

Según la prueba de Levene, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.4131$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test  
  
data: df_CF$CF and df_CF$jornada  
kruskal-wallis chi-squared = 8.1166, df = 2, p-value = 0.01728
```

La prueba Kruskal-Wallis indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de turbiedad (valor  $p = 0.01728$ ). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Dunn, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison  
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

	Comparison	Z	P. unadj	P. adj
1	Primera - Segunda	2.828117	0.004682265	0.0140468
2	Primera - Tercera	1.522832	0.127800651	0.3834020
3	Segunda - Tercera	-1.220982	0.222092757	0.6662783

Los resultados de la prueba post hoc con ajuste de Bonferroni, indica que, entre la primera y segunda campaña se muestra diferencias significativas (valor  $p = 0.014047$ ), pero no hay evidencia suficiente para afirmar diferencias significativas entre las primera y tercera campaña ni entre la segunda y tercera campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.204

### Coliformes totales

**Tabla 13E.**

*Valores de CT en las diferentes campañas de muestreo (UFC/100 mL)*

<b>Campaña</b>	<b>n</b>	<b>Promedio</b>	<b>DE</b>	<b>CV</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Primera	4	1,03E+06	1,65E+06	161%	1,30E+05	3,50E+06
Segunda	3	650	50	8%	600	700
Tercera	3	4766.67	873.69	18%	3800.00	5500.00

*Nota:* n = número de muestras analizadas; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Se procede a verificar si existen diferencias significativas de los valores de CF con respecto a las tres campañas de muestreo, para esto, se aplica prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas a los datos de consumo. Para aplicar prueba de normalidad, se utiliza Shapiro-Wilk (conjunto de datos tiene menos de 50 observaciones):

#### shapiro-wilk normality test

```
data: df_CT$CT
W = 0.43413, p-value = 6.198e-07
```

Según la prueba de Shapiro-Wilk, los datos no presentan distribución normal (valor p = 6.198e-07).

Para aplicar la prueba de homogeneidad de varianzas, se utiliza Test de Levene (el conjunto de datos no cumplen con distribución normal):

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2  0.7638 0.5011
      7
```

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.205

Según la prueba de Levene, los datos si presentan homogeneidad de varianzas (valor  $p = 0.5011$ ).

Una vez realizadas las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y determinado que los datos no cumplen con distribución normal, se utiliza prueba no paramétrica Kruskal-Wallis:

```
kruskal-wallis rank sum test
data: df_CT$CT and df_CF$jornada
kruskal-wallis chi-squared = 8.0671, df = 2, p-value = 0.01771
```

La prueba Kruskal-Wallis indica que si existen diferencias significativas entre las medias de cada jornada para los datos de turbiedad (valor  $p = 0.01771$ ). Por esta razón, se aplica prueba post hoc llamada Test de Dunn, para conocer específicamente en qué jornada de muestreo se encuentra la diferencia:

```
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.

      Comparison      Z      P.unadj      P.adj
1 Primera - Segunda  2.819482  0.004810127  0.01443038
2 Primera - Tercera  1.518182  0.128968402  0.38690521
3 Segunda - Tercera -1.217254  0.223507588  0.67052276
```

Los resultados de la prueba post hoc con ajuste de Bonferroni, indica que, entre la primera y segunda campaña se muestra diferencias significativas (valor  $p = 0.014430$ ), pero no hay evidencia suficiente para afirmar diferencias significativas entre las primera y tercera campaña ni entre la segunda y tercera campaña.

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.206

***Análisis estadístico correspondiente a los datos del desempeño del FLA y de la MUF***

Con el fin de observar el comportamiento de la calidad en cada día de operación de los trenes de tratamiento, se realizaron tablas por cada parámetro de calidad, para ver su comportamiento tanto en el afluente como en los efluentes del sedimentador + FLA y sedimentador + MUF:

**Tabla 14E.**

*Valores de pH para cada día de operación*

<b>Corrida</b>	<b>Afluente</b>	<b>Efluente sedimentador + FLA</b>	<b>Efluente sedimentador + MUF</b>
10/05/2023	7.50	7.46	7.81
11/05/2023	7.58	7.39	7.79
5/06/2023	7.57	7.41	7.69
6/06/2023	7.48	7.33	7.69
7/06/2023	7.47	7.24	7.71
8/06/2023	7.49	7.17	7.64
13/06/2023	7.57	7.22	7.62
14/06/2023	7.57	7.12	7.71
15/06/2023	7.67	7.08	7.66

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.207

**Tabla 15E.**

*Valores de CE para cada día de operación ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	183.80	183.63	0%	178.03	3%
11/05/2023	180.30	173.90	4%	174.90	3%
5/06/2023	177.10	162.90	8%	179.53	-1%
6/06/2023	180.50	160.50	11%	176.60	2%
7/06/2023	180.57	166.97	8%	175.43	3%
8/06/2023	187.07	166.90	11%	180.93	3%
13/06/2023	190.03	167.53	12%	187.27	1%
14/06/2023	193.00	180.97	6%	187.23	3%
15/06/2023	186.17	179.40	4%	181.67	2%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.208

**Tabla 16E.**

*Valores de turbiedad para cada día de operación (NTU)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	306.67	11.43	96%	0.25	100%
11/05/2023	263.00	11.88	95%	0.20	100%
5/06/2023	211.67	4.07	98%	0.70	100%
6/06/2023	379.67	8.28	98%	0.49	100%
7/06/2023	402.33	4.33	99%	0.87	100%
8/06/2023	298.67	7.39	98%	0.51	100%
13/06/2023	470.00	6.24	99%	0.96	100%
14/06/2023	385.00	15.30	96%	0.65	100%
15/06/2023	363.67	11.97	97%	0.71	100%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.209

**Tabla 17E.**

*Valores de NT para cada día de operación (mgN/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	7.10	1.73	76%	3.97	44%
11/05/2023	4.15	0.20	95%	1.70	59%
5/06/2023	5.60	2.10	63%	4.45	21%
6/06/2023	5.83	1.33	77%	4.10	30%
7/06/2023	5.60	0.00	100%	2.60	54%
8/06/2023	6.13	0.30	95%	4.47	27%
13/06/2023	8.57	0.75	91%	6.33	26%
14/06/2023	7.93	0.73	91%	4.90	38%
15/06/2023	7.37	0.30	96%	4.67	37%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.210

