

IDENTIFICACIÓN DE RETOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE
APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS Y REÚSO DE AGUAS GRISES EN
PREDIOS RESIDENCIALES DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

Kamila Valentina Delgado Ariza

Julián David Toloza Barrera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Este trabajo de grado es el fruto de nuestro esfuerzo, dedicación y compromiso, y queremos dedicarlo a todos aquellos que nos acompañaron y brindaron su apoyo incondicional durante esta etapa.

A nuestras familias, quienes siempre han sido nuestro pilar y nuestra fuente de motivación. Gracias por su amor y por creer en nosotros.

Agradecemos profundamente al profesor Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, quien, con su guía, conocimiento y apoyo invaluable, nos orientó a lo largo de este proyecto. Su dedicación y compromiso con nuestra formación fueron claves para alcanzar este logro.

Finalmente, dedicamos este trabajo a la Universidad Industrial de Santander y al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental-GPH, que nos brindaron las herramientas y espacios para formarnos como profesionales.

Con gratitud y orgullo.

Kamila Valentina Delgado Ariza

Julián David Toloza Barrera

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
Planteamiento y justificación del problema	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivos General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias	14
2.1.1 Descripción	14
2.1.2 Calidad del Agua.....	15
2.1.3 Tecnologías de Tratamiento.....	17
2.2 Sistemas de Reúso de Aguas Grises	17
2.2.1 Descripción	17
2.2.2 Calidad del Agua.....	18
2.2.3 Tecnologías de Tratamiento.....	19
2.3 Factibilidad de los Sistemas Híbridos de AALL Y RAG	21
2.3.1 Técnica.....	21
2.3.2 Social.....	22
2.3.3 Financiera.....	22
2.3.4 Ambiental.....	23
3. Metodología	23

3.1 Fase 1. Análisis de las Variables Técnicas, Ambientales, Sociales Y Financieras de los Estudios de Factibilidad De Sistemas de Reúso de AG y Aprovechamiento de All	23
3.1.1 Revisión Bibliográfica	23
3.1.2 Selección de los casos de estudio.....	23
3.1.3 Comparación de Indicadores.....	27
3.2 Fase 2. Identificación de Los Requerimientos Técnicos, Financieros, Institucionales Normativos, Socioculturales Para la Instalación, Puesta en Marcha Y Operación de los SAALL Y RAG A Nivel Residencial en el Contexto Del AMB.....	27
3.2.1 Búsqueda de Literatura Internacional	27
3.2.2 Estructuración de la Información.....	31
3.3 Identificación de Retos	31
4. Resultados y Discusiones.....	32
4.1 Indicadores Técnicos, Sociales, Ambientales Y Financieros	32
4.1.1 Caracterización de los Predios	32
4.1.2 Características Físicas de la Infraestructura Residencia	33
4.1.3 Aceptación Social del Reúso	35
4.1.4 Fuentes de Agua Gris y Aguas Lluvias.....	37
4.1.4.1 Calidad del Agua Gris Tratada y el Agua Lluvia.	38
4.1.5 Usos del Agua Tratada.....	40
4.1.5.1 Aguas Lluvias.	40
4.1.5.2 Aguas Grises.	42
4.1.6 Trenes de Tratamiento	44
4.1.7 Características Económicas	49

4.1.8 Disponibilidad para Pagar.....	52
4.1.9 Disponibilidad de Operación y Mantenimiento.....	53
4.1.10 Ahorro Agua Potable	54
4.2 Desafíos.....	58
4.2.1 Investigación y desarrollo tecnológico local.....	58
4.2.2 Políticas y marcos regulatorios	59
4.2.3 Estandarización de las normas técnicas	60
4.2.4 Certificaciones	61
4.2.5 Proyectos Demostrativos	61
4.2.6 Sensibilización a los usuarios	62
4.2.7 Incentivos económicos.....	63
5. Conclusiones.....	64
Referencias Bibliográficas	66
Apéndices.....	73

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Calidad del agua lluvia en Colombia</i>	16
Tabla 2. <i>Calidad del agua gris de diferentes fuentes</i>	19
Tabla 3. <i>Análisis comparativo entre sistemas de tratamiento de aguas grises centralizados y descentralizados</i>	21
Tabla 4. <i>Proyectos relacionados sobre el reúso de AG y aprovechamiento ALL realizados por el grupo de investigación en recursos hídricos de la Universidad Industrial de Santander</i>	24
Tabla 5. <i>Parámetros de calidad del agua gris en diferentes países y los datos obtenidos en el caso de estudio del barrio La Victoria</i>	39
Tabla 6. <i>Calidad del agua lluvia para uso no potable</i>	40
Tabla 7. <i>Comparación de la Contribución relativa de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido en diferentes condiciones socioeconómicas</i>	57
Tabla 8. <i>Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido – edificio estrato medio Tribecca.</i>	82
Tabla 9. <i>Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido – edificio estrato alto Cabecera del Llano</i>	82
Tabla 10. <i>valor absoluto y contribución relativa de los impactos de la fase de construcción y operación del Sistema híbrido– edificio estrato alto Toscana</i>	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ubicación geográfica de los casos de estudio</i>	26
Figura 2. <i>Esquema del proceso de filtrado de la búsqueda sistemática</i>	29
Figura 3. <i>Distribución de artículos seleccionados por año (n=217 artículos)</i>	30
Figura 4. <i>Distribución seleccionados por continente (n=25 artículos)</i>	31
Figura 5. <i>Datos demográficos de los casos de estudio</i>	33
Figura 6. <i>Características y consumo de las viviendas de los casos de estudio</i>	34
Figura 7. <i>Aceptación social al reúso de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias en los casos de estudio</i>	35
Figura 8. <i>Preferencias de uso del ALL en los casos de estudio</i>	41
Figura 9. <i>Preferencias de uso del AG en los casos de estudio</i>	42
Figura 10. <i>Fuentes y usos finales de las aguas AG y ALL tratadas</i>	43
Figura 11. <i>Trenes de tratamiento planteados en cada caso de estudio</i>	45
Figura 12. <i>Características económicas de los casos de estudio</i>	50
Figura 13. <i>Disponibilidad a pagar por los sistemas de reúso de AG y aprovechamiento de ALL en los casos de estudio</i>	52
Figura 14. <i>Ahorro anual de agua potable en los casos de estudio</i>	54
Figura 15. <i>Ahorro anual de agua potable por unidad de vivienda en los casos de estudio</i>	55

Lista de apéndices

Apéndice A. Características del agua en diferentes tecnologías.....	73
Apéndice B. Literatura internacional sobre el reúso de AG y aprovechamiento de ALL	74
Apéndice C. Características de las viviendas objeto de estudio	76
Apéndice D. Tabla Calidad del AGC generada en la vivienda de estudio del Barrio La Victoria por (Burgos Arias, 2024)	81
Apéndice E. Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida.	82

Resumen

Título: Identificación de retos para la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y reúso de aguas grises en predios residenciales del área metropolitana de Bucaramanga.

Autor: Kamila Valentina Delgado Ariza, Julian David Toloza Barrera

Palabras Clave: agua lluvia, agua gris, tratamiento de aguas, reúso, viabilidad, tecnologías, sistemas, sensibilización, ahorro de agua potable, aceptación.

Descripción: La escasez del recurso hídrico es uno de los mayores desafíos globales actuales. El crecimiento poblacional, el cambio climático y la gestión inadecuada del agua han llevado a un agotamiento del recurso vital. Es urgente adoptar y desarrollar medidas para disminuir el consumo de agua potable. Es por eso que, la implementación de sistemas descentralizados para el aprovechamiento de aguas lluvias (SAALL) y reúso de aguas grises (RAG) en viviendas o edificaciones es una alternativa prometedora para hacer un uso más eficiente del agua, reduciendo la presión sobre los sistemas de abastecimiento tradicionales y promoviendo la sostenibilidad. Por ende, este estudio analiza los desafíos y oportunidades relacionados con la puesta en marcha de sistemas híbridos de AALL y RAG en viviendas y edificaciones del área metropolitana de Bucaramanga (AMB). Para tal efecto, se analizaron y compararon estudios previos realizados en el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), los trabajos abarcaron la factibilidad técnica, social, financiera y ambiental de sistemas híbridos de AALL y RAG en dos viviendas y dos edificaciones del AMB. En este estudio se compararon 38 indicadores, entre esos, el consumo de agua potable en las viviendas según el estrato socioeconómico, la aceptación social al reúso, costo de inversión de los SAALL y RAG, que permitieron identificar las diferencias técnicas, sociales y de costos asociadas a la implementación de estos sistemas según el tipo de predio y contribuyeron a reconocer siete desafíos para la puesta en marcha de los mismos. Entre los retos identificados para la implementación en el AMB se encuentran la falta de estandarización de las normas técnicas, sensibilización a los usuarios, incentivos económicos, certificaciones, proyectos demostrativos, investigación y desarrollo tecnológico local, políticas y marcos regulatorios. Los resultados de esta investigación aportan conocimiento sobre la viabilidad y el potencial de los sistemas híbridos en la gestión del recurso hídrico en áreas urbanas, y ayudan a diseñar políticas públicas y programas de promoción que fomenten su implementación a mayor escala.

Abstract

Title: Identifying challenges for the implementation of rainwater harvesting and greywater reuse systems in residential properties within the metropolitan area of Bucaramanga

Author(s): Kamila Valentina Delgado Ariza, Julian David Toloza Barrera

Key Words: rainwater, grey water, water treatment, reuse, feasibility, technologies, systems, awareness, saving drinking water, acceptance.

Description: The scarcity of water resources is one of the greatest current global challenges. Population growth, climate change, and inadequate water management have led to the depletion of this vital resource. It is urgent to adopt and develop measures to reduce drinking water consumption. Thus, implementing decentralized systems for rainwater harvesting (RWH) and greywater reuse (GWR) in homes or buildings is a promising alternative to make water use more efficient, reducing pressure on traditional supply systems and promoting sustainability. Therefore, this study analyzes the challenges and opportunities related to implementing hybrid systems of RWH and GWR in homes and buildings in the metropolitan area of Bucaramanga (AMB). For this purpose, previous studies conducted by the Water Resources and Environmental Sanitation (GPH) research group at Universidad Industrial de Santander (UIS) were analyzed and compared. These studies covered the technical, social, financial, and environmental feasibility of hybrid RWH and GWR systems in two households and two buildings in the AMB. In this study, 38 indicators were compared, including drinking water consumption in homes based on socioeconomic strata, social acceptance of reuse, and investment costs of RWH and GWR systems, which helped identify technical, social, and cost differences associated with the implementation of these systems depending on the type of property, and contributed to recognizing 7 challenges for their implementation. The identified challenges for implementation in the AMB include the lack of standardization of technical regulations, user awareness, economic incentives, certifications, demonstration projects, research and local technological development, policies, and regulatory frameworks. The results of this research provide knowledge about the viability and potential of hybrid systems in water resource management in urban areas and help design public policies and promotion programs that encourage their large-scale implementation.

Introducción

El mundo se enfrenta a una escasez hídrica que se agudiza por el crecimiento poblacional, el cual incrementa la demanda de agua para consumo humano y agrícola, además, el cambio climático aumenta los periodos de sequía y consecuentemente reduce el agua disponible. Con lo anterior se espera que el consumo mundial de agua aumente en un 20% a 30% para 2050 (Zeng et al., 2013).

La necesidad urgente de buscar alternativas sostenibles para garantizar el acceso al agua, ha llevado al análisis de alternativas como el RAG y el AALL para usos no potables, cabe resaltar que en Colombia no se cuenta con suficientes Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), por lo que un gran porcentaje de agua no es tratada antes de ser depositada en las fuentes hídricas y asimismo los sistemas tradicionales no están cubriendo la demanda de agua potable del actual crecimiento poblacional, por ende, es fundamental el uso de los SAALL y RAG.

En países como Australia, España y Brasil han implementado con éxito sistemas descentralizados para el aprovechamiento de aguas lluvias (SAALL) y reúso de aguas grises (RAG), y han demostrado ser una solución eficaz para satisfacer la creciente demanda de agua no potable como riego, limpieza o descarga de sanitarios (Rodríguez et al., 2022).

En el área metropolitana de Bucaramanga (AMB), se han desarrollado proyectos desde el grupo de investigación GPH de factibilidad técnica, social y financiera que contribuyen a identificar la posibilidad de implementar dichos sistemas en nuevos proyectos urbanísticos, los estudios fueron realizados en dos predios tipo vivienda unifamiliar y dos tipo apartamento. Es importante realizar este análisis, ya que se ha observado un crecimiento significativo en edificaciones multifamiliares de estratos 3 y 4 en el AMB (Cala et al., 2017), y aunque actualmente no se presenten situaciones de estrés hídrico en el AMB, si se ha observado en

ciudades vecinas como Bogotá, lo que muestra que no se está exento que ocurra lo mismo en el AMB, teniendo en cuenta como han cambiado las condiciones climáticas a nivel mundial y que ya son muy poco predecibles los comportamientos ambientales, en ese contexto, la implementación de SAALL y RAG en edificaciones verticales contribuiría de manera significativa a abordar escenarios de escasez hídrica futura en el AMB.

Los estudios han analizado de manera individual, cada uno de los predios. Sin embargo, no hay un análisis que compare y contraste los resultados técnicos, sociales, financieros y ambientales encontrados en los SAALL y RAG con otros estudios reportados en la literatura y, a partir de dicho análisis, identificar los retos para su implementación y puesta en marcha a escala real. Por lo tanto, este trabajo tiene como propósitos: i) Proponer retos técnicos, financieros, institucionales, ambientales, normativos y sociocultural para la implementación de SAALL y RAG a nivel residencial, en el contexto del AMB (Colombia), y más específicamente busca ii) analizar las variables técnicas, ambientales, sociales y financieras de los estudios de factibilidad de SAALL y RAG realizadas en áreas residenciales del AMB e iii) identificar los requerimientos técnicos, financieros, institucionales, ambientales, normativos, y socioculturales para la instalación, puesta en marcha y operación de los SAALL y RAG a nivel residencial en el contexto del AMB.

Con la implementación de estos proyectos, se contribuye a la gestión eficiente del agua, reducción de la contaminación de cuerpos de agua y mitigación de los efectos del cambio climático al promover un uso más responsable de los recursos naturales.

Planteamiento y justificación del problema

El último censo realizado en Bucaramanga muestra una población de alrededor de 619,703 habitantes, y se estima que para el año 2035 sea alrededor de 648,700 (DANE, 2023), de éstos, 597,316 (98.33%) habitan en la zona urbana mientras que 10,112 (1.67%) se ubican en la zona rural. Se ha observado un crecimiento significativo en edificaciones multifamiliares de estratos 3 y 4 (Cala et al., 2017). En ese contexto, la implementación de sistemas híbridos descentralizados de reúso de AG y ALI en edificaciones verticales contribuiría de manera significativa a abordar escenarios de estrés hídrico del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB).

En el AMB diversos estudios han abordado la factibilidad técnica, financiera, social y ambiental para el reúso de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias en predios residenciales. A partir de dichos estudios, se analizarán las acciones requeridas para la implementación de sistemas descentralizados para el reúso de AG y el aprovechamiento de ALL. Concretamente, se considerarán los siguientes estudios realizados en el marco del grupo GPH de la UIS (Monroy Sanchez & Zambrano Aparicio, 2018) (Rivera Sánchez & Zaraza Peña, 2015) (Guerrero Ferreira, 2017) (Mendoza Santos & Rincon Mendez, 2016)(Gomez Monsalve, 2020)(Bohórquez Lopez & Martínez Redondo, 2022)(Avellaneda Galvis & Salcedo Parada, 2019)(Gomez Rozo & Silva Lara, 2019)(Burgos Arias, 2024). Lo anterior implica, además, revisar el marco político y normativo relacionado con el sector de agua potable y saneamiento, para identificar los retos para la implementación de estos sistemas alternativos.