**Tabla 18E.**

*Valores de PT para cada día de operación (mgP/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	0.52	0.20	62%	0.51	2%
11/05/2023	0.30	0.13	57%	0.32	-7%
5/06/2023	0.72	0.14	81%	0.58	19%
6/06/2023	0.52	0.09	83%	0.77	-48%
7/06/2023	0.51	0.11	78%	0.56	-10%
8/06/2023	0.73	0.10	86%	0.51	30%
13/06/2023	0.51	0.08	84%	0.49	4%
14/06/2023	0.64	0.05	92%	0.41	36%
15/06/2023	0.65	0.03	96%	0.48	26%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.211

**Tabla 19E.**

*Valores de grasas y aceites para cada día de operación (mg/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	177.00	1.50	99%	2.40	99%
11/05/2023	155.00	2.60	98%	3.00	98%
5/06/2023	146.00	1.60	99%	1.40	99%
6/06/2023	192.00	1.70	99%	3.00	98%
7/06/2023	254.00	1.70	99%	1.80	99%
8/06/2023	203.00	2.70	99%	4.60	98%
13/06/2023	361.00	2.40	99%	5.10	99%
14/06/2023	250.00	7.20	97%	7.17	97%
15/06/2023	225.00	7.50	97%	5.10	98%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.212

**Tabla 20E.**

*Valores de SST para cada día de operación (mg/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	188.00	3.25	98%	0.00	100%
11/05/2023	182.00	7.50	96%	0.00	100%
5/06/2023	130.00	15.50	88%	3.00	98%
6/06/2023	240.00	2.00	99%	0.50	100%
7/06/2023	250.00	3.25	99%	1.75	99%
8/06/2023	176.00	4.25	98%	3.50	98%
13/06/2023	276.00	6.00	98%	4.25	98%
14/06/2023	210.00	7.60	96%	5.00	98%
15/06/2023	230.00	5.00	98%	3.50	98%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.213

**Tabla 21E.**

*Valores DQO para cada día de operación (mgO<sub>2</sub>/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	700.00	94.50	87%	192.00	73%
11/05/2023	643.00	153.00	76%	59.60	91%
5/06/2023	637.00	78.50	88%	203.00	68%
6/06/2023	1005.00	45.60	95%	260.00	74%
7/06/2023	1034.00	45.20	96%	259.00	75%
8/06/2023	906.00	103.00	89%	250.00	72%
13/06/2023	1200.00	30.10	97%	319.00	73%
14/06/2023	963.00	111.00	88%	259.00	73%
15/06/2023	908.00	87.80	90%	116.00	87%

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.214

**Tabla 22E.**

*Valores DBO<sub>5</sub> para cada día de operación (mgO<sub>2</sub>/L)*

Corrida	Afluente	Efluente	Remoción	Efluente	Remoción
		sedimentador + FLA	sedimentador + FLA	sedimentador + MUF	sedimentador + MUF
10/05/2023	199.00	24.80	88%	80.10	60%
11/05/2023	275.00	72.50	74%	15.60	94%
5/06/2023	288.00	30.50	89%	97.00	66%
6/06/2023	422.00	22.20	95%	116.00	73%
7/06/2023	430.00	19.70	95%	106.00	75%
8/06/2023	441.00	41.00	91%	111.00	75%
13/06/2023	610.00	9.60	98%	126.00	79%
14/06/2023	373.00	48.60	87%	117.00	69%
15/06/2023	362.00	34.50	90%	52.20	86%

Con el fin de evaluar el desempeño del tren de tratamiento del FLA y la MUF, se aplicó la prueba t-pareada (o en su defecto la no paramétrica, Wilcoxon). Antes de aplicar la prueba, se procedió a verificar la normalidad del conjunto de datos para cada parámetro de calidad, esto con el fin de determinar si se aplica prueba paramétrica o no paramétrica:

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.215

**Tabla 23E.**

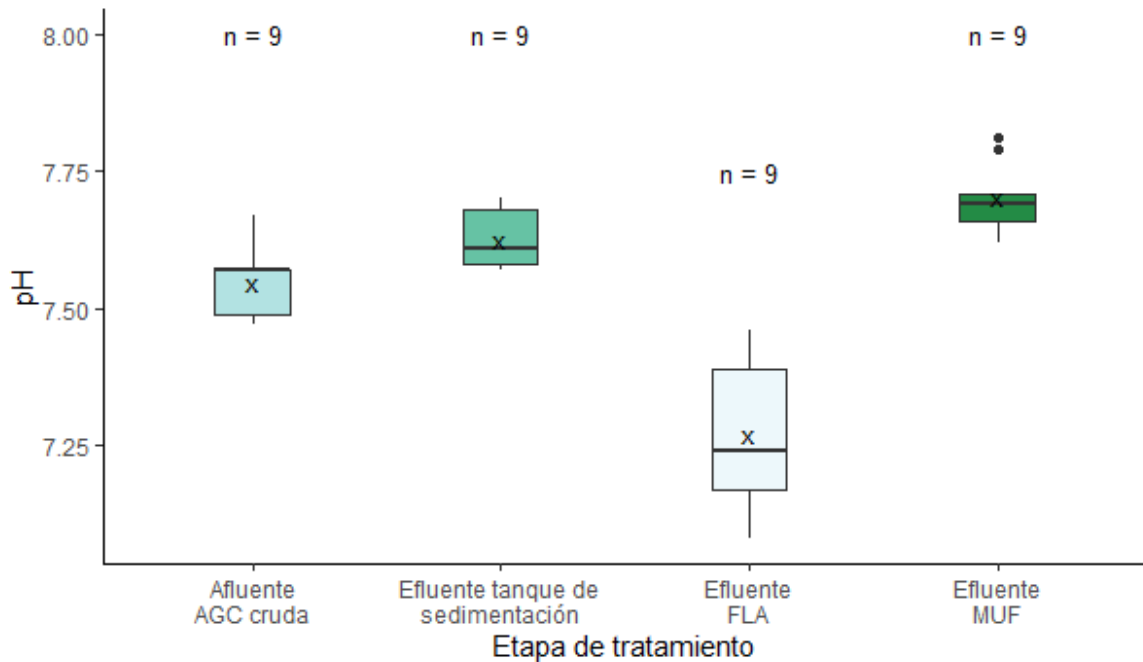
*Valores p de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk*