En efecto, conectar estos descubrimientos con evaluaciones precisas para diseñar estrategias de gestión de recursos hídricos e implementar planes de acción a nivel local que puedan satisfacer la demanda de agua para usos no potables es indispensable. Esto resulta

especialmente crítico para avanzar y lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible, garantizar el acceso sostenible al agua y al saneamiento para todos (#6) y abordar de manera urgente el cambio climático y sus impactos (#13) (THE 17 GOALS Sustainable Development, 2015).

1. Objetivos

1.1 Objetivos General

Proponer retos técnicos, financieros, institucionales, ambientales, normativos y sociocultural para la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y reúso de aguas grises a nivel residencial, en el contexto del Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia).

1.2 Objetivos Específicos

Analizar las variables técnicas, ambientales, sociales y financieras de los estudios de factibilidad de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias y reúso de aguas grises realizadas en áreas residenciales del AMB.

Identificar los requerimientos técnicos, financieros, institucionales, ambientales, normativos, y socioculturales para la instalación, puesta en marcha y operación de los sistemas de reúso de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias a nivel residencial en el contexto del AMB.

2. Marco Teórico

2.1 Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias

2.1.1 Descripción

En varios países, como China, Brasil, Australia e India, se han considerado y utilizado las aguas pluviales como opciones para el autoabastecimiento. De hecho, en estos lugares, se ha vuelto obligatorio incluir un Sistema de Almacenamiento y Reutilización de Aguas Pluviales en

la fase de planificación urbana (Aladenola & Adeboye, 2010) citado por (García-Ávila et al., 2023).

Los periodos de intensas lluvias, combinados con superficies de menor permeabilidad, generan un incremento en los caudales máximos y en el volumen de escorrentía de aguas pluviales. Esta situación resulta en inundaciones más graves y frecuentes debido al arrastre de partículas que obstruyen los sistemas de drenaje combinados que abarcan tanto el alcantarillado como la escorrentía pluvial (Agencia Europea de Medio Ambiente (Organismo o agencia de la UE) et al., 2009). Por ende, es beneficioso recolectar esta agua, que puede ser utilizada para una variedad de fines, ya sea que requieran tratamiento o no.

2.1.2 Calidad del Agua

Respecto al agua lluvia, su calidad depende de las condiciones ambientales del área donde se recolecta. Elementos como la presencia de contaminantes en el aire, incluyendo partículas de polvo, gases industriales y emisiones vehiculares, pueden afectar la pureza del agua al combinarse con las gotas de lluvia (Mendez et al., 2011). Además, la superficie sobre la cual cae y es recolectada el agua lluvia influye en su calidad, por ejemplo, en los techos puede haber presencia de sedimentos, residuos metálicos o materia orgánica (Campisano et al., 2017). La proximidad a fuentes de contaminación, como zonas urbanas densamente pobladas o áreas industriales, también juega un papel importante ya que puede contaminar el agua lluvia. En conjunto, estos factores determinan si el agua lluvia captada es apta para su uso directo o si requiere tratamiento adicional.

Tabla 1*Calidad del agua lluvia en Colombia*

	PH	SST Mg/l	Turb UNT	DBO MgO ₂ /l	CT UFC/100ml
Agua lluvia limpia (La Bocana) ¹	6.8	-	1.2	-	0
Agua que cae del techo (La Bocana) ¹	7.0	-	1.2	-	-
Agua que cae al techo (fibrocemento) ²	8.3	104	24	-	44
Agua que cae al techo (Soacha) ²	7.4	149	17	-	-
Agua que cae al techo (Kennedy) ²	8.0	124	21	20	-
Agua que cae al piso ³	5.7	-	2.2	-	132
Normativa de reúso urbano no potable ⁴	6-9	-	<2	<10	0

Nota 1. SST: Sólidos suspendidos totales, Turb: Turbiedad, DBO: demanda biológica de Oxígeno, CT: Coliformes totales, N: Parámetro no medido. ¹ Sánchez y Caicedo (2002), ² Torres et al. (2011), ³ Ospina y Ramírez (2014), ⁴ USEPA (2012).

Nota 2. La **Tabla 1** presenta los factores microbiológicos del agua lluvia obtenidos en diferentes ubicaciones y con diferentes tipos de techos en Colombia. Tomado de (Mendoza Santos & Rincon Mendez, 2016).

Como se observa en la **Tabla 1**, el agua lluvia recolectada en diferentes condiciones presenta niveles de pH aceptables, mientras que la turbiedad en algunos casos está en niveles por fuera de los parámetros, en el caso de los coliformes totales los registros están alejados de lo permitido en el caso del agua lluvia que cae al suelo y el techo de fibrocemento, esto puede deberse a la presencia de materia orgánica de algunos animales en la superficie del techo, por tal motivo, es fundamental realizar el proceso de tratamiento para su aprovechamiento.

2.1.3 Tecnologías de Tratamiento

Los sistemas de recolección de agua lluvia, emergen como una alternativa prometedora para reforzar la seguridad en el suministro de agua para uso residencial no potable y mitigar la explotación sobre los recursos hídricos y los sistemas urbanos de drenaje pluvial (Almeida et al., 2023).

Los sistemas de recolección de agua lluvia presentan una estructura de captación a través de canaletas, almacenamiento mediante tanques y distribución por medio de redes de tuberías. El buen uso de las aguas lluvias conlleva ventajas ambientales. Al aprovechar el agua lluvia mediante estos sistemas, se incrementa la disponibilidad de reservas hídricas y se reduce el agotamiento de las fuentes de agua (Abdulla & Al-Shareef, 2006).

Para el uso del agua lluvia es necesario un sistema de tratamiento, ya que los techos pueden contener contaminantes que perjudican la calidad del agua. El sistema contiene desviadores de descarga y luego filtros para impedir el acceso de impurezas como hojas, insectos y contaminantes orgánicos, también se pasa por otro filtro para retirar partículas en suspensión, son utilizados filtros con membrana, carbón activado y cloración, también, en algunos casos podrían ser necesarios sedimentadores y filtros lentos de arena para mejor la calidad bacteriológica del agua lluvia (Abbasi & Abbasi, 2011; Monroy Sanchez & Zambrano Aparicio, 2018).

2.2 Sistemas de Reúso de Aguas Grises

2.2.1 Descripción

La reutilización de aguas grises (AG) implica un proceso que comienza con la recolección de aguas residuales provenientes de actividades domésticas como lavar platos, ropa o ducharse, a diferencia de las aguas negras que provienen de los sanitarios. Estas AG se someten a un

tratamiento que incluye la separación de residuos gruesos, filtración y sedimentación para eliminar sólidos suspendidos y trampas de grasa para separar aceites y grasas. Luego, se lleva a cabo un tratamiento adicional para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, mediante filtración biológica o desinfección con cloro. Una vez tratadas, las aguas grises se almacenan y pueden ser redistribuidas para usos no potables como riego de jardines, descarga de inodoros o lavado de pisos. Este proceso requiere un diseño cuidadoso del sistema, mantenimiento regular y cumplimiento de regulaciones locales para garantizar la calidad del agua tratada y proteger la salud pública y el medio ambiente (Monroy Sanchez & Zambrano Aparicio, 2018).

2.2.2 Calidad del Agua

La calidad del agua gris depende de su fuente de origen y de los productos y sustancias que se utilizan en las actividades domésticas o industriales que generan este tipo de agua. Por ejemplo, el agua gris proveniente de lavamanos, duchas y lavadoras puede contener residuos de jabón, detergentes, productos de limpieza, aceites, grasas y materia orgánica. La calidad también puede variar según el nivel de uso de productos químicos, como suavizantes y desinfectantes, así como la presencia de microorganismos patógenos (Allen et al, 2010). Además, la frecuencia y el tipo de mantenimiento de los sistemas de drenaje y almacenamiento pueden influir en la contaminación del agua gris. Estos factores combinados determinan si el agua gris es adecuada para su reúso directo o si requiere tratamiento antes de ser utilizada para riego, descarga de inodoros u otras aplicaciones no potables.

Tabla 2*Calidad del agua gris de diferentes fuentes*

Fuente de agua gris	pH	SS Mg/l	SST Mg/l	Turb UNT	DBO MgO ₂ /l	CT UFC/100ml	Cl. Residual Mg/l
DU, LM, LA, LP ¹	6.99	398	850	150	936	-	-
DU, LM, LA ²	7	88.4	-	130	-	-	-
DU, LM, LA, LP ³	7.5	244	2380	167	-	155000	-
Promedio	7	243	1615	149	936	155000	-
Normativas							
E.E.U.U ⁴	6-9	-	-	<2	<10	0	>0.5
Canadá ⁵	-	-	<10	<2	<10	<1	-
Australia ⁶	6-9	<5	-	<2	<10	<10	>1

Nota 1. SS: Sólidos suspendidos, SST: Sólidos suspendidos totales, Turb: Turbiedad, DBO: Demanda biológica de Oxígeno, CT: Coliformes totales, Cl. Residual: Cloro residual. DU: Ducha, LM: Lavamanos, LA: Lavadora, LP: Lavaplatos. 1Parra, Carrillo y Velandia (2015),

2Ardila (2013), 3 Moreno y Quintero (2014), 4USEPA (2012), 5CMHC (2013), 6 VEPA (2003).

Nota 2. La Tabla 2 presenta los factores microbiológicos del agua gris obtenidos de diferentes fuentes y comparada con las regulaciones internacionales que rigen el reúso de estas aguas.

Tomado de (Mendoza Santos & Rincon Mendez, 2016).

Como se observa en la **Tabla 2**, las fuentes de duchas, lavamanos, lavadora, lavaplatos,

presentan datos muy elevados, por lo menos para los SST los valores admisibles para el reúso

son de 10 mg/L y los resultados muestran valores mayores de 850 mg/L, lo mismo ocurre con la

DBO y los coliformes totales, por ende, es fundamental realizar el proceso de tratamiento para

su reutilización.

2.2.3 Tecnologías de Tratamiento

El proceso de reutilización se inicia al recolectar las aguas grises generadas por el uso de

lavamanos, lavaderos, lavadoras y/o duchas. Estas aguas son luego dirigidas hacia distintos

procesos de tratamiento, mejorando su calidad para ser utilizadas posteriormente en actividades que no requieran agua potable. La cantidad y composición de las aguas grises producidas varían significativamente según el tamaño del hogar, el suministro de agua y la ubicación geográfica del país, entre otros aspectos (Filali et al., 2022; Gomez Monsalve, 2020).

En los países en desarrollo suele emplearse un proceso de tratamiento para las AG que incluye estaciones de cribado, sedimentación, filtración y desinfección como los procesos principales (Friedler, 2004; Ghaitidak & Yadav, 2013).

Los sistemas híbridos son esquemas descentralizados, están conformados por infraestructuras diseñadas para tratar, gestionar y suministrar agua a nivel local o de pequeña escala, este proceso aporta en gran medida al ahorro de costos, al ahorro de los recursos y el cuidado del medio ambiente. En la **Tabla 3** se compara un sistema centralizado y descentralizado de agua potable y no potable respectivamente. Los costos de inversión y demanda energética de los sistemas centralizados son mucho más altos en comparación con los sistemas descentralizados, ya que necesitan mayor infraestructura para poder operar y distribuir el agua potable. Los sistemas descentralizados son más adecuados para usos pequeños que no requieran agua potable como riego de jardines, limpieza o descarga de sanitarios.

Tabla 3

Análisis comparativo entre sistemas de tratamiento de aguas grises centralizados y descentralizados

	Centralizado	Descentralizado
Costo de inversión	Más alto	Más bajo
Consumo de energía	Más alto	Más bajo
Costo por m³	Más bajo	Más alto
Usos del agua	Riego agrícola	Riego de jardines, cisternas de WC
Ejemplo	Recuperación de la región de Dan Proyecto (Shafdan) en Israel	Edificios de viviendas en Sant Cugat del Vallmis (Barcelona, España)

Nota. La Tabla 3 presenta la diferencia entre usar un sistema centralizado y uno descentralizado. Tomado de (Rodríguez et al., 2022).

Para ser utilizada el agua gris debe pasar por varias etapas tratamiento, el grado de limpieza depende del uso final que se le vaya a dar, se le aplica un tratamiento ya sea de tipo preliminar, primario, secundario o terciario, a través de herramientas y equipos como filtros, sistemas de bombeo, tanques de sedimentación, reactores biológicos, sistemas de membrana, sistemas de desinfección y medidores de potencial de Hidrógeno (pH) y turbidez, entre otros (**Apéndice A**). Los usos más aceptados socialmente son para lavado de inodoros y limpieza de jardines (Burgos Arias, 2024).

2.3 Factibilidad de los Sistemas Híbridos de AALL Y RAG

2.3.1 Técnica

Es importante realizar la caracterización de las aguas, tanto en calidad como en cantidad, para determinar el tratamiento necesario. El diseño del sistema debe contemplar aspectos como el tipo de componentes, la capacidad de almacenamiento y la red de distribución. Es fundamental

evaluar los procesos de tratamiento adecuados para garantizar la calidad del agua reutilizada. Además, se debe considerar espacio disponible y personal competente.

2.3.2 Social

Los factores sociales incluyen la percepción y aceptación de la comunidad hacia la reutilización de aguas tratadas, los hábitos de consumo de agua, los aspectos culturales y la participación ciudadana. Es necesario realizar un análisis de estos factores por medio de encuestas, charlas informativas, capacitaciones y talleres para diseñar un sistema que sea socialmente aceptable y sostenible a largo plazo, en donde se concientiza y enseña a las personas del uso correcto de esta agua, además de motivarlos a la búsqueda del cuidado ambiental. La participación activa de la comunidad en todas las fases del proyecto es clave para garantizar su éxito y asegurar que los beneficios de la reutilización del agua sean compartidos por todos.

2.3.3 Financiera

Para evaluar la viabilidad financiera de un SAALL y RAG, se debe realizar un análisis económico detallado, considerando los costos iniciales de inversión, operación y mantenimiento. Además, efectuar una investigación de indicadores financieros como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), relación costo/beneficio y el periodo de recuperación de la inversión, permiten medir la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo. Asimismo, considerar los cambios en variables externas, como los precios de la energía o los incentivos gubernamentales, pueden afectar la rentabilidad del proyecto. Estos análisis permiten tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos y garantizar el éxito financiero del proyecto (Morales-Pinzón et al., 2014).

2.3.4 Ambiental

Factores como el análisis del clima, la calidad del agua, la vegetación, el suelo y la legislación vigente influyen en la factibilidad ambiental. El clima afecta en la cantidad de agua disponible, la calidad del agua se determina por los contaminantes presentes, la vegetación y el suelo afectan la infiltración y la calidad del agua. Además, es fundamental cumplir con la normativa ambiental para garantizar un manejo adecuado del agua y evitar impactos negativos en el medio ambiente. El análisis de ciclo de vida es beneficioso puesto que realiza una comparación entre los sistemas convencionales y sistemas híbridos, evaluando el impacto ambiental generado por los dos sistemas, teniendo en cuenta las etapas del uso del agua desde la captación hasta su deposición final.

3. Metodología

3.1 Fase 1. Análisis de las Variables Técnicas, Ambientales, Sociales Y Financieras de los Estudios de Factibilidad De Sistemas de Reúso de AG y Aprovechamiento de All

3.1.1 Revisión Bibliográfica

Se realizó una revisión de la literatura local sobre SAALL y RAG, utilizando las bases de datos disponibles en la UIS, como Scopus® y Web of Science®, así como el repositorio institucional de trabajos de grado a nivel de pregrado y posgrado. La revisión se centró en esta primera fase, en trabajos realizados por el grupo de investigación GPH, ya que estos proyectos fueron realizados en el contexto local del Área Metropolitana de Bucaramanga.

3.1.2 Selección de los casos de estudio

De los estudios realizados por el grupo GPH de la UIS, se tomaron en cuenta los documentos afines al propósito de este proyecto y se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Proyectos relacionados sobre el SAALL y RAG realizados por el grupo GPH de la UIS.

Titulo	Autores	Año	Estrato socioeconómico	Habitantes vivienda	N° de encuestados
Factibilidad Técnica, Social Y Financiera De La Implementación De Un Sistema De Reúso De Aguas Pluviales Y AG En Un Edificio Estrato Seis Del Área AMB Colombia.	Guerrero Ferreira	2017	6	4	35
Evaluación De La Viabilidad Social, Técnica Y Económica De La Implementación De Un Sistema De Recolección, Tratamiento Y Aprovechamiento De ALL Y AG En Un Proyecto De Vivienda De Interés Social.	Mendoza Santos & Rincon Mendez	2016	1	4	65
Viabilidad Técnica, Financiera Y Social En La Implementación De Un Sistema Para El Reúso De AG Y Aprovechamiento De AG En Apartamentos Estrato Tres Del AMB, Colombia.	Monroy Sanchez & Zambrano Aparicio	2018	3	3	41
Factibilidad Técnica Y Económica De Un Sistema Hidrosanitario Para La Reutilización De AG Y ALL, Caso De Estudio En Vivienda De Alto Consumo Del AMB. Colombia.	Rivera Sánchez & Zaraza Peña	2015	6	4	42
Factibilidad Ambiental De Un Sistema Híbrido De Aprovechamiento De ALL Y Reutilización De AG En Una Vivienda De Alto Consumo	Gomez Monsalve	2020	6	No aplica	No aplica
Evaluación De Opciones Tecnológicas Para El Tratamiento De AG Con Fines De Reúso En Edificios Residenciales En El Contexto Del AMB (Colombia)	Paula Avellaneda & Adriana Salcedo	2019	No aplica	No aplica	No aplica
Evaluación De La Factibilidad Ambiental De Sistemas Híbridos De Aprovechamiento ALL Y Reúso De AG En Dos Tipos De Vivienda	Bohórquez López Y Martínez Redondo	2022	6 - 3	No aplica	No aplica

Multifamiliar De Alto Y Bajo Consumo De Agua En El AMB.					
Propuesta De Tecnologías Para El Tratamiento De Aguas Lluvias, Como Opción Para Su Aprovechamiento En Viviendas Unifamiliares. Caso De Estudio: Bucaramanga (Colombia)	Gómez Rozo Y Silva Lara	2019	No aplica	No aplica	No aplica
Evaluación De Sistemas De Tratamiento Y Reúso De Aguas Grises Claras, Aplicables A Un Sector Residencial Del AMB. Caso De Estudio: Barrio La Victoria.	Burgos Arias	2024	4	3 a 4	132

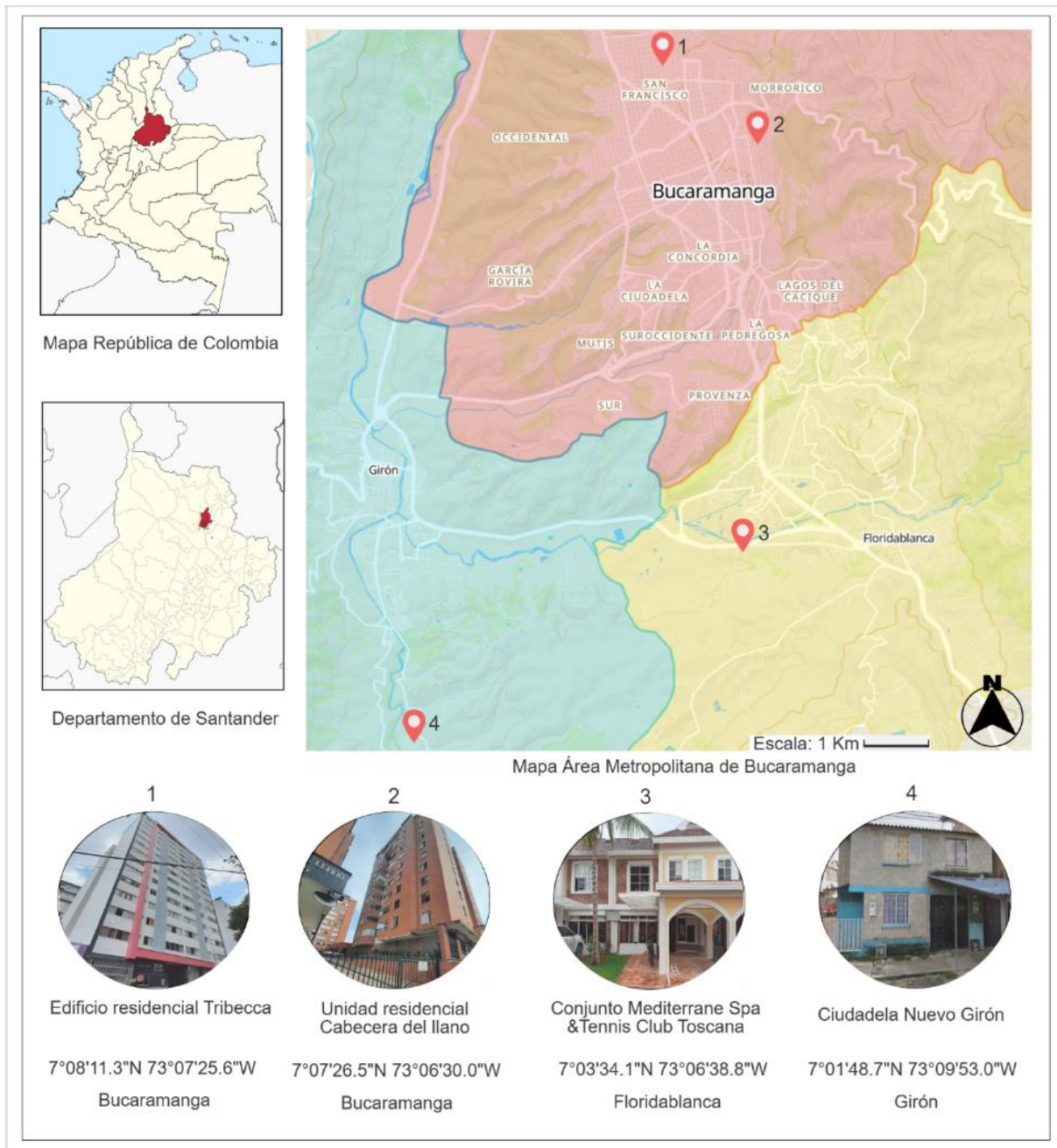
Nota. La Tabla 4 presenta el listado de documentos analizados en el presente trabajo, realizados por el grupo GPH.

Los trabajos revisados tuvieron en cuenta factores técnicos, ambientales, sociales, financieros y tecnologías de tratamiento que podrían ser aplicadas para implementación de SALL y RAG en diferentes estratos socioeconómicos del AMB; además, uno de ellos desarrolló un trabajo de campo, donde se midió la cantidad de agua potable utilizada por los habitantes de la vivienda de estudio y posterior a ello determinaron la calidad del agua generada en duchas y lavamanos, y por último, evaluó la percepción social con respecto al reúso (Burgos Arias, 2024). Estos estudios son insumo clave para esta investigación puesto que aportan valiosos datos en los ámbitos sociales y de calidad del agua gris y el agua lluvia en el contexto del AMB.

La ubicación geográfica de los proyectos, se realizó en un mapa del AMB (**Figura 1**), con el fin de identificar los sectores y condiciones de cada caso de estudio.

Figura 1

Ubicación geográfica de los casos de estudio



Nota. La Figura 1 presenta la ubicación geográfica de los casos de estudio analizados.

3.1.3 Comparación de Indicadores

Se revisó cada uno de los estudios de factibilidad técnica, social, económica y ambiental realizados en el AMB. Se identificaron y agruparon los parámetros relevantes según sus atributos, organizados en un cuadro comparativo (**Apéndice C**), ya que de este modo es más sencillo detallar y contrastar la información de cada tipo de vivienda. Adicionalmente, se realizaron figuras para comparar las características del mismo tipo en diferentes contextos sociales: las cuales son aceptación social del reúso (**Figura 7**), fuentes y usos del agua lluvia y aguas grises (**Figura 8, 9 y 10**), datos demográficos (número de predios, estrato, número de habitantes) (**Figura 5**), características de la vivienda (consumo por habitante, áreas, materiales) (**Figura 6**), trenes de tratamiento propuestos por los autores de cada estudio analizado (**Figura 11**), características e indicadores económicos (los costos iniciales de inversión, los costos de operación y mantenimiento, relación B/C, TIR, inflación, tiempo de retorno, valor presente neto) (**Figura 12**), en el (**Figura 13**) disponibilidad a pagar por sistema de tratamiento, y por último, el (**Figura 14 y 15**) presenta los ahorros en agua potable en cada investigación.

3.2 Fase 2. Identificación de Los Requerimientos Técnicos, Financieros, Institucionales Normativos, Socioculturales Para la Instalación, Puesta en Marcha Y Operación de los SAALL Y RAG A Nivel Residencial en el Contexto Del AMB

3.2.1 Búsqueda de Literatura Internacional

Para determinar los requerimiento técnicos, financieros, institucionales, normativos y socioculturales, se realizó una revisión de literatura que incluyó información sobre aceptación social, diseño, costo, gestión y operación de los SAALL y RAG. Se consultó en bases de datos como Scopus®, Web of Science®, MDPI® y revistas especializadas como Water, se combinaron

palabras claves para limitar la búsqueda tales como “rainwater”, “greywater” “reuse”, “technologies” y “systems”.

Se elaboró una ecuación de búsqueda la cual suministró un total de 1100 artículos. Se aplicaron los filtros necesarios para descartar categorías no deseadas, el proceso de filtrado consideró tres etapas: (1) Revisión inicial, donde se evaluaron los títulos y resúmenes para descartar artículos irrelevantes, debido a los filtros se redujo a 217 artículos. (2) Evaluación detallada, en la que se eligieron los artículos más sobresalientes y se compararon los datos obtenidos de diferentes fuentes para identificar los artículos en base al título, número de citas, autores, año de publicación, país de origen y editorial. Consecuentemente, se disminuyó el número de documentos a 77 artículos; (3) Selección final, que implicó una lectura general de los artículos seleccionados para asegurar su pertinencia y calidad, finalmente fueron seleccionados 25 artículos. Este enfoque sistemático garantizó la recopilación de información precisa y relevante para el análisis de la reutilización de aguas grises y pluviales. ya que contenían experiencias en implementación de SAALL y RAG, datos cuantitativos de captación, tratamiento y usos de ALL y AG, factores económicos, sociales, tecnológicos, políticos y reglamentarios, entre otros. Los documentos encontrados fueron evaluados según los siguientes criterios:

- Año de publicación: Se seleccionaron los artículos publicados desde el año 2014 hasta el año 2024, este rango temporal se eligió para asegurar que la información y las prácticas descritas en los artículos sean relevantes y estén alineadas con las normativas y estándares actuales.

- Título: Se clasificaron según palabras claves en los títulos, ya que facilita la identificación eficiente de documentos que abordan los temas de interés específicos para la investigación.

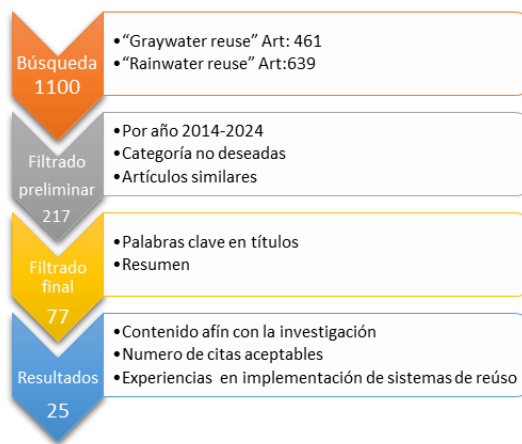
- **Resumen:** Se llevó a cabo una revisión detallada de los resúmenes de los artículos seleccionados, con el objetivo de identificar aquellos que presentaran resultados de estudios, proyectos o casos prácticos relacionados con el diseño, implementación y operación de SAALL y la RAG.

- **Contenido:** Se evaluó la información de los documentos, se tuvieron en cuenta los artículos que consideraban sistemas de recolección de aguas lluvias y aguas grises en sus estudios, que entregaran detalles sobre el estado actual en implementación de sistemas de ahorro, aceptación social, factibilidad económica, técnica, impacto ambiental y reglamentación internacional.

En la **Figura 2** se presenta un esquema donde se simplifica el proceso de filtrado.

Figura 2

Esquema del proceso de filtrado de la búsqueda sistemática



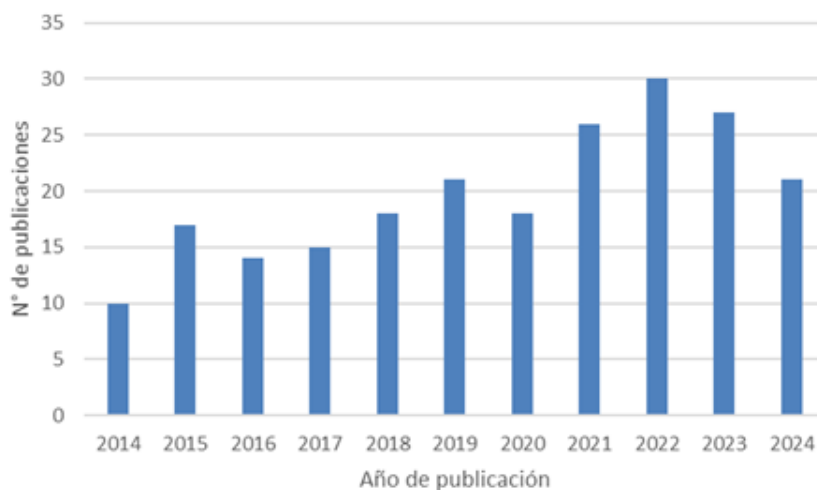
Nota. La Figura 2 presenta un esquema resumido del proceso de filtrado para la búsqueda sistemática.

Respecto a la documentación en el proceso de filtrado preliminar, se notó una variabilidad en la cantidad de artículos publicados a través de los años (**Figura 3**), observando que el año donde se presentaron más reportes fue el 2022 (30 artículos) y el año con menos reportes

obtenidos publicados fue el 2014 (10 artículos), lo que demuestra un interés en la comunidad científica por encontrar fuentes alternativas de abastecimiento de agua.

Figura 3

Distribución de artículos seleccionados por año (n=217 artículos)

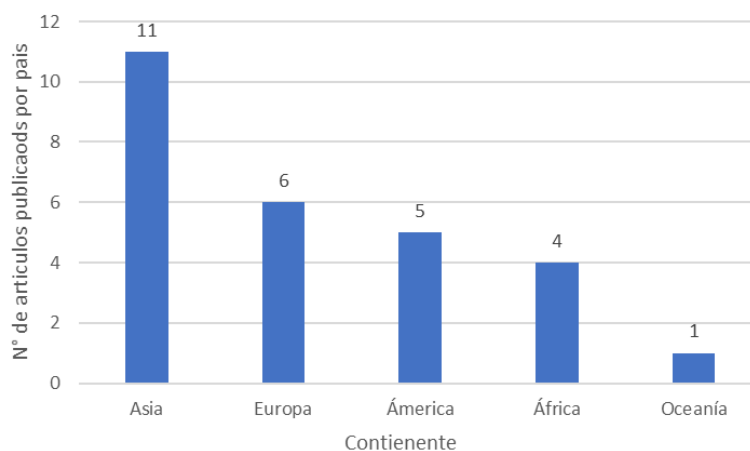


Nota. La Figura 3 presenta la distribución de artículos por año filtrados para la búsqueda sistemática.

Se realizó un análisis de los documentos finales basado en su país de origen, arrojando un total de 18 países. Para facilitar la comprensión, se agruparon los países por continentes (**Figura 4**). La figura revela que Asia es el continente con mayor actividad investigativa en este tema, concentrando 11 de las 25 publicaciones totales. Estos resultados concuerdan con lo presentado por Gomez Roza & Silva Lara, (2019) para tecnologías de tratamiento de aguas lluvias, en donde Asia presentó 12 artículos de 35, por otra parte, Avellaneda Galvis & Salcedo Parada, (2019) encontraron que Europa presentó 19 de 43 artículos de tecnologías tratamiento de aguas grises.

Figura 4

Distribución seleccionados por continente (n=25 artículos)



Nota. La Figura 4 presenta la distribución de artículos por continente filtrados para la búsqueda sistemática.