<b>Conjunto de datos</b>	<b>Valor p</b>
pH en el efluente del sedimentador + FLA	0.6769
pH en el efluente del sedimentador + MUF	0.4197
EC en el efluente del sedimentador + FLA	0.3713
EC en el efluente del sedimentador + MUF	0.2366
Turbiedad en el efluente del sedimentador + FLA	0.5620
Turbiedad en el efluente del sedimentador + MUF	0.7175
NT en el efluente del sedimentador + FLA	0.2718
NT en el efluente del sedimentador + MUF	0.5284
PT en el efluente del sedimentador + FLA	0.9373
PT en el efluente del sedimentador + MUF	0.5156
Grasas y aceites en el efluente del sedimentador + FLA	0.001214*
Grasas y aceites en el efluente del sedimentador + MUF	0.5562
SST en el efluente del sedimentador + FLA	0.03936*
SST en el efluente del sedimentador + MUF	0.2884
DQO en el efluente del sedimentador + FLA	0.7531
DQO en el efluente del sedimentador + MUF	0.2808
DBO <sub>5</sub> en el efluente del sedimentador + FLA	0.5545
DBO <sub>5</sub> en el efluente del sedimentador + MUF	0.0743

En las siguientes gráficas, se muestra cómo fue la variación de cada parámetro de calidad evaluado, en las diferentes etapas del tren de tratamiento:

**Figura 11E.**

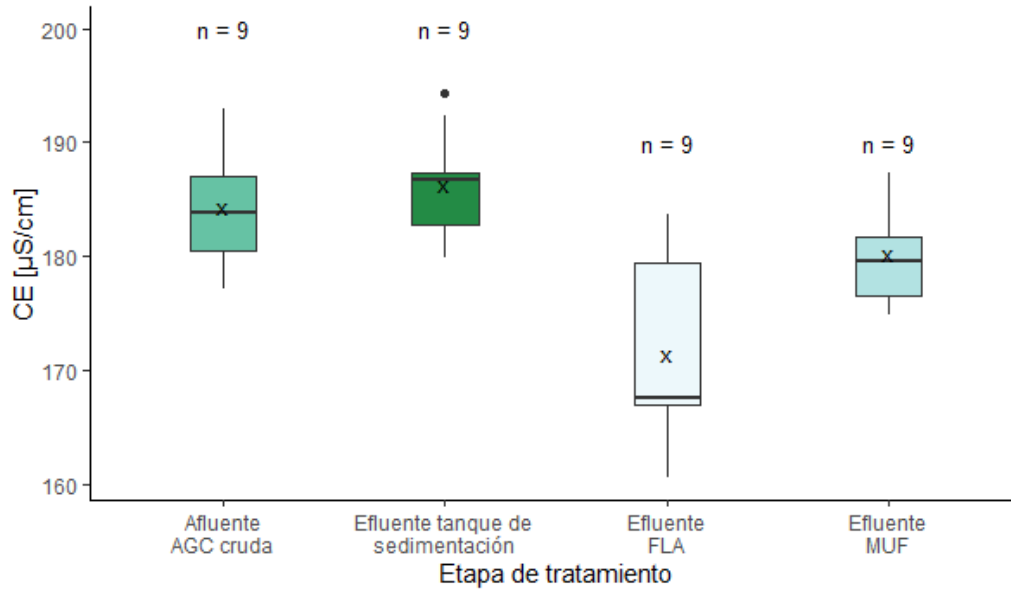
*Variación del pH en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 12E.**

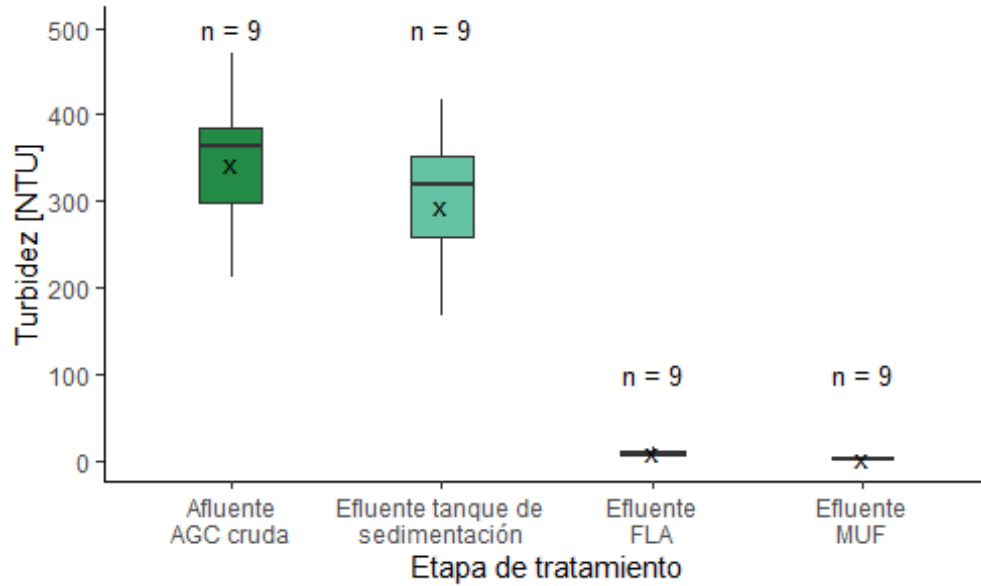
*Variación de la CE en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 13E.**