3.2.2 Estructuración de la Información

Una vez obtenido el material relevante para analizar, se organizó una base de datos en Excel® (**Apéndice B**), con información que incluyó: asignación de un número de identificador (ID), título, autores correspondientes, año de publicación, país de estudio y número de citas a la fecha de consulta.

3.3 Identificación de Retos

A lo largo del proceso investigativo realizado en este proyecto, se ha logrado un análisis exhaustivo del conocimiento disponible sobre SAALL y RAG, basado tanto en la literatura identificada localmente realizada en el AMB como internacional. La revisión, así como el conocimiento detallado de los estudios de factibilidad, permitieron plantear retos técnicos y no técnicos asociados con la implementación y puesta en marcha de los sistemas híbridos de AALL y RAG. Este análisis se ha nutrido de un debate profundo entre los autores de este proyecto, lo

que ha permitido identificar de manera clara y precisa una serie de falencias y desafíos inherentes a la implementación de estos sistemas.

4. Resultados y Discusiones

4.1 Indicadores Técnicos, Sociales, Ambientales Y Financieros

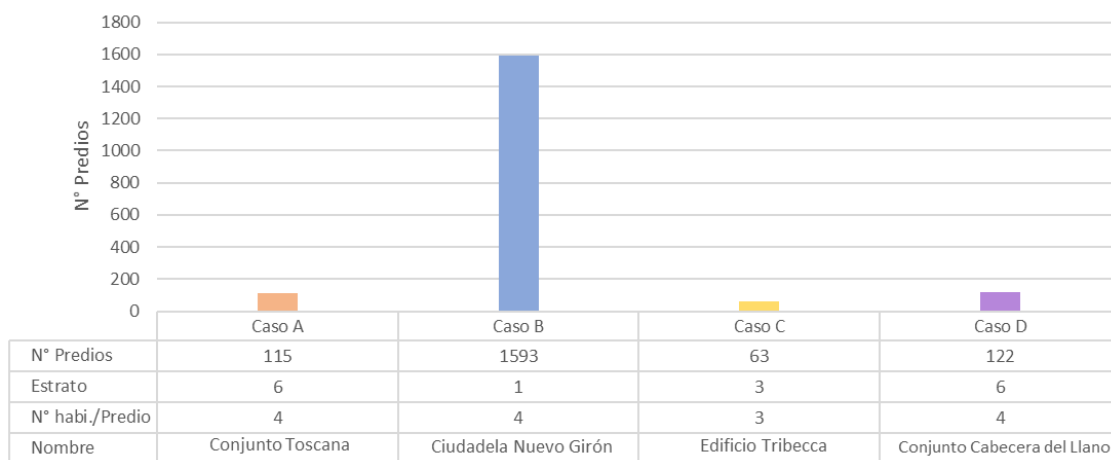
4.1.1 Caracterización de los Predios

Los hallazgos obtenidos del análisis efectuado en los estudios de casos locales permitieron identificar, cómo a mayor número de habitantes por vivienda, mayor demanda de agua potable y esto implica una alta producción de AG, que pueden ser tratadas y reutilizadas. La cantidad de viviendas por barrio o edificio son fundamentales a la hora de determinar la viabilidad económica y la eficiencia de ahorro de agua potable. El estrato socioeconómico influye ya que a mayor poder adquisitivo se puede invertir en mejores tecnologías de SAALL y RAG. Dicha información es fundamental para proponer estrategias de planificación urbana más eficientes, optimizando la distribución del recurso hídrico y evaluando la viabilidad de los sistemas híbridos en áreas con diferentes densidades poblacionales. Además, los datos revelan patrones en la concentración de población que facilitan priorizar intervenciones en infraestructura y recursos, enfocándose en zonas con mayor demanda, lo que a largo plazo contribuirá a una gestión más eficiente del agua y a un desarrollo urbano equilibrado.

Se observa en el **Figura 5**, que el caso A es una vivienda unifamiliar en un conjunto residencial y B corresponden a una vivienda unifamiliar en un barrio residencial, mientras que el C y D hacen referencia a edificaciones de apartamentos. La **Figura 5** resalta que el caso B (Ciudadela Nuevo Girón) tiene el mayor número de viviendas, lo que implica una alta densidad de población, especialmente en un estrato bajo (estrato 1).

Figura 5

Datos demográficos de los casos de estudio



Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano

La **Figura 5** permite conocer las condiciones económicas de los casos estudiados, estos influyen en las costumbres y usos del agua potable de las personas, también, permite comparar los diferentes contextos sociales de las viviendas. El caso A y D pertenecen a estrato 6 (alto), mientras que el caso B es estrato 1 (bajo) y el caso C es estrato 3 (medio). Además, se observa que la mayoría de los predios tienen entre 3 y 4 habitantes.

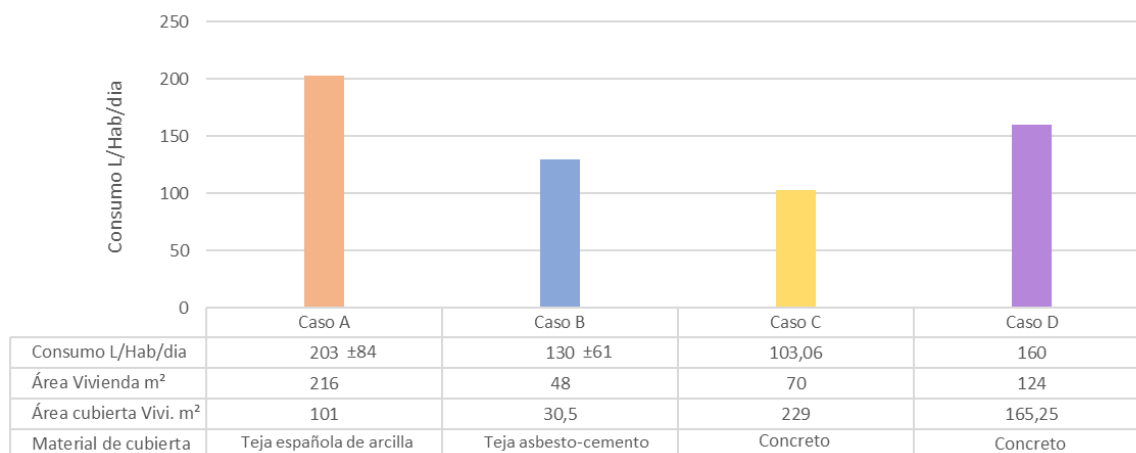
4.1.2 Características Físicas de la Infraestructura Residencia

Las características físicas de las viviendas y de sus elementos sirven para promover soluciones sostenibles que reestructuren el diseño arquitectónico para el aprovechamiento de los recursos hídricos. Es de suma importancia una buena elección del material de la cubierta para evaluar la durabilidad, calidad de agua lluvia, costo y eficiencia energética, ya que diferentes materiales pueden influir en el comportamiento térmico de la vivienda (**Tabla 1**), por ejemplo, el impacto térmico de la vivienda, afecta indirectamente el consumo de agua, al necesitar ducharse

con más frecuencia o requerir mayor hidratación. Asimismo, influye en gran medida al tren de tratamiento que se va a utilizar para el agua lluvia recolectada y a los usos finales que se le podría dar. Los datos recolectados de las características físicas en las viviendas por los autores de cada caso de estudio, se presentan en la **Figura 6**, expone el dato de consumo por persona, se evidencia como el consumo estuvo entre 203 ± 84 y $103,06$ L/hab/día. Las personas del caso A superan el consumo recomendado de 120 a 200 L/hab/día según el reglamento del sector de agua potable y saneamiento (resolución 0330 de 2017), lo cual refleja una oportunidad beneficiosa para implementar tecnologías de reúso o sistemas de ahorro de agua. Con respecto a las características físicas de los complejos habitacionales, la relación directa que se tiene entre el área de la vivienda y el consumo, puede deberse a la limpieza de más zonas y riego en áreas verdes. Los consumos de agua potable del caso A son mayores a los reportados por Ghisi & Freitas. (2024), el cual determinó un consumo promedio de 137 L/hab/día para un edificio de 130 personas, por lo que es clave identificar estas características como área vivienda, área de la cubierta y material de la cubierta con el fin de abordar un sistema más eficiente según las condiciones presentes.

Figura 6

Características y consumo de las viviendas de los casos de estudio



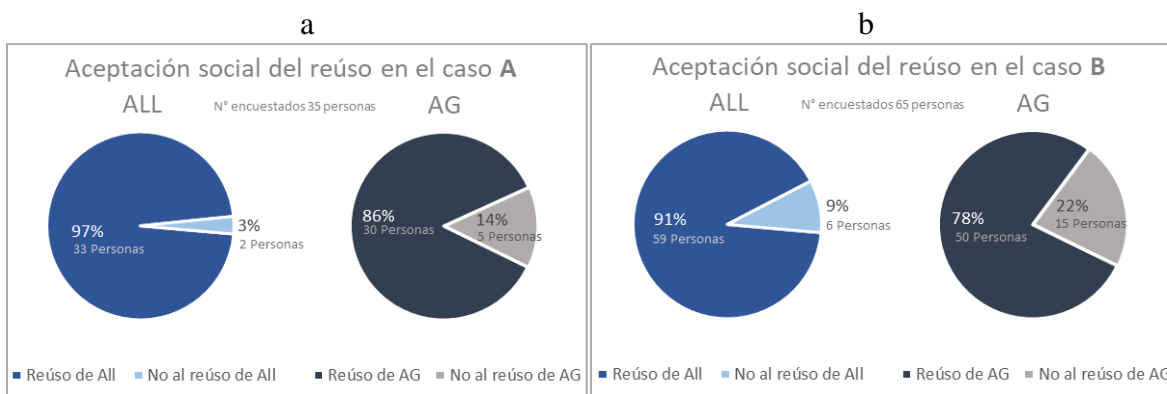
Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribecca; (d) Edificio Cabecera del Llano

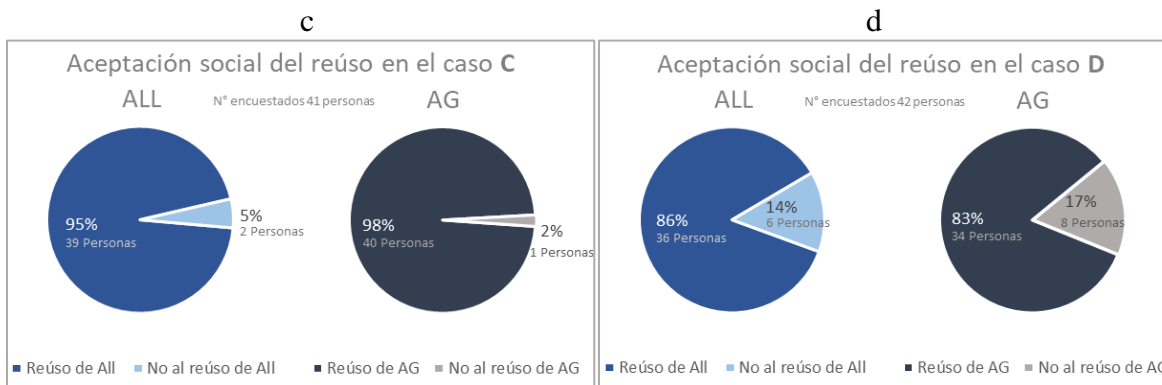
4.1.3 Aceptación Social del Reúso

Las personas encuestadas por los autores de cada caso de estudio, tienen la percepción de que el agua lluvia es más limpia, segura y natural (Lepcha et al., 2024), en los estudios realizados localmente en el AMB varía entre el 86 a 97% (**Figura 7**) y están a favor del aprovechamiento del agua lluvia para ser utilizada en lavadoras, lavado de carro, limpieza y riego de zonas comunes, entre otros. Por otro lado, la aceptación del reúso de aguas grises se encuentra entre un 59 a 86% en los estudios del AMB (**Figura 7**). En un análisis realizado a un hogar en el barrio la Victoria encuestaron a 34 hogares, y en las encuestas muestra como los costos de implementación (9%), riesgos de salud (94%), requerimiento de mantenimiento (24%), requerimiento de espacio (56%), malos olores (53%) y consumo de energía (12%), son las razones por las cuales las personas no estarían de acuerdo en reutilizar las aguas grises.

Figura 7

Aceptación social al reúso de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias en los casos de estudio





Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribecca; (d) Edificio Cabecera del Llano

En los casos A, B y D se ha encontrado que el 90% están de acuerdo que sea aprovechada para inodoros, puesto que se quiere evitar cualquier contacto con esta agua por miedo de adquirir algún tipo de enfermedad (Burgos Arias, 2024). La principal razón de rechazo de los habitantes de los apartamentos es el reúso de aguas grises combinadas con la de otros usuarios, ya que las personas sienten desconfianza de los componentes de dichas aguas, los cuales podrían ser coliformes fecales, orina o desechos tóxicos (Guerrero Ferreira, 2017), mientras que en las casas los usuarios son conscientes de la calidad de su agua para el reúso. Se notó que la diferencia entre estratos sociales bajos y altos, no influye en la aceptación al reúso de ALL y AG, lo cual es favorable para impulsar los sistemas híbridos. En cuanto a la edad, el 70% de las personas entre 20 a 59 años manifiestan estar a favor del reúso, y sin duda el factor más relevante es el nivel educativo, dado que entre más grado de formación mayor aceptación de prácticas sostenibles con el medio ambiente (Burgos Arias, 2024).

Los resultados encontrados en la mayoría de los casos para aceptación de sistemas híbridos son favorables, las personas cada vez son más conscientes del cuidado de los recursos naturales, y en su mayoría les gustaría contribuir, sin embargo, la desinformación ocasiona falta

de interés por parte del usuario. Para empezar, en estudios se han hecho encuestas que muestran como el género, la edad de las personas y el nivel educativo influyen en la aceptación social al reúso de aguas de AG y ALL (Burgos Arias, 2024). Amaris et al. (2021) percibió que las personas de estrato bajo son escépticas en cuanto a la reutilización de AG, siendo diferente los resultados encontrados por Oteng-Peprah et al, (2019), ya que en ellos prima las actitudes y el comportamiento de las personas sin importar los aspectos mencionados primeramente. En una encuesta a 35 hogares, se mostró que las mujeres son más consientes al reúso, con un 72% de aprobación, sin embargo, debe ser para actividades que no requieran contacto directo con su piel (Amaris et al., 2021).

4.1.4 Fuentes de Agua Gris y Aguas Lluvias

En los SAALL y RAG se observa una clara diversificación en las fuentes según las preferencias de cada caso. Mientras que la precipitación se aprovecharía para actividades como limpieza, riego, lavado de autos y, en algunos casos, inodoros como en el caso C y D, por otra parte, las AG muestran un patrón de aceptabilidad para uso en inodoros como se observa en el caso A, B, C y D (**Figura 10**). Esto refleja un enfoque sostenible y adaptable, donde cada vivienda optimizaría el uso del recurso hídrico según la calidad necesaria para cada actividad.

La cantidad de agua lluvia que se puede recolectar en una edificación está limitada a la pequeña área de captación en relación con su demanda (Ghisi & Freitas, 2024). En un estudio efectuado en el barrio La Victoria se evidenció un gasto de 33.83 ± 4.10 L/hab/día en la producción de aguas grises claras, representando el 21% del consumo de agua potable en el hogar. La ducha aporta un 94% y el lavamanos un 6%, las cuales son mayormente aceptadas para ser reutilizadas con un proceso de tratamiento y desinfección previo. Las duchas y sobre todo las lavadoras afectan significativamente en el consumo de agua potable (Burgos Arias, 2024), por

ende utilizarlas como fuente es una gran idea, además que las personas encuestas estuvieron a favor de su reúso. Hasta el 50% de las AGC constituyen las aguas residuales en países de altos y bajos ingresos, se evidenciaron resultados similares en Sharjah, Emiratos Árabes y Brasil (Shanableh et al., 2020; Ghisi & Freitas, 2024; Yoonus & Al-Ghamdi, 2020).