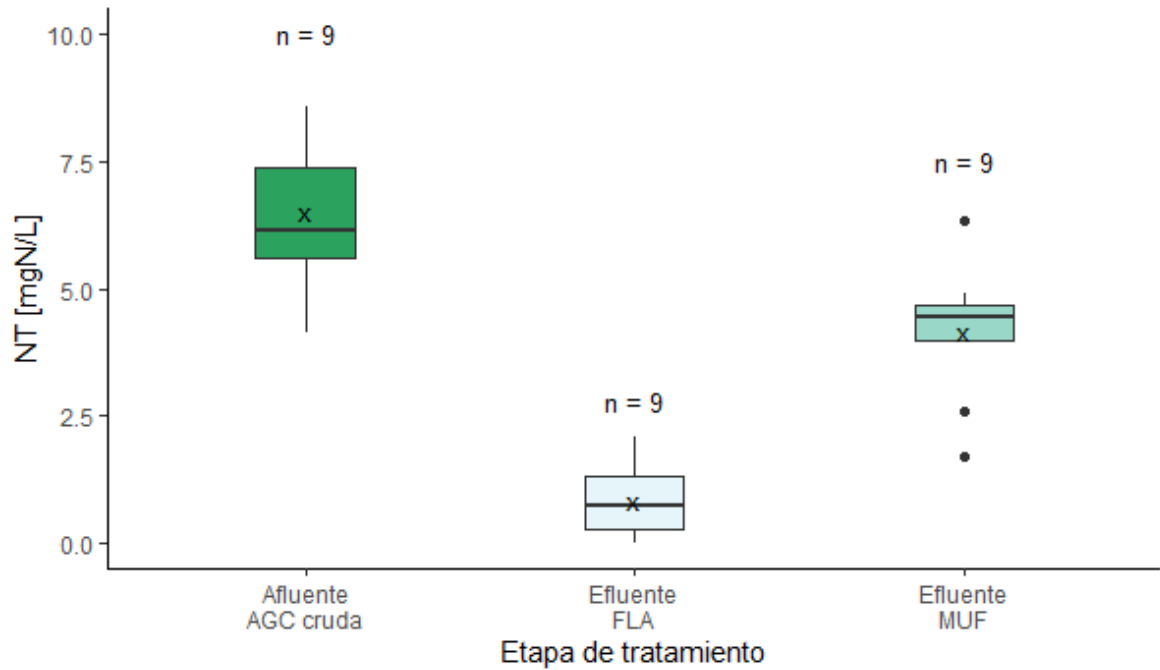
*Variación de la turbiedad en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 14E.**

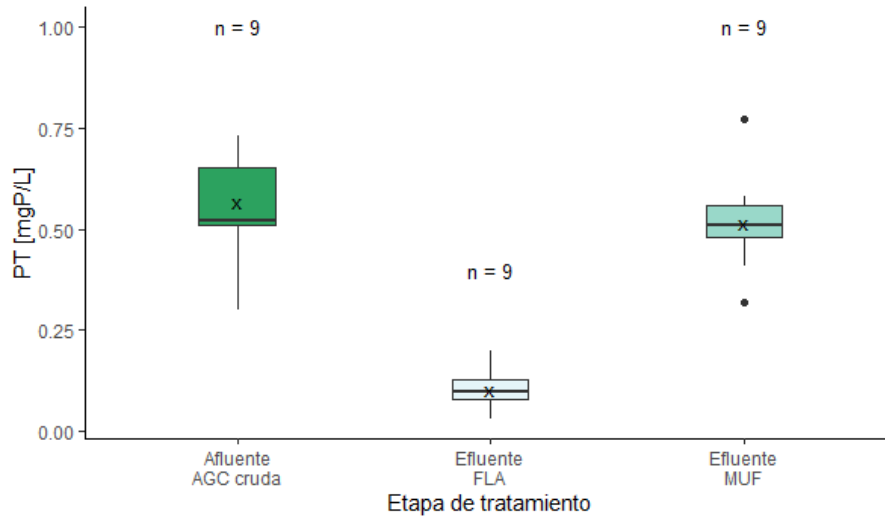
*Variación de la concentración de NT en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 15E.**

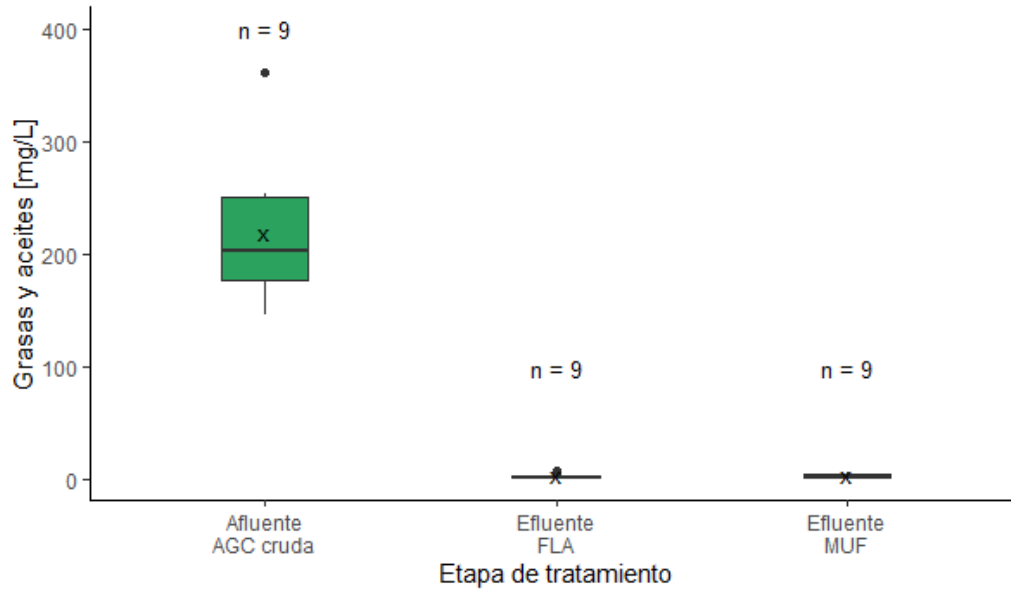
*Variación de la concentración de PT en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 16E.**