4.1.4.1 Calidad del Agua Gris Tratada y el Agua Lluvia. La calidad del agua gris tratada y del agua lluvia es importante para garantizar su seguridad y eficacia en la reutilización. Unas características apropiadas previenen la difusión de patógenos y contaminantes, salvaguardando la salud de la población. Para este caso el agua gris y el agua lluvia se utilizará para fines no potables. Los parámetros que se encuentran en mayor medida son pH, turbiedad, hierro, conductividad eléctrica, nitratos, plomo, sólidos disueltos totales (SDT), sulfatos, zinc, magnesio, cloruros, sólidos suspendidos totales (SST), cobre, color, coliformes totales y coliformes fecales, y a su vez son los más estudiados. Para el caso del agua lluvia es fundamental contar con un desviador de primer flujo, ya que es ahí donde se concentra la mayor cantidad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Gomez Rozo & Silva Lara, 2019), para luego un tratamiento ya sea de tipo primario, secundario o terciario y por último almacenamiento. Para el agua gris según la fuente varía los componentes, por ende, se debe presentar un tren de tratamiento capaz de remover metales, patógenos microbiológicos y carga orgánica (Avellaneda Galvis & Salcedo Parada, 2019).

Las aguas grises para usos no potables como riego para la producción de alimentos, para el lavado de vías en centros urbanos y uso directo en descarga de inodoros, está reglamentada en el Decreto 185 de 2003 en Francia, en la **Tabla 5** se muestran los valores permitidos para dichos parámetros, estos fueron comparados con los resultados obtenidos en las muestras del estudio realizada por (Burgos Arias, 2024) (**Tabla 5**), y los valores resaltados son los que no cumplirían,

lo que indica que las aguas tendrían que pasar por un proceso de desinfección y tratamiento previo para poder ser utilizadas.

Tabla 5

Parámetros de calidad del agua gris en diferentes países y los datos obtenidos en el caso de estudio del barrio La Victoria

Parámetro	Francia ^a	Chile ^b	España ^c	Estados Unidos ^d	Datos tomados por (Burgos Arias, 2024)
	Valores limites				
pH	6-9.5			6-9	7.49
CE (μS/cm)	3000				188.07
Turbiedad (NTU)	5		2	5	280.95
NT (mgN/L)	15				6.37
PT (mgP/L)	2	≤20			0.74
Grasas y aceites (mg/L)	10				187.05
SST (mg/L)	10	10	10	10	214.58
DQO (mgO ₂ /L)	100				879.68
DBO5 (mgO ₂ /L)	20	10		10	387.92
Aluminio (mg/L)	1				
Bario (mg/L)	10				
Boro (mg/L)	1				
Cadmio (mg/L)	0.005				
Cromo (mg/L)	0.1				
Magnesio (mg/L)	0.2				
Níquel (mg/L)	0.2				
Plomo (mg/L)	0.1				
Cobre (mg/L)	1				
Zinc (mg/L)	0.5				
Cloro (mg/L)	0.5-2	0.5≤X≤2			6.3
E. coli (UFC/100 ml)	100		0	14	
Coliformes fecales (UFC/100 ml)		10			1.87E+05
Coliformes totales					4.13E+05

Nota 1. CE = conductividad eléctrica; CF = coliformes fecales; CT = coliformes totales. ^a

Ministerio de ambiente.

Nota 2. Decreto n° 185 de 2003 (2003), ^b Ministerio de salud. Proyecto De Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias Básicas Para La Reutilización De Aguas Grises, ^c Ministerio de la Presidencia. Decreto n° 1620 de 2007 (2007) y ^d Usepa. (2012). Guidelines for Water Reuse. Adaptado de (Avellaneda Galvis & Salcedo Parada, 2019).

En la **Tabla 1** se presenta información del estado del agua lluvia que precipita en diferentes materiales de cubierta en varias zonas de la ciudad de Bogotá D.C en Colombia, y al compararse con la calidad del agua lluvia para uso no potable de una reglamentación estándar británica (**Tabla 6**), se muestra que todos los parámetros analizados no cumplirían, a excepción del pH, así que se debe realizar una etapa previa de tratamiento.

Tabla 6

Calidad del agua lluvia para uso no potable

Propiedades	Estándar británico
Oxígeno disuelto (mg/L)	>1 mg/L O ₂
Total solidos suspendidos (mg/L)	Visualmente claro y libre de residuos fecales
Turbiedad (NTU)	< 10
pH	6-8
Coliformes totales (NMP/100 mL)	NMP 1000/100 mL
Escherichia Coli (NMP/100 mL)	250

Nota. La Tabla 6 presenta la calidad del agua lluvia para uso no potable. Adaptado de (Gomez Rozo & Silva Lara, 2019).

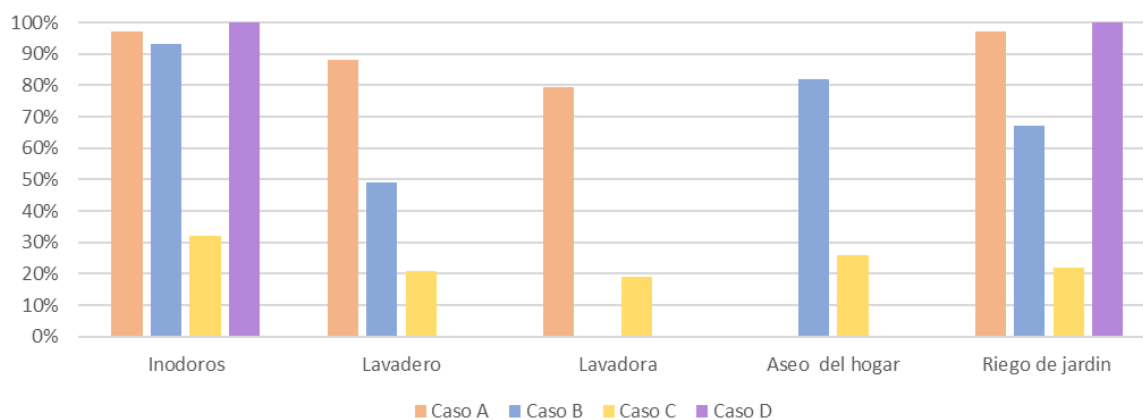
4.1.5 Usos del Agua Tratada

4.1.5.1 Aguas Lluvias. En las encuestas realizadas por Monroy Sanchez & Zambrano Aparicio, (2018) se aprecia como las personas se sienten más seguras de utilizar el agua lluvia que las aguas grises. En la **Figura 8** se presenta cuáles son los usos más aceptados por los encuestados en cada uno de los casos. Para el reúso en inodoros la aceptación es mayor al 90% en la mayoría de los casos, otros usos como lavadero, lavadora, aseo del hogar y riego de jardín también muestran una alta acogida, en el caso C, se dan los menores valores de aceptación, esto podría deberse a la falta de infraestructura y concientización de las personas, al igual que el caso D, que no estuvieron de acuerdo en utilizar el ALL para lavado y aseo del hogar, es posible que

no les interese esos usos debido a una mala percepción del ALL por razones de higiene o posibles contaminantes.

Figura 8

Preferencias de uso del ALL en los casos de estudio



Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano.

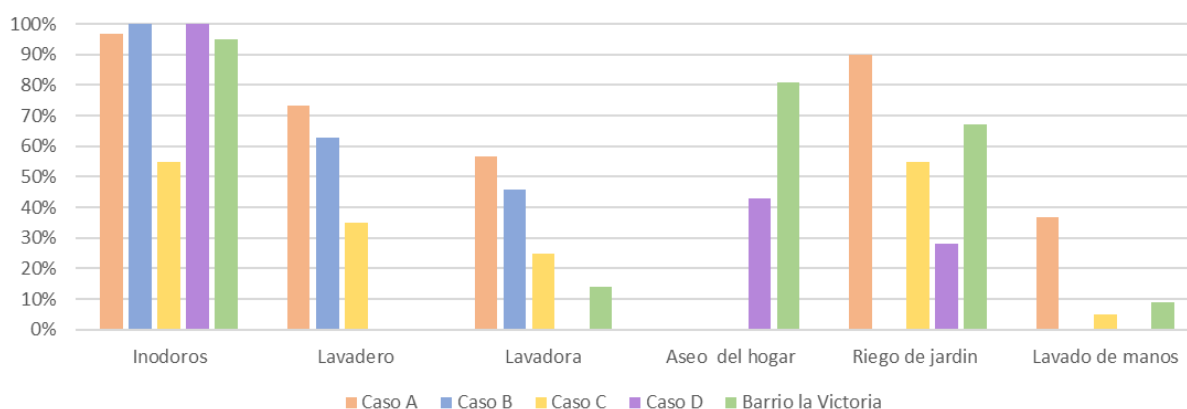
Un estudio realizado en Xi'an China por Gao et al., (2024), muestra que el tiempo de almacenamiento del agua lluvia para consumo sin haber sido manipulada puede ser de 12 a 26 días, y también que parámetros como DQO, Turbiedad, nitrato, E. coli, y el olor debe ser monitoreado en tiempo real. Además, también es importante el volumen y calidad del material donde se recolecta y almacena el agua, puesto que estos afectan el nivel de contaminantes, la eficiencia de transferencia de oxígeno y el ciclo de reoxigenación e incluso hasta el pH. Materiales como las tejas cerámicas, entregan una mejor calidad de agua lluvia, mientras que materiales como el asbesto-cemento, la arcilla y el concreto deterioran la calidad del agua, por ende, si la cubierta fuese de los últimos materiales mencionados su principal función sería para

riego de jardines (Gao et al., 2024), también es importante una constante limpieza del área de recolección para eliminar impurezas que afecten la calidad del agua (Lepcha et al., 2024).

4.1.5.2 Aguas Grises. Se presenta en la **Figura 9** las preferencias de las personas para el uso de AG. Los inodoros son los usos aceptados por excelencia, para lavado de ropa el caso A, B y C tiene una aceptación entre el 25% y 70%, mientras que para aseo del hogar y riego de jardines son entre 30% y 90% la aceptación, y además se encuentran unos porcentajes menores para lavado de manos.

Figura 9

Preferencias de uso del AG en los casos de estudio



Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano; Barrio la Victoria (**Burgos Arias, 2024**)

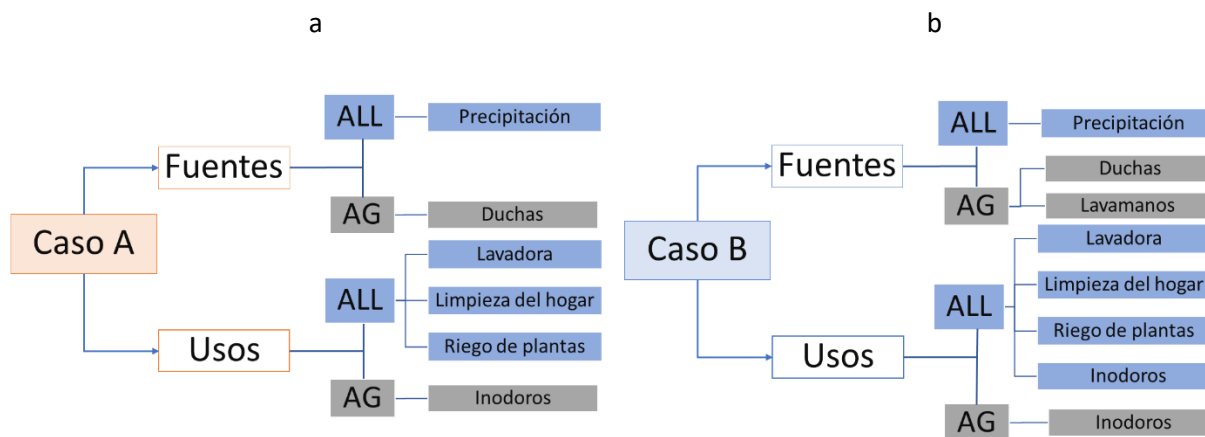
Los usos más aceptados son aquellos que tengan el menor contacto posible con el agua gris (Amaris et al., 2021), como la descarga de inodoros y las lavadoras (Rosa & Ghisi, 2021). Además, numerosos estudios internacionales ratifican la predisposición de los usuarios al uso para riego de jardines (Madzaramba & Zanamwe, 2023). Estados Unidos, Japón y Australia han tomado ese uso desde una iniciativa propia (Radingoana et al., 2020) sin embargo, no se ha

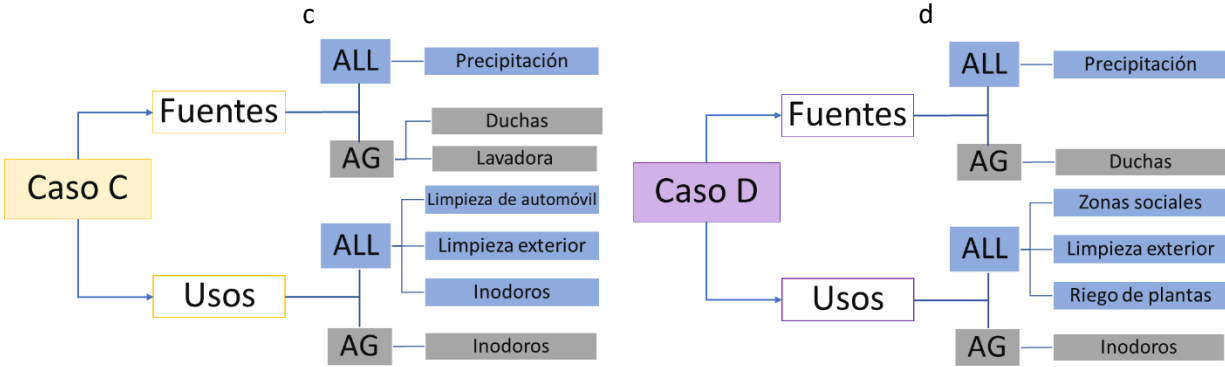
estudiado a profundidad los posibles impactos que podrían tener los suelos o cultivos por el uso continuo de las AG debido a que estas contienen productos químicos (Radingoana et al., 2020).

En la **Figura 10** se observan los 4 casos de estudio, y se percibe cuáles fueron las fuentes y usos finales aceptados por las personas encuestadas, en efecto, estos usos contrastan con lo encontrado en la literatura, que considera que las duchas, lavadora y lavamanos, serían las fuentes menos contaminadas para darles un segundo uso (Burgos Arias, 2024), y sin duda, el uso final más aceptado es la descarga de inodoros, debido a que nadie tendría contacto con ellas, sin embargo también se evidencian otros posibles usos como limpieza de exteriores y riego de plantas. En el caso de aguas lluvias las personas consideran que se podría dar el mismo uso que el de las aguas grises, sin embargo, estudios demuestran que con una buena recolección de ALL serviría hasta para uso potable.

Figura 10

Fuentes y usos finales de las aguas AG y ALL tratadas





Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribecca; (d) Edificio Cabecera del Llano.