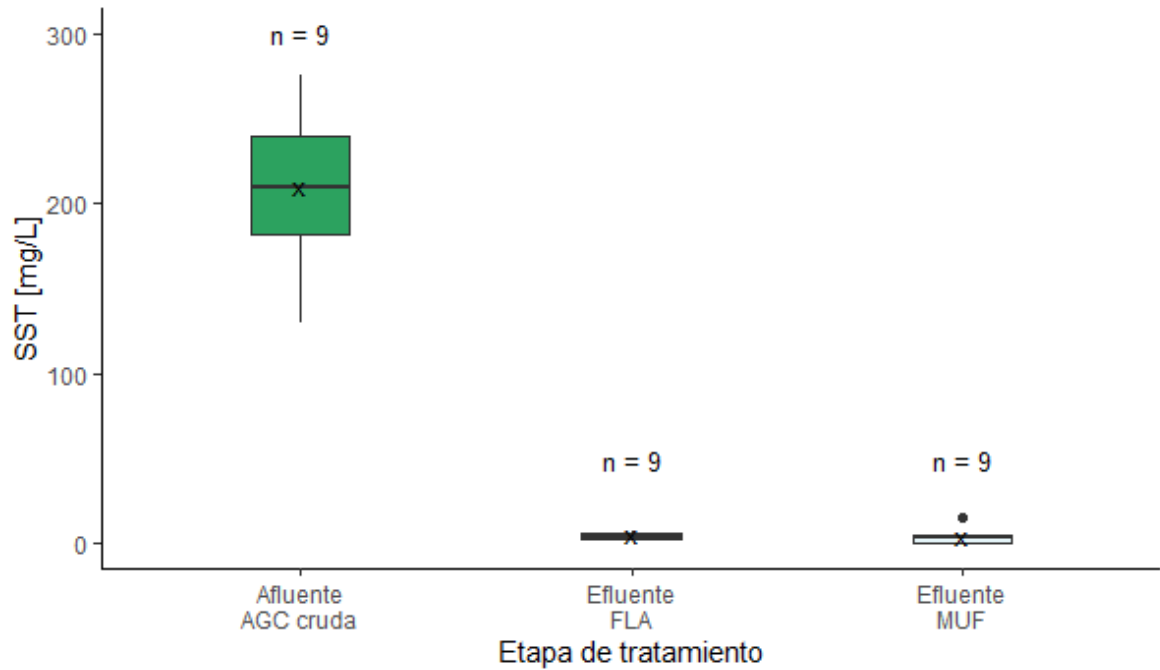
*Concentración de grasas y aceites en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 17E.**

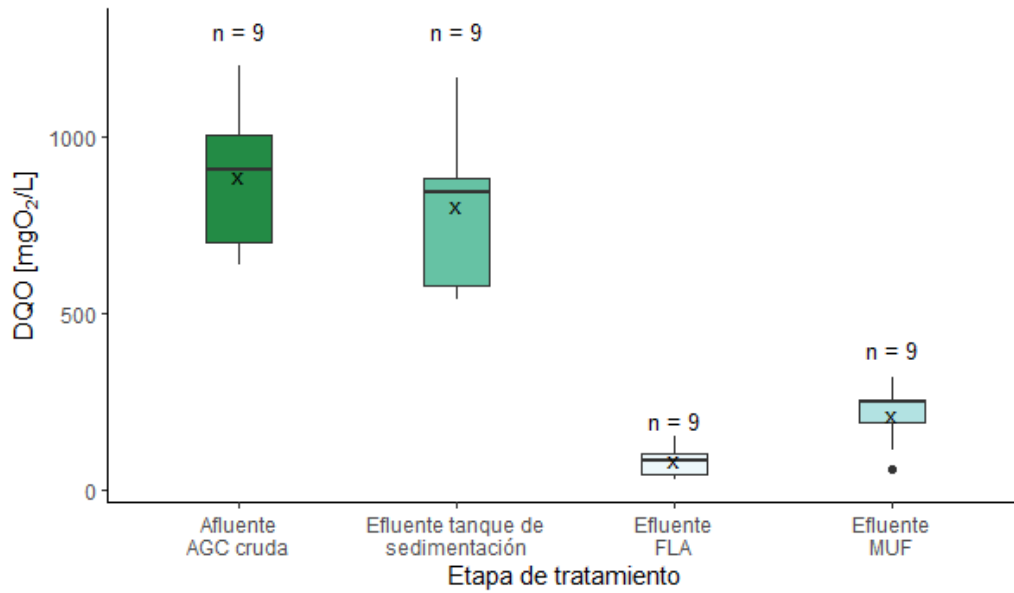
*Variación de la concentración de SST en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 18E.**

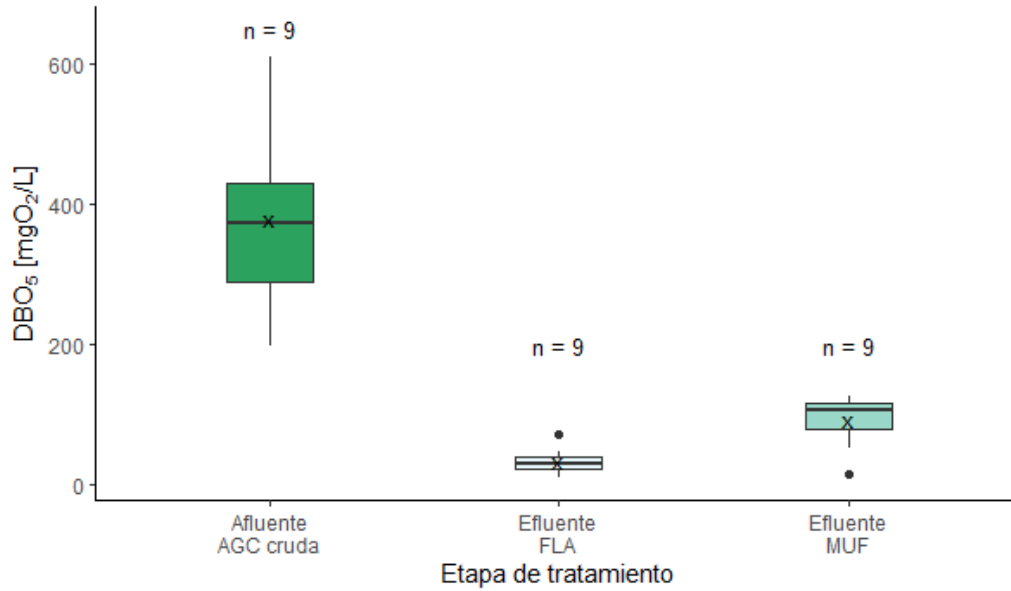
*Variación de la concentración de DQO en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