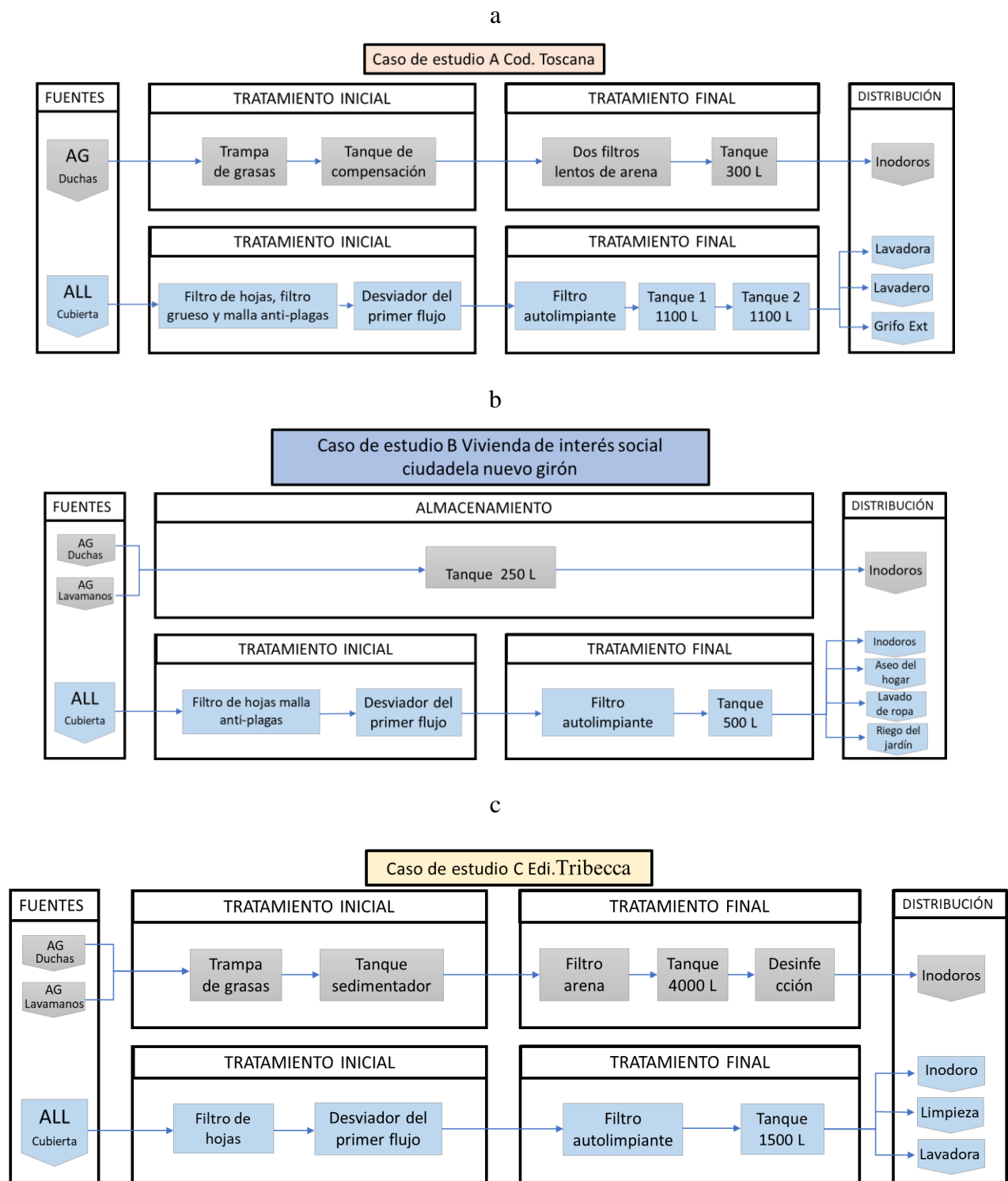
Al recolectar el agua lluvia para uso de lavadoras , y que al mismo tiempo con el agua expulsada se descarguen los sanitarios, se le estaría dando un doble propósito al agua recolectada, sin la necesidad de aplicar tratamientos tan rigurosos, ya que lo que se busca es que el agua circule rápidamente, sin embargo, sería bueno utilizar un desviador de primer flujo y cloro para una desinfección antes de ser utilizada para lavar (Rosa & Ghisi, 2021).

4.1.6 Trenes de Tratamiento

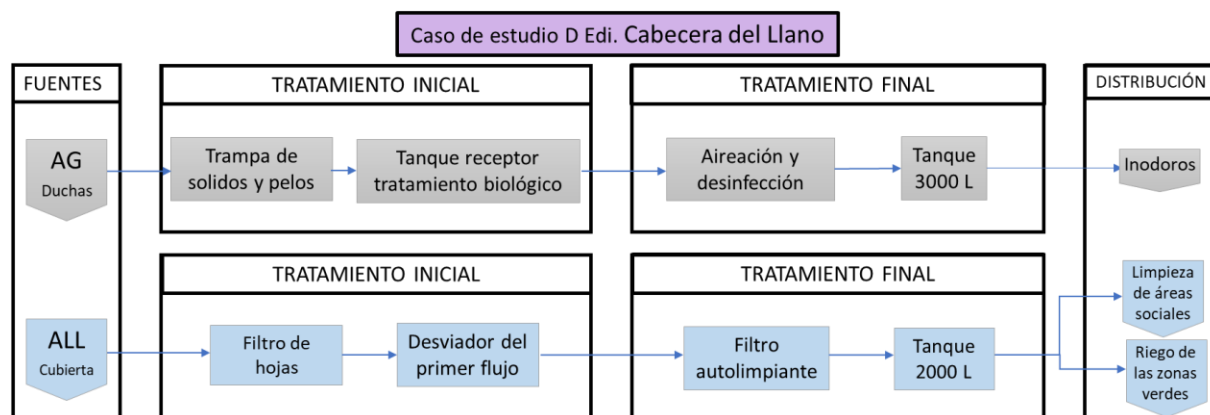
En la figura **Figura 11** se describe el proceso de AALL y AG, desde su recolección hasta su uso final, implementando el tren de tratamiento propuesto en cada proyecto, se observa cómo el agua pasa por un tratamiento inicial, el cual remueve la mayor cantidad de grasas para las aguas grises, para luego pasar a un tratamiento dos, siendo en el caso A y C filtros lentos de arena, mientras que en el caso D recibe un tratamiento biológico. Luego de recibir un proceso de desinfección el agua es almacenada y por último es distribuida en los usos aceptados por las personas, de la misma manera ocurre con el agua lluvia es recogida de las cubiertas, tratada con filtros, almacenada y por último distribuida.

Figura 11

Trenes de tratamiento planteados en cada caso de estudio



d



Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano

Para el uso no potable tanto de aguas lluvias como de aguas grises se requiere un cierto grado de tratamiento ya sea físico, químico o biológico y adicional una etapa de desinfección. Es relevante mencionar que un proceso físico por sí solo no elimina en su totalidad la materia orgánica, por lo que añadir un tratamiento químico si podría garantizar la eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica (Li et al., 2009), gracias a lo anterior se requiere una demanda baja y estable de cloro, lo que permite disminuir el recrecimiento microbiano en el sistema de distribución (Winward, Avery, Stephenson, et al., 2008). Métodos físicos como la nanofiltración y la ósmosis inversa generan aguas grises tratadas de alta calidad. Además, es importante agregar un desviador de primer flujo para ALL en su primera fase, debido a que la primera carga suele arrastrar una mayor cantidad de contaminantes. En contraste, el tratamiento químico demostró ser menos efectivo para lograr aguas grises tratadas que cumplan con los estándares de calidad. Entre los métodos biológicos, los biorreactores de membrana (MBR) son eficientes en la eliminación de compuestos orgánicos, por ende disminuye la demanda de desinfectantes químicos como el cloro (Winward, Avery, Stephenson, et al., 2008), hay un tipo de MBR que

trabaja en ausencia de oxígeno y con celdas de combustible microbianas, utiliza menos energía en comparación con los métodos tradicionales de lodos activados (Rodrigues et al., 2024; Yoonus & Al-Ghamdi, 2020; Winward et al., 2008; Li et al., 2009). Algo similar encontraron Liu et al., (2018) al evaluar un sistema con coagulación-flotación y MBR, y estudiar sus características concluyeron que el efluente se puede utilizar para jardinería.

Para los casos de estudio de estrato medio (3, 4 y 5) se busca eficiencia y economía, y los métodos como cloración, radiación solar y filtros de carbón activado, cumplen esta función. Por otro lado, para un estrato 6, sería bueno elegir un filtro de membrana, ozonización, un tratamiento térmico o ionización de plata, los cuales aportan un poco más de calidad, pero a su vez requieren más energía y mantenimiento (Gomez Rozo & Silva Lara, 2019). Para el caso de aguas grises se encontró que la electrocoagulación y la combinación con reactores biológicos rotativos (RBC), sedimentación y desinfección UV, son las que obtuvieron una relación precio/calidad más favorable (Avellaneda Galvis & Salcedo Parada, 2019; Li et al., 2009).

Una guía técnica de Singapur recomienda combinar un proceso de tratamiento terciario con una desinfección (Rodríguez et al., 2022). Por otro lado, en Chile se implementó un sistema en el cual recolectaban las aguas de los lavaderos en escuelas rurales y se trataban a través de un sistema de filtros compuestos por carbón activado y zeolita, para luego usarla en riego de áreas verdes en los propios establecimientos educativos (Rodríguez et al., 2022).

En Brasil se aplicó un humedal del tipo flujo vertical, estos pueden ser naturales o artificiales, además se ha reconocido su capacidad para purificar el agua (Yoonus & Al-Ghamdi, 2020), este está compuesto por *Cyperus papyrus* como capa vegetal, una capa superficial de 10 cm de grava para distribución del efluente, 50 cm de arena gruesa como capa intermedia y 10 cm de grava en el fondo para drenaje, es conveniente porque requiere poco mantenimiento, ocupa

espacios reducidos y tiene alta eficiencia en la eliminación de compuestos orgánicos y sólidos suspendidos en comparación con otros tipos de sistemas (Ghisi & Freitas, 2024).

En Australia se implementaron sistemas de reutilización de aguas grises para riego de jardines en casas nuevas, teniendo en cuenta que el agua no durara más de 24 horas almacenada. Se implementaron 3 sistemas en 3 viviendas diferentes, con procesos de sedimentación y filtración para tratar las aguas, contaba con tuberías internas adicionales para las aguas grises, cada una de las casas tenía variaciones en el sistema, en este estudio fueron conscientes que factores como el método de riego, la especie de planta, las propiedades del suelo y la proximidad a las aguas subterráneas afectan las condiciones del suelo, por ello se tomaron en cuenta medidas como riegos menores a 10 mm/día, el uso de riego por goteo subterráneo, una distancia superior a 1 metro hasta el agua subterránea y la elección de plantas perennes sin partes comestibles en contacto con las aguas grises (Byrne et al., 2020).

Un estudio que analizó muestras de 18 apartamentos de estudiantes recogiendo las aguas grises de los lavabos, bañeras y duchas, evaluaron 5 tecnologías, las cuales son Lecho de juncos de flujo horizontal (HFRB) y vertical (VFRB), Sistema de reciclaje de agua en cubiertas verdes (GROW), Biorreactor de membrana (MBR), Reactor químico de membrana (MCR). Todas las tecnologías tuvieron una eliminación de DBO_5 del 86 % o más, para el DQO de 87 (mg L⁻¹) del afluente, los VFRB y GROW tuvieron un mejor resultado de 21 y 19 respectivamente, además de SST de 29 (mg L⁻¹) del afluente a VFRB de 2, GROW de 3, HFRB de 9, en turbidez los mejores fueron GROW, MBR, MCR ya que tuvieron valores inferiores a 1 NTU. En los estudios analizados se encontraron partículas y bacterias como Coliformes totales, E. coli, Enterococos, Clostridia y P. aeruginosa, en los tres humedales construidos cumplieron con el estándar de reutilización de Alemania para coliformes totales y P. aeruginosa de menos de 10000 y 100 UFC

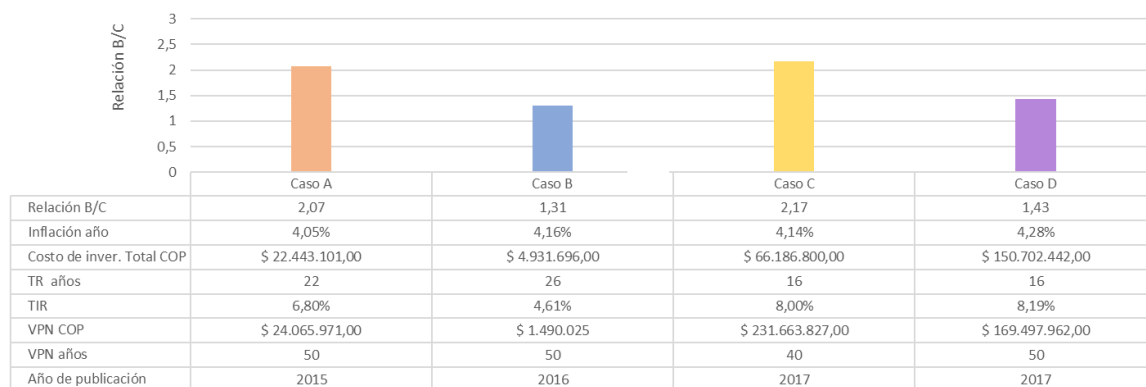
100 mL-1(4.0 y 2.0 registro 10UFC 100 ml-1), respectivamente. Para el efluente HFRB o GROW sobrepasaron los valores permisibles de coliformes totales del estado de California de 2,2 por 100 ml-1(equivalente a $0,51 \log_{10}(y+1)$ UFC 100 mL-1). Los tres humedales construidos cumplieron con los parámetros de DBO de los lineamientos de la USEPA, mientras que solo el GROW pudo cumplir con la turbidez de menos de 2 NTU. Es evidente que las aguas de las duchas siempre van a tener residuos fecales, lo cual permite la proliferación de bacterias y patógenos, que pueden desencadenar infecciones respiratorias y cutáneas, especialmente en niños y ancianos. Es importante la desinfección de todos los efluentes tratados para garantizar el cumplimiento de las normas microbiológicas (Winward et al., 2008).

4.1.7 Características Económicas

Los datos económicos fueron calculados en cada caso de estudio según las condiciones del momento en el que se realizó. Con el fin de comparar el costo de inversión se realizó la conversión monetaria al año de elaboración de este trabajo (2024), se realizó un análisis comparativo de las características económicas de los predios estudiados, específicamente en términos de relación beneficio/costo (B/C), inflación, costo de inversión, tiempo de retorno (TR), tasa interna de retorno (TIR), valor presente neto (VPN) y el año de publicación de cada caso de estudio.

Figura 12

Características económicas de los casos de estudio



Nota 1. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano.

Nota 2. El índice VPN se mantuvo en las fechas de publicación de cada caso de estudio, los valores de costo de inversión se actualizaron a la fecha de octubre de 2024.

La **Figura 12**, se presentan los resultados de indicadores económicos anteriormente descritos, uno de lo más representativos a la hora de escoger la viabilidad de un proyecto es la relación B/C, el caso C tiene la relación B/C más alta, con 2.17, siendo el predio más rentable. El proyecto del caso D es una inversión muy rentable dado que tiene la TIR y relación B/C en un balance entre los demás proyectos, podemos inferir que es más rentable la implementación de sistemas de reúso en edificios de estratos medios y alto. Además, un factor crítico para los usuarios que buscan implementar los sistemas de reúso y recuperar su inversión en un plazo determinado es el tiempo de retorno (TR). Los proyectos mostraron tiempos de 16 años para el caso C y D, y de 22 y 26 años para el caso A y B respectivamente. Se observa un TR menor para edificaciones, debido a que la inversión es dividida entre el número de apartamentos. Proyectos

con tiempos de retorno más cortos, como el caso C y D, pueden ser preferidos si el objetivo es recuperar la inversión rápidamente, asimismo, un impacto directo a los costos de inversión y el retorno esperado es la inflación del país donde se desea realizar el sistema, por lo que los proyectos más recientes deben tener en cuenta una inflación variable y determinar sus periodos de diseño e implementación de los sistemas de reúso.

Según Rodríguez et al., (2022) los sistemas descentralizados tienen menores costos, en consecuencia, son más viables a pequeña escala ya sea en casas o edificios, especialmente en edificaciones grandes de varias plantas para reúso de aguas grises, ya que en viviendas pequeñas no es viable debido a que el agua generada se debe usar en el menor tiempo posible. Un estudio realizado en Brasil, el cual tuvo en cuenta 3 escenarios de inflación, bajo (6.73%), promedio (11.73%) y alto (16.73%) encontró que con una inflación alta son mayores los valores actuales netos, períodos de recuperación más cortos entre 5 y 7 años y mayores tasas internas de retorno, siendo más favorable en rentabilidad (Ghisi & Freitas, 2024). En Sharjah, Emiratos Árabes Unidos los dueños de hoteles y edificios con torres de enfriamiento que implementaron sistemas de reutilización de aguas grises obtuvieron beneficios financieros a través de ahorros en sus facturas de agua, cabe resaltar que la mayor cantidad de agua potable es producto de la desalinización, por consiguiente son costosos los recibos de agua (Shanableh et al., 2020).