**Figura 19E.**

*Variación de la concentración de DBO<sub>5</sub> en las diferentes etapas de tratamiento*



*Nota:* las 'x' en las cajas representan el promedio del conjunto de datos; n es igual al número de operaciones de cada etapa de tratamiento.

## Apéndice F

Análisis de los diferentes componentes hallados en los productos de higiene y cuidado personal que se utilizaron en la vivienda, mientras se realizaron las campañas de muestreo.

Se identificaron los ingredientes que componen los diferentes productos de cuidado e higiene personal, que fueron utilizados por los residentes de la vivienda de estudio, mientras se llevaron a cabo las campañas de muestreo de AGC.

### Tabla 1F.

*Marcas de los productos de cuidado e higienes personal que los residentes utilizaron*

<b>Producto</b>	<b>Primera campaña</b>	<b>Segunda campaña</b>	<b>Tercera campaña</b>
Champú	Sedal - Head & Shoulders	Sedal - Head & Shoulders	Sedal - Head & Shoulders - Milagros
Acondicionador	Sedal - Head & Shoulders	Sedal - Head & Shoulders	Sedal - Head & Shoulders - Milagros
Crema para peinar	Sedal	Sedal	Sedal - Skala - Milagros
Jabón de cuerpo	Protex Líquido - Johnson & Johnson Líquido	Protex Líquido - Johnson & Johnson Líquido	Protex - Johnson & Johnson
Jabón de manos	Más x Menos - Aromasense	Más x Menos - Aromasense	Más x Menos - Aromasense
Crema dental	Colgate - Sensodyne	Colgate - Sensodyne	Colgate - Sensodyne
Enjuague bucal	Listerine	Listerine	Listerine
Crema corporal	Johnson & Johnson - Nivea	Johnson & Johnson - Nivea	Johnson & Johnson - Nivea
Bloqueadores	Isdin	Isdin	Isdin

**Tabla 2F.**

*Componentes identificados en los champús utilizados por los residentes*

<b>Componente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánico	Base o solvente
Piritionato de zinc	Compuesto orgánico	Antimicrobiano (antifúngico y antibacteriano)
Carbonato de zinc	Inorgánico	Antimicrobiano, agente astringente.
Cocamidopropil betaína	Orgánico (derivado del coco)	Detergente y agente acondicionador
Cocamida MEA (monoetanolamina)	Orgánico (derivado del coco)	Detergente y agente acondicionador
Alcohol cetílico	Orgánico	Emoliente y espesante
Dimeticona	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador y emoliente
Cloruro de guar hidroxipropiltrimonio	Orgánico (derivado de la goma guar)	Agente acondicionador
Policuaternio 10	Compuesto orgánico	Agente acondicionador.
Glicerina	Orgánico (puede ser de origen vegetal o animal)	Humectante
Diestearato de etileno	Inorgánico (sintético)	Emoliente y estabilizador
Hidroxicarbonato de magnesio	Inorgánico (compuesto químico)	Antiacné y regulador del pH
Benzoato de sodio	Compuesto orgánico	Conservante
Alcohol bencílico	Orgánico (puede ser sintético o derivado de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Metilcloroisotiazolinona	Compuesto químico orgánico	Conservante
Metilisotiazolinona	Compuesto químico orgánico	Conservante

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.227

Cloruro de sodio	Sal inorgánica	Espesante y regulador de la viscosidad
Xilenosulfonato de sodio	Orgánico	Agente acondicionador
Hidróxido de sodio	Inorgánico (compuesto químico)	Regulador del pH
Ácido clorhídrico	Inorgánico (compuesto químico)	Regulador del pH

**Tabla 3F.**

*Componentes identificados en los acondicionadores para cabello utilizados por los residentes*

<b>Componente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánico	Base o solvente
Alcohol cetílico	Orgánico (puede ser derivado del aceite de coco)	Emoliente y espesante
Cloruro de Behentrimonio	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador
Bis-Aminopropil Dimeticona	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador
Ácido Cítrico	Orgánico (se extrae de frutas cítricas como limones y naranjas)	Regulador del pH
Piritionato de zinc	Compuesto orgánico	Antimicrobiano
Alcohol de bencilo	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Conservante y fragancia.
Fenoxietanol	Orgánico (sintético)	Conservante
Hexil cinamal	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Fragancia
Linalol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de lavanda)	Fragancia
Hidroxicitronelal	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Fragancia
Tartrazina CI 19140	Sintético	Colorante artificial

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.228

Aceite de Argán	Orgánico (se extrae de las semillas del árbol de argán)	Emoliente
Metilcloroisotiazolinona	Compuesto químico orgánico	Conservante
Metilisotiazolinona	Compuesto químico orgánico	Conservante
Cloruro de sodio	Sal inorgánica	Espesante y regulador de la viscosidad
Hidróxido de sodio	Inorgánico (compuesto químico)	Regulador del pH
Extracto de Aloe Vera	Orgánico (se extrae de la planta de aloe vera)	Agente acondicionador y calmante

**Tabla 4F.**

*Componentes identificados en la crema para peinar utilizada por los residentes*

<b>Componente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánico	Base o solvente
Alcohol cetearílico	Orgánico (puede derivarse de aceites vegetales como el aceite de coco)	Emoliente y espesante
Dimeticona	Orgánico	Agente acondicionador y emoliente
Cloruro de Behentrimonio	Orgánico (derivado de aceites naturales)	Agente acondicionador
Ácido Cítrico	Orgánico (se extrae de frutas cítricas como limones y naranjas)	Regulador del pH
DMDM hidantoína	Compuesto orgánico	Conservante
Estearamidopropil dimetilamina	Orgánico	Agente acondicionador
Glicerina	Orgánico (puede ser de origen vegetal o animal)	Humectante
Ácido láctico	Orgánico	Regulador del pH y agente humectante
Parafina líquida	Orgánico (aceite mineral)	Emoliente

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.229

Metilparabeno	Orgánico (compuesto químico)	Conservante
Vaselina	Inorgánico (derivado del petróleo)	Emoliente y protector de la piel
EDTA Disódico	Orgánico (compuesto químico)	Agente quelante
Melamina de polioximetileno	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador
Aceite de coco nucifera	Orgánico (se extrae del coco)	Emoliente
Metoxicinamato de etilhexilo	Sintético (compuesto químico)	Filtro UV
Elastina hidrolizada	Orgánico (puede derivarse de tejidos animales o sintetizarse)	Agente acondicionador
Polisorbato 20	Sintético (compuesto químico)	Emulsionante y surfactante
Ácido ascórbico	Orgánico (Vitamina C)	Antioxidante
Pantenol	Orgánico (Provitamina B5)	Agente acondicionador y humectante.
Acetato de tocoferilo	Orgánico (Forma de vitamina E sintética. liposoluble, lo que significa que no se disuelve en agua)	Antioxidante y agente acondicionador de la piel
Biotina	Orgánico (Vitamina B7)	Acondicionador capilar
Niacinamida	Orgánico (Vitamina B3)	Agente acondicionador
Alcohol bencílico	Orgánico (puede ser sintético o derivado de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Citronelol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de rosa)	Fragancia
Hexyl cinamal	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Fragancia
Limoneno	Orgánico (se encuentra en aceites cítricos como limón y naranja)	Fragancia
Linalol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de lavanda)	Fragancia

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.230

**Tabla 5F.**

*Componentes identificados en el jabón corporal utilizado por los residentes*

<b>Ingrediente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Palmato de Sodio	Orgánico (derivado del aceite de palma)	Surfactante y agente limpiador
Kernelato de palma de sodio	Orgánico (derivado del aceite de palma)	Surfactante y agente limpiador
Agua	Inorgánico	Base o solvente
Carbonato de calcio	Inorgánico (compuesto químico)	Agente abrasivo y espesante
Glicerina	Orgánico (puede ser de origen vegetal o animal)	Humectante
Alfa-isometilionona	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Fragancia
Benzoato de bencilo	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Citronelol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de rosa)	Fragancia
Cloruro de sodio	Sal inorgánica	Espesante y regulador de la viscosidad
Parafina líquida	Orgánico (aceite mineral)	Emoliente
Dióxido de titanio	Inorgánico	Filtro UV
EDTA tetrasódico	Orgánico (compuesto químico)	Agente quelante
Ácido etidróico	Compuesto orgánico	Agente quelante y estabilizador

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.231

**Tabla 6F.**

*Componentes identificados en el jabón de manos utilizado por los residentes*

<b>Ingrediente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánico	Base o solvente
Lauril éter sulfato de sodio (SLES)	Orgánico (derivado de aceites vegetales)	Surfactante y agente espumante
Glicerina	Orgánico (puede ser de origen vegetal o animal)	Humectante
Diestearato de glicol	Compuesto orgánico	Emoliente y agente espesante
Dimetil lauramida	Compuesto orgánico	Acondicionar
Cloruro de sodio	Sal inorgánica	Espesante y regulador de la viscosidad
cocamida DEA	Orgánico (derivado del aceite de coco)	Surfactante y agente acondicionador
Fenoxietanol	Compuesto orgánico	Conservante
Decileglicol	Compuesto orgánico	Agente humectante, emoliente y disolvente
Metilcloroisotiazolinona (MCI)	Compuesto químico orgánico	Conservante
Metilisotiazolinona	Compuesto químico orgánico	Conservante
EDTA tetrasódico	Orgánico (compuesto químico)	Agente quelante
Extracto de Avena Sativa (Avena) ernel	Orgánico (se extrae de la avena)	Agente acondicionador y calmante

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.232

**Tabla 7F.**

*Componentes identificados en las cremas dentales utilizado por los residentes*

<b>Ingrediente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Nitrato de potasio	Compuesto inorgánico	Agente desensibilizante para reducir la sensibilidad dental
Fluoruro de sodio	Compuesto químico inorgánico	Se utiliza como fuente de flúor para fortalecer el esmalte dental y ayudar en la prevención de caries dentales
Monofluorofosfato de sodio	Sal inorgánica (fosfato sódico)	Se utiliza como fuente de flúor para fortalecer el esmalte dental y ayudar en la prevención de caries dentales
Agua	Inorgánica	Base o solvente
Hidróxido de calcio	Compuesto inorgánico	Agente bactericida y para estimular la formación de dentina en la pulpa dental
Sorbitol	Orgánico	Agente edulcorante para mejorar su sabor
Sílice hidratada	Compuesto inorgánico	Agente abrasivo suave que ayuda a eliminar la placa y las manchas de los dientes
Glicerina	Compuesto orgánico	Agente humectante para evitar que la pasta se seque y endurezca
Carboximetilcelulosa sódica	Origen orgánico	Agente espesante y estabilizador de la viscosidad
Lauril sulfato de sodio	Compuesto químico orgánico	Tensioactivo: forma espuma y limpia la boca y los dientes
Sacarina sódica	Compuesto orgánico	Agente edulcorante para mejorar su sabor
Dióxido de titanio	Compuesto inorgánico	Antimicrobiano: reduce el crecimiento de bacterias en la boca y prevenir la caries dental

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.233

Azul brillante FCF (CI 42090)	Compuesto orgánico	Colorante
-------------------------------	--------------------	-----------