En Australia se desarrollaron 3 sistemas para riego de jardines con aguas grises, los costos de implementación e instalación de los sistemas fueron de 19'790,000.0, 7'740,000.0, 13'680,000.0, (estos valores se actualizaron a la fecha de publicación de este estudio y convertidos al peso colombiano) además tuvieron en cuenta los costos de operación y mantenimiento para un tiempo de 10 años y son de 5'400,000.0, 3'600,000.0, 3'650,000.0 (Byrne et al., 2020). Algo similar ocurre con Rosa & Ghisi, (2021), sobre un sistema de recolección de aguas lluvia con dos tanques

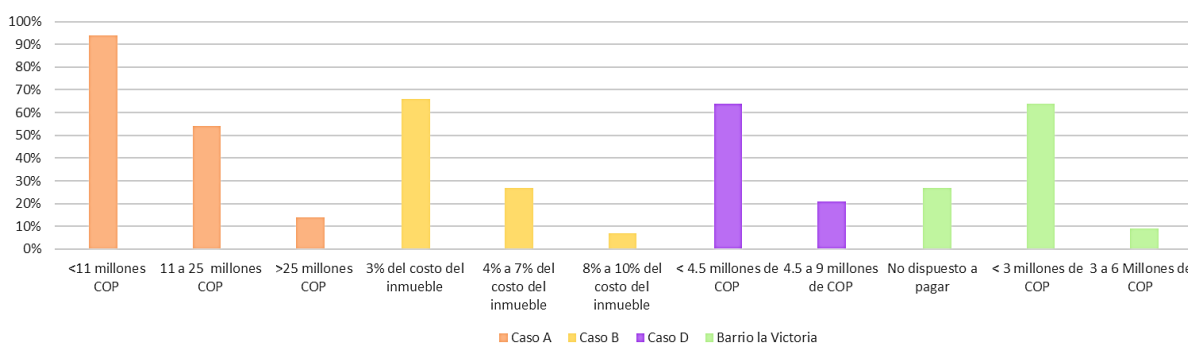
para abastecer el agua de la lavadora y un sistema de aguas grises que capta el agua de la lavadora y se almacena en otros dos tanques para realizar la descarga de sanitarios, con todo lo anterior, su costo de inversión ronda los 6'074,000.0 COP(Se actualizaron los datos al año actual y se convirtió la moneda original el Real brasileño a Pesos colombianos), un tiempo de recuperación de la inversión de aproximadamente 11 años y una tasa de retorno mensual de 1.1%.

4.1.8 Disponibilidad para Pagar

En la vivienda A, el 94% de los encuestados está dispuesto a pagar menos de 11 millones COP, mientras que el 54% pagaría entre 11 y 25 millones COP, y solo un 14% pagaría más de 15 millones COP. En cuanto a los apartamentos, en el C, el 66% de los encuestados aceptaría pagar menos del 3% del costo total del apartamento, mientras que el 27% pagaría entre el 4 y 7% del costo del apartamento, y el 7% entre el 8 y 10%. Para el apartamento D, se menciona que el costo que están dispuesto a pagar por el sistema es de menos de 4'500,000.0 COP (**Figura 13**).

Figura 13

Disponibilidad a pagar por los sistemas de reúso de AG y aprovechamiento de ALL en los casos de estudio



Nota 1. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (d) Edificio Cabecera del Llano; Barrio la Victoria (**Burgos Arias, 2024**).

Nota 2. Los valores de disponibilidad a pagar se actualizaron a la fecha de octubre de 2024.

El estudio realizado por Burgos Arias,(2024) mostró que el 64% de las personas tienen voluntad de pagar por el sistema un costo inferior a los 3 millones COP. En estudios realizados en Emiratos Árabes muestra como torres de enfriamiento abiertas y propietarios de hoteles lograron importantes beneficios financieros a través de ahorros en sus facturas de agua (Shanableh et al., 2020) Sin duda es indispensable contar con la ayuda del gobierno en apoyos económicos, ya que es un reto implementar estos sistemas al conocer que por lo menos las tuberías no separan AG de aguas residuales domésticas, lo que implica altos costos en el proceso de implementación.

4.1.9 Disponibilidad de Operación y Mantenimiento

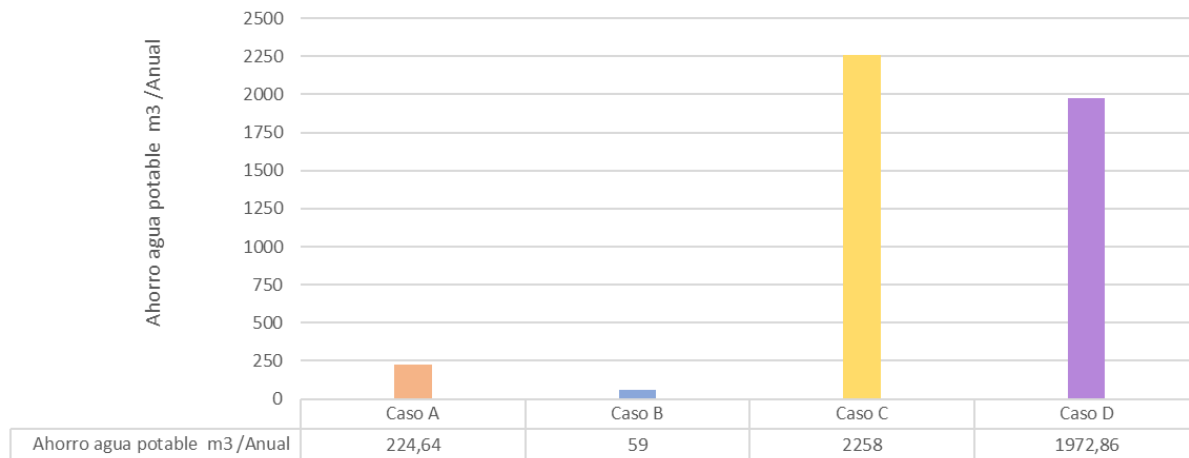
Las personas están dispuestas a pagar con respecto al costo de operación y mantenimiento, según los estudios realizados, en la vivienda B, se observa que el 86% de los encuestados está dispuesto a realizarlas cada 15 días; el 69% dos veces por semana y el 33% de forma diaria, y en el departamento D, el 31% para realizar mensualmente un mantenimiento preventivo del sistema; 83% para contratación de una persona adicional en caso de requerirse para su operación. Las actividades de operación convendría hacerlas de manera regular, ya sea a diario o semanal, para evitar problemas de salud (Burgos Arias, 2024). Es importante resaltar que se debe tener un buen manejo del sistema para evitar malos olores e insectos, ya que, si el agua queda estancada por más de 24 horas, es poco favorable para su uso, otro factor clave es el costo de energía para los sistemas, dado que las personas se inclinan más por las tecnologías que consuman menos energía.

4.1.10 Ahorro Agua Potable

En la **Figura 14**, se observa que los edificios tendrían un mayor ahorro de agua al implementar un sistema híbrido de AALL y RAG en comparación con una sola vivienda, debido a que se tendría en cuenta el ahorro por todo el edificio, para el caso C sería de 63 apartamentos y para el D sería de 122 apartamentos, contando con un ahorro de 2250 y 2000 m³/anuales respectivamente.

Figura 14

Ahorro anual de agua potable en los casos de estudio

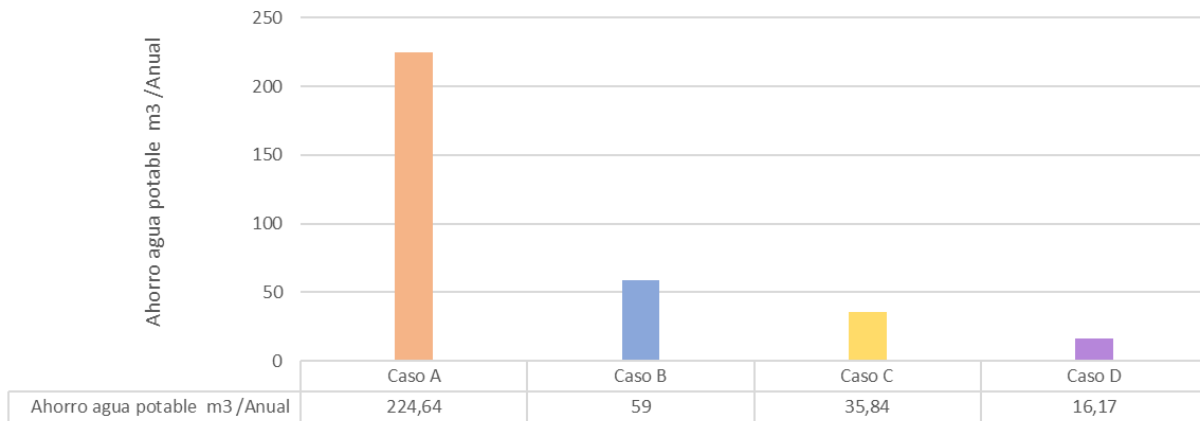


Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribeca; (d) Edificio Cabecera del Llano.

En la **figura 15**, se observa que, al estudiar la vivienda vs apartamento, es el caso A, la de estrato 6, la que más ahorra agua con el sistema híbrido, hay que tener en cuenta factores como consumo, ya que el caso A gasta 203 L/hab/día de agua potable mientras que los otros casos alrededor de 131 L/hab/día, lo que quiere decir que al implementar el sistema se evidenciaría un ahorro mayor en viviendas de alto consumo.

Figura 15

Ahorro anual de agua potable por unidad de vivienda en los casos de estudio



Nota. (a) Condominio Toscana; (b) Ciudadela Nuevo Girón; (c) Edificio Tribecca; (d) Edificio Cabecera del Llano.

En países como Brasil y Malasia se ha demostrado que el reúso de agua grises para descarga de inodoros puede reducir el consumo de agua potable entre un 29 a un 35% (Radingoana et al., 2020), si se reutiliza 1 m³ de aguas residuales se ahorra alrededor de 1.1 m³ de agua dulce (Yoonus & Al-Ghamdi, 2020).

Una manera bastante práctica y eficiente de ahorrar agua es utilizar el agua gris en el riego de jardines, ocasionando una menor demanda de agua potable de alrededor del 33% a 59% (Byrne et al., 2020), muy similar a lo presentado por Rosa & Ghisi, (2021) utilizando el agua lluvia para el lavado de ropa, para que luego con el agua expulsada por la lavadora se use para descarga de inodoros , evidenciando una disminución del 38% en el consumo mensual de agua potable, lo que representa una disminución de 7.00 m³/mes. Si a lo anterior le sumamos accesorios que disminuyen el consumo de agua como por ejemplo, al reemplazar las lavadoras de carga superior con lavadoras de carga frontal supone una reducción del 49% en lavandería y una reducción del

35% en el consumo de agua en el baño mediante la instalación de duchas y grifos que ahorran agua (de 14 L a 9 L/min y de 9 L a 6 L/min, respectivamente)(Byrne et al., 2020). Algo similar ocurre en Pretoria Sudáfrica, donde implementaron controladores MPC para las bombas (control predictivo de modelos de circuito cerrado), los cuales gestionan gracias a sensores el nivel de agua de los tanques y el tiempo de funcionamiento de las bombas, con el fin de estimar los periodos de déficit y exceso de agua lluvia y agua gris, esto puede reducir el consumo de agua potable en un 23.5% y reducir la producción de aguas residuales en un 25.1% , se disminuyó el consumo eléctrico de las bombas en un 35.7% (Wanjiru & Xia, 2018).

4.1.11 Viabilidad Ambiental

En los análisis del ciclo de vida realizados para los casos Tribeca, Cabecera del llano (Bohórquez Lopez & Martínez Redondo, 2022), y Toscana (Gomez Monsalve, 2020) se muestra a continuación la contribución relativa para las fases de construcción y operación de los diferentes proyectos (**Apéndice E, Tabla 8, 9, 10**). El 95% y más del aporte se da por la fase de operación, debido a que en esa fase se encuentra la PTAR y la PTAP, y en ellas se gasta una gran cantidad de recursos naturales y se producen emisiones. Cabe resaltar que existe un mejor desempeño del sistema híbrido con respecto al convencional, ya que genera un menor impacto ambiental en casi todas las categorías. Así mismo, la energía eléctrica aporta cerca del 10% del impacto en 5 de las 13 categorías, también hay que tener en cuenta que el consumo de agua potable está asociado al estrato socio económico (Bohórquez Lopez & Martínez Redondo, 2022).

Tabla 7

Comparación de la Contribución relativa de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido en diferentes condiciones socioeconómicas

Categoría de Impacto	Contribución relativa					
	Edif. Tribeca		Edif. Cabecera del Llano		Condominio Toscana	
	Construcción	Operación	Construcción	Operación	Construcción	Operación
Cambio climático, excluyendo el carbono biogénico	1.85%	98.24%	1.85%	98.24%	7.12%	93.02%
Cambio climático, incluyendo el carbono biogénico	1.60%	98.69%	1.60%	98.69%	-	-
Consumo de agua dulce	6.49%	93.64%	6.49%	93.64%	-	-
Ecotoxicidad de agua dulce	0.04%	100.00%	0.04%	100.00%	0.22%	99.46%
Eutrofización de agua dulce	0.01%	100.00%	0.01%	100.00%	0.02%	100%
Toxicidad humana, cancerígeno	0.02%	100.00%	0.02%	100.00%	0.08%	99.89%
Toxicidad humana, no cancerígeno	0.04%	100.00%	0.04%	100.00%	1.89%	98.14%
Uso del suelo	1.38%	99.33%	1.38%	99.33%	-	-
Ecotoxicidad marina	0.09%	100.00%	0.09%	100.00%	0.47%	99.61%
Eutrofización marina	0.03%	100.00%	0.03%	100.00%	0.06%	100%
Deterioro de la capa de ozono	0.12%	100.00%	0.12%	100.00%	0.38%	99.69%
Acidificación terrestre	2.11%	98.58%	2.11%	98.58%	16.08%	83.96%
Ecotoxicidad terrestre	1.29%	99.28%	1.29%	99.28%	4.75%	95.30%
Potencial de creación de ozono fotoquímico	-	-	-	-	30.17%	70.03%

Nota. Comparación de la Contribución relativa de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido en diferentes condiciones socioeconómicas.

En la **Tabla 7**, la categoría que genera mayor impacto es la toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DB eq.] en el sistema híbrido de Tribeca y Cabecera del Llano, esto es a causa de la PTAR, y además se evidencia que la operación es mucho mayor a la construcción en todos sus ítems.

El sistema híbrido se desempeña mejor, a excepción de la categoría potencial de creación de ozono fotoquímico [kg NOX eq.], es importante resaltar que el sistema híbrido tiene una ventaja primordial, en el ahorro del agua potable, en el caso de Toscana, es alrededor de 131 [m³/año], es decir, 42.5% del consumo total de agua potable (Gomez Monsalve, 2020).

4.2 Desafíos

La implementación de SAALL y RAG enfrenta varios retos, los cuales afectan al uso eficiente del agua, abarcando desde aspectos técnicos, económicos, sociales, normativos hasta ambientales. Entre los retos más relevantes se encuentran la necesidad de investigación y desarrollo tecnológico local, políticas y marcos regulatorios, estandarización de las normas técnicas, certificaciones, proyectos demostrativos, sensibilización a los usuarios e incentivos económicos. Además, los costos iniciales de instalación y mantenimiento suelen ser un obstáculo en contextos con recursos limitados, este estudio busca identificar y presentar estas barreras para fomentar una adopción más amplia y efectiva de estos sistemas.

4.2.1 Investigación y desarrollo tecnológico local

Las instituciones de investigación como universidades, deben analizar la calidad y características del agua gris y aguas lluvias, en diferentes contextos y proponer estudios con sistemas de tratamiento adaptados a las condiciones locales, que permitan la remoción de contaminantes y el uso seguro del agua tratada, acorde con los destinos seleccionados por los usuarios. Otras alternativas son los tratamientos verdes, que hacen referencia a humedales, estanques, techos y muros verdes, estos podrían ser utilizados para descomponer sustancias biodegradables lentamente, luego de haber sido aplicado un tratamiento de tecnologías de tipo físico. Las ventajas de estas tecnologías son reducción de costos de operación y mantenimiento, mejora la eficiencia en la reducción de compuestos orgánicos (Castellar et al., 2022). En

Colombia sería una alternativa favorable dado que las condiciones ambientales lo permiten y a su vez, es rentable para viviendas de bajos recursos. Otra forma de contribuir al ahorro de agua potable es impulsar a que las plantas de tratamiento clasifiquen las aguas tratadas según el uso final que se le quiera dar, por ejemplo, para industria o contra incendios (Lee & Mendoza, 2022).