**Tabla 8F.**

*Componentes identificados en el enjuague bucal utilizado por los residentes*

<b>Ingrediente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánica	Base o solvente
Fluoruro de sodio	Compuesto inorgánico	Se utiliza comúnmente en pastas dentales y en enjuagues bucales como fuente de flúor. El flúor es conocido por fortalecer el esmalte dental y ayudar en la prevención de caries dentales
Alcohol bencílico	Orgánico (puede ser sintético o derivado de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Benzoato de sodio	Compuesto orgánico	Conservante
Sorbato de potasio	Compuesto orgánico	Conservante
Eucaliptol	Compuesto orgánico presente en el aceite esencial de eucalipto	Utilizado como antiséptico y para dar sabor y aroma al enjuague bucal
Mentol	Compuesto orgánico presente en el aceite esencial de menta	Se utiliza para dar sabor y aroma al enjuague bucal y para refrescar el aliento
Salicilato de metilo	Compuesto orgánico	Utilizado como antiséptico y para dar sabor y aroma al enjuague bucal
Timol	Compuesto orgánico presente en el aceite esencial de tomillo y orégano	Utilizado como antiséptico y para dar sabor y aroma al enjuague bucal
Cloruro de zinc	Compuesto inorgánico	Antiséptico para combatir la placa bacteriana y el mal aliento
Cloruro de cetilpiridinio	Compuesto orgánico	Antiséptico para combatir la placa bacteriana y el mal aliento

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.234

Sacarina sódica	Compuesto orgánico	Utilizado como edulcorante para dar sabor al enjuague bucal
CI 42053	Colorante sintético inorgánico	Se utiliza para dar color al enjuague bucal

**Tabla 9F.**

*Componentes identificados en las cremas corporales utilizadas*

<b>Ingrediente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Agua	Inorgánica	Base o solvente
Parafina líquida	Orgánico (aceite mineral)	Emoliente
Amilo cinamal	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Fragancia
Alcohol bencílico	Orgánico (puede ser sintético o derivado de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Benzoato de bencilo	Orgánico (sintético o puede derivarse de aceites naturales)	Conservante y fragancia
Citronelol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de rosa)	Fragancia
Geraniol	Orgánico (se encuentra en los aceites esenciales)	Fragancia
D-limoneno	Orgánico (se encuentra en aceites cítricos como limón y naranja)	Fragancia
Linalol	Orgánico (se encuentra en aceites esenciales como el de lavanda)	Fragancia
Acetato de tocoferilo	Orgánico (Forma de vitamina E sintética. liposoluble, lo que significa que no se disuelve en agua)	Antioxidante y agente acondicionador de la piel
Vaselina	Inorgánico (derivado del petróleo)	Emoliente y protector de la piel
Aceite de almendras	Orgánico (aceite vegetal)	Hidratante y emoliente
Aceite de aguacate	Orgánico (aceite vegetal)	Hidratante
Aceite de jojoba	Orgánico (se extrae de las semillas de la planta de jojoba)	Emoliente y agente acondicionador de la piel

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.236

Extracto de manzanilla	Orgánico (se obtiene de las flores de la planta de manzanilla)	Agente calmante y acondicionador de la piel
Extracto de lavanda	Orgánico (se obtiene de las flores de la planta de lavanda)	Fragancia, agente calmante y acondicionador de la piel

**Tabla 10F.**

*Componentes identificados en el desodorante utilizado (En esta vivienda en particular, las personas utilizan leche de magnesia como desodorante)*

<b>Componente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Hidróxido de magnesio	Compuesto químico inorgánico	Regulador del pH y agente alcalinizante
Agua	Inorgánica	Base o solvente
Hipoclorito de calcio	Compuesto químico inorgánico	Desinfectante

**Tabla 11F.**

*Componentes identificados en los bloqueadores solares utilizados*

<b>Componente</b>	<b>Origen</b>	<b>Grupo</b>
Avobenzona	Molécula orgánica	Filtro UV
Octocrileno	Compuesto orgánico	Filtro UV
Octinoxato	Compuesto orgánico sintético	Filtro UV
Ensulizol	Compuesto orgánico	Filtro UV
Homosalato	Compuesto orgánico	Filtro UV
Octisalato	Compuesto orgánico	Filtro UV
Butil metoxidibenzoilmetano	Compuesto orgánico sintético	Filtro UV
Ácido fenilbencimidazol sulfónico	Compuesto orgánico	Filtro UV

Evaluación de sistemas de tratamiento y reúso de aguas grises claras, aplicables a un sector residencial del Área Metropolitana de Bucaramanga. Caso de estudio: barrio La Victoria.237

Glicerina	Orgánico (puede ser de origen vegetal o animal)	Humectante
Propilenglicol	Compuesto orgánico	Humectante y solvente
Propanodiol	Compuesto orgánico	Humectante y solvente
Dimeticona	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador y emoliente
Salicilato de etilhexilo	Compuesto orgánico	Fragancia
Polimetacrilato de metilo	Orgánico (compuesto químico)	Agente acondicionador y espesante
Salicilato de etilhexilo	Compuesto orgánico	Filtro UV
Hialuronato de sodio	Orgánico (sal de sodio del ácido hialurónico)	Hidratante
Acetato de tocoferilo	Orgánico (Forma de vitamina E sintética. liposoluble, lo que significa que no se disuelve en agua)	Antioxidante y Acondicionador de la piel
Goma xantana	Orgánico ((producido por fermentación de carbohidratos)	Agente espesante y estabilizante
Tocoferol	Orgánico (La vitamina E es un nutriente que se encuentra en el cuerpo. Es una vitamina liposoluble, lo que significa que no se disuelve en agua sino en grasas)	Antioxidante
Tropolona	Compuesto orgánico	Agente antimicrobiano
Palmitato de ascorbilo	Orgánico (éster formado por el ácido ascórbico y el ácido palmítico creando una forma liposoluble de vitamina C)	Antioxidante
Ácido ascórbico	Orgánico (Vitamina C)	Antioxidante
Ácido cítrico	Orgánico (se extrae de frutas cítricas como limones y naranjas)	Regulador del pH