4.2.2 Políticas y marcos regulatorios

En Colombia la Resolución 1207 de 2014 regula la reutilización de aguas residuales tratadas, en específico para uso agrícola e industrial, sin embargo, no hay normativa con respecto a la reutilización de agua en el ámbito doméstico, por lo que ni las empresas ni los usuarios se interesan en estas alternativas. Además, se cuenta con una cartilla sobre los *lineamientos para potencializar el uso del agua lluvia* del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Márquez et al., 2022), en ella se promueve la recolección, almacenamiento y aprovechamiento del agua lluvia con el objetivo de fomentar el uso eficiente del recurso hídrico en contextos urbanos y rurales, sin embargo, falta un enfoque en las distintas regiones, ya que es una guía general, que no tiene en cuenta condiciones ambientales y socioeconómicas. Es fundamental que el gobierno promueva proyectos de ley, en los cuales se busque incentivar por medio de subsidios y descuentos la instalación de sistemas híbridos para proyectos urbanos nuevos. También se debe contar con normas técnicas que permitan conocer cómo se instalarían dichos sistemas y cuáles deberían ser los requerimientos de calidad del agua tratada para su reúso. A modo de ejemplo, en España se está exigiendo en las edificaciones nuevas implementar sistemas de reutilización de aguas grises (Radingoana et al., 2020), en Hong Kong el departamento de abastecimiento de agua presenta especificaciones técnicas sobre reúso de aguas grises para nuevos desarrollos en el marco de proyectos gubernamentales (Rodríguez et al., 2022), en Australia de igual manera publicó un código de prácticas y requisitos para la reutilización de aguas grises para uso de

jardines domésticos (Rodríguez et al., 2022), en Chile cuenta con la Ley n° 21.075 de 2018 que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises para uso de inodoros y riego de jardines (Amaris et al., 2021), mientras que Brasil y Perú están en etapa de evaluación para la implementación de este tipo de leyes (Rodríguez et al., 2022).

4.2.3 Estandarización de las normas técnicas

Se deben proponer guías técnicas para el diseño, instalación y puesta en marcha de sistemas híbridos de RAG y AALL. Dichas guías deberían contener criterios y especificaciones de diseño, opciones tecnológicas para tratamiento, condiciones de operación y mantenimiento de los sistemas, límites permisibles de calidad del agua tratada en función de los usos finales del agua, además, , aspectos que incentiven y promuevan a los usuarios al RAG y AALL, y también, acompañar con asesoría técnica gratuita o a bajo costo financiado por entes públicos como alcaldías, gobernaciones, entre otros, y con programas de capacitación ofrecidos por universidades o centros de aprendizaje como el (SENA) para asegurar una instalación y funcionamiento adecuados de los sistemas, junto a una supervisión por parte de un ente regulador, en el caso de Colombia por ejemplo, La Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), que vigile su correcta aplicación, asegurando beneficios a largo plazo para las comunidades urbanas (Rodríguez et al., 2022). A manera de ejemplo, la autoridad de electricidad y agua de Sharjah (SEWA), es la encargada de dirigir un programa opcional para instalar sistemas de reutilización de aguas grises en los grandes edificios. El SEWA realizó un inventario de los lugares en los cuales estaba implementado los sistemas, entre estos están industrias, comercio, casas de alabanza, escuelas, gobierno y hoteles desde el año 2011 hasta el 2019, siendo las industrias las que tiene más de 200 proyectos. En las revisiones realizadas se percataron que más de la mitad de los sistemas instalados no funcionaban correctamente, descubriendo fallas como

instalaciones defectuosas, sistemas ineficientes, falta de operación y mantenimiento y una mala percepción de las personas que intentan interrumpir el sistema ya sea para reducir costos o malos olores, por otro lado, se encontraron sistemas eficientes en enfriamiento de torres (Shanableh et al., 2020). En Colombia a través del viceministerio de agua y saneamiento básico, se debería crear una entidad encargada de regular las instalaciones de los sistemas híbridos, con el fin de impulsar su uso.

4.2.4 Certificaciones

Proponer certificaciones que garanticen la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del diseño e implementación de sistemas híbridos para edificaciones residenciales, y en un futuro para instituciones de salud, educación, entre otras, asegurándose que cumplan con criterios técnicos y ambientales reconocidos, ayudaría a que las empresas quieran implementarlo en sus proyectos nuevos, por ahorros económicos y por obtener un plus en sus diseños. Además, ayudan a fomentar la adopción de estas tecnologías al aumentar el valor de las propiedades certificadas, atraer incentivos fiscales o financieros, y generar confianza entre los usuarios. Los sistemas de clasificación de edificios ecológicos consideran elementos como energía, materiales, agua, residuos, calidad del aire interior, comunidad, puesta en servicio y comercialización, además promueven la reutilización de las aguas grises, sin embargo, muchos de ellos no tienen una categoría de evaluación específica para reutilización de aguas grises, y en otras como por ejemplo LEED y GRIHA otorga un 5% y Green Globe pondera el 0,5% para reutilización de aguas grises (Yoonus & Al-Ghamdi, 2020).

4.2.5 Proyectos Demostrativos

Las pruebas piloto para el reúso y aprovechamiento de AG y ALL son importantes porque permiten evaluar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de estas prácticas en

contextos reales a pequeña escala. Estas pruebas ayudan a identificar desafíos operativos, como la calidad del agua tratada, la eficiencia de los sistemas y los costos de instalación y mantenimiento, antes de su implementación a gran escala. Además, proporcionan detalles valiosos que pueden ser utilizados para ajustar diseños, optimizar tecnologías y desarrollar normativas adaptadas a las necesidades locales. Incluso sirven para sensibilizar a la población y fomentar su aceptación, mostrando los beneficios ambientales y económicos que estas soluciones pueden ofrecer. A modo de ejemplo en la India desarrollaron un prototipo a escala 1:30, tomando como caso de estudio un edificio de veinte plantas con una media de 100 ocupantes en cada planta. El objetivo es aprovechar la energía potencial, lo que supondría almacenar el agua gris de los 10 pisos superiores, que corresponde al 76% del consumo total de agua y luego pasa a una turbina para convertirse en energía eléctrica y que pueda ser almacenada. Es importante mostrar que la cantidad de energía generada es de 6,8525 kWh. Con esta energía se podría encender alrededor de 98,70 de tubos de luz durante aproximadamente una hora, o por lo menos una bomba de agua de 6 kW durante una hora. Cabe destacar que es un método de generación de energía limpia y renovable (P. Sarkar et al., 2014). De esta manera se generaría un ahorro tanto en energía eléctrica como en agua potable, con lo cual los usuarios estarían más interesados en estos sistemas.

4.2.6 Sensibilización a los usuarios

La educación es uno de los principales factores que afectan la percepción de los usuarios sobre la reutilización de las AG y ALL (Burgos Arias, 2024). En las encuestas realizadas en los casos estudiados, se muestra que las personas no confían en reutilizar el agua gris, debido a que no conocen los posibles tratamientos que se le puede dar al agua y sus beneficios tanto económicos como ambientales, por ende, concientizar a las personas es esencial, se podría hacer

por medio de campañas informativas en medios masivos, talleres y charlas comunitarias que expliquen los beneficios de estas prácticas que pueden lograr una calidad y apariencia optima del agua para usos residenciales (Radingoana et al., 2020; Amaris et al., 2021), así como llevar a cabo proyectos piloto que sirvan como ejemplos prácticos. También es importante el uso de material educativo como folletos, videos o guías accesibles. De igual manera, la colaboración con instituciones educativas, puede ayudar a incluir este tema en programas escolares. Con la divulgación por parte entes territoriales y gubernamentales, de esta información es más factible que los usuarios quieran implementar estos sistemas.

4.2.7 Incentivos económicos

Ofrecer incentivos al usuario como subsidios a la inversión y estímulos tarifarios por reducción en consumo de agua potable, y para el constructor créditos o exenciones tributarias, para quienes inviertan en estas tecnologías es importante, ya que sin lo anterior, las empresas de servicios públicos, constructores y usuarios finales no les genera interés invertir en estos proyectos (Rodríguez et al., 2022). Las personas encuestadas en los casos de estudio muestran cómo están de acuerdo en invertir un porcentaje del precio del apartamento en la instalación de sistemas híbridos, y también para operación y mantenimiento, sin embargo, para lograr apuestas en estas áreas son esenciales los incentivos monetarios (D. Sarkar, 2023), incluidas las exenciones del impuesto de sociedades a las empresas de servicios públicos, las reducciones del IVA, las reformas de impuesto, los subsidios a la inversión, son cruciales para apoyar la cadena de valor (Rodrigues et al., 2024). En Portugal se observó que era necesario instaurar incentivos financieros, impuestos, tasas y tarifas de aguas residuales, impulsar con recursos las nuevas tecnologías de procesos de tratamiento de recursos hídricos, de igual manera, establecer programas que premien a los hogares que logren reducir su consumo de agua potable, mediante

descuentos en la factura o premios en efectivo (Rodrigues et al., 2024). También se pueden ofrecer subsidios para el mantenimiento de los sistemas (Rodrigues et al., 2024). Una consideración extra, es el empleo de tecnologías que promuevan la conservación de energía y la recuperación de subproductos, como el fósforo, el nitrógeno, el gas y el biogás, podría generar un beneficio económico. Asimismo, optimizar el consumo energético en los procesos de tratamiento no solo disminuirá los costos operativos, además reduciría la huella de carbono de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Rodrigues et al., 2024).

5. Conclusiones

Los SAALL y RAG constituyen una estrategia clave para enfrentar los desafíos globales relacionados con la escasez de agua y la sostenibilidad ambiental. Entre sus principales beneficios destacan la disminución en el consumo de agua potable en viviendas de estrato alto y edificaciones, desde una perspectiva económica los edificios presentan una relación B/C, costo de inversión y tiempo de retorno favorables para la implementación de sistemas híbridos, puesto que en edificios, el costo por apartamento disminuye la inversión al compartir infraestructura, desde una perspectiva ambiental, técnica y social sería más factible implementar los sistemas híbridos en viviendas de alto consumo, ya que cuentan, primero, con los recursos necesarios al ser de estrato alto, segundo, habría un mayor ahorro de agua potable al implementarlas en barrios de estrato alto ya que se observó que su consumo es de 203 ± 84 L/hab/día, lo que excede el valor contemplado en la (resolución 0330 de 2017) que estipula un consumo promedio 120 a 200 L/hab/día, tercero, al ser una sola familia por hogar, es más sencillo llevar a cabo procesos de sensibilización para el AALL y RAG. Desarrollar estos sistemas a gran escala, podría disminuir la demanda sobre los sistemas tradicionales de abastecimiento y a su vez contribuirían a la

mitigación de inundaciones mediante el manejo adecuado de las lluvias en zonas urbanas, ya que si es aprovechada en las viviendas no se recargarán los sistemas de drenaje.

La efectividad de los sistemas híbridos depende en gran medida de su diseño e implementación adaptados a las condiciones de cada proyecto, incluyendo factores climáticos, demográficos y tecnológicos. Además, pueden integrarse en diversas escalas, desde viviendas individuales hasta edificaciones residenciales, mostrando un alto potencial para complementar las infraestructuras hídricas existentes.

La sensibilización y educación de la población es importante para garantizar el éxito y sostenibilidad a largo plazo de estas iniciativas. La aceptación social depende no solo de la demostración de sus beneficios económicos y ambientales, sino también del acceso a información clara que disipe prejuicios sobre la calidad del agua tratada y su seguridad para usos no potables.

Existen barreras políticas y regulatorias que dificultan su adopción masiva en Colombia. Estas incluyen la falta de normativas específicas que promuevan y regulen estos sistemas, el escaso financiamiento para investigación y desarrollo tecnológico, y la ausencia de incentivos económicos que motiven a los sectores privado y doméstico a incorporarlos. Además, la fragmentación institucional y la resistencia al cambio por parte de algunos actores desaceleran los avances en este campo.

Superar estas barreras requieren un enfoque integral que combine políticas públicas claras, incentivos financieros como subsidios para las personas, exenciones tributarias para las empresas, es importante llevar a cabo una colaboración activa entre gobiernos, empresas privadas y la ciudadanía. Estos sistemas no solo contribuirán a la seguridad hídrica, sino que también promoverán una relación más sostenible y consciente con los recursos naturales, allanando el camino hacia un futuro resiliente y equitativo en términos de agua.

Referencias Bibliográficas

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Sources of Pollution in Rooftop Rainwater Harvesting Systems and Their Control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097-2167. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.497438>
- ABDULLA, F. A., & AL-SHAREEF, A. W. (2006). ASSESSMENT OF RAINWATER ROOF HARVESTING SYSTEMS FOR HOUSEHOLD WATER SUPPLY IN JORDAN. En P. Hlavinek, T. Kukharchyk, J. Marsalek, & I. Mahrikova (Eds.), *Integrated Urban Water Resources Management* (pp. 291-300). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-4685-5_30
- Agencia Europea de Medio Ambiente (Organismo o agencia de la UE), Collins, R., Thyssen, N., & Kristensen, P. (2009). *Water resources across Europe: Confronting water scarcity and drought*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/16803>
- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the Potential for Rainwater Harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129-2137. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>
- Almeida, A. P., Liberalesso, T., Silva, C. M., & Sousa, V. (2023). Combining green roofs and rainwater harvesting systems in university buildings under different climate conditions. *Science of The Total Environment*, 887, 163719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163719>
- Amaris, G., Dawson, R., Gironás, J., Hess, S., & Ortúzar, J. de D. (2021). From mathematical models to policy design: Predicting greywater reuse scheme effectiveness and water

- reclamation benefits based on individuals' preferences. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103132. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103132>
- Avellaneda Galvis, P. A., & Salcedo Parada, A. (2019). Evaluacion de opciones tecnologicas para el tratamiento de aguas grises con fines de reuso a nivel residencial en el contexto de Bucaramanga (colombia). <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/13141>
- Burgos Arias, J. P. (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. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42313>
- Byrne, J., Dallas, S., Anda, M., & Ho, G. (2020). Quantifying the Benefits of Residential Greywater Reuse. *Water*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w12082310>
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Castellar, J. A. C., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclús, H., Arias, C. A., Carvalho, P. N., Galvao, A., & Comas, J. (2022). Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130660>
- Filali, H., Barsan, N., Souguir, D., Nedeff, V., Tomozei, C., & Hachicha, M. (2022). Greywater as an Alternative Solution for a Sustainable Management of Water Resources—A Review. *Sustainability*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su14020665>

- Friedler, E. (2004). Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities. *Environmental Technology*, 25(9), 997-1008. <https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619393>
- Gao, Z., Zhang, Q., Wang, Y., Jv, X., Dzakpasu, M., & Wang, X. C. (2024). Evolution of water quality in rainwater harvesting systems during long-term storage in non-rainy seasons. *Science of The Total Environment*, 912, 168784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168784>
- García-Ávila, F., Guanoquiza-Suárez, M., Guzmán-Galarza, J., Cabello-Torres, R., & Valdiviezo-Gonzales, L. (2023). Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. *Results in Engineering*, 18, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153>
- Ghaitidak, D., & Yadav, K. (2013). Characteristics and treatment of greywater—A review. *Environmental science and pollution research international*. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Ghisi, E., & Freitas, D. A. (2024). Economic Feasibility of Rainwater Harvesting and Greywater Reuse in a Multifamily Building. *Water*, 16(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/w16111580>
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466-467, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.020>
- Gomez Monsalve, M. (2020). Factibilidad ambiental de un sistema hibrido de aprovechamiento de agua lluvia y reutilización de aguas grises en una vivienda de alto consumo. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39864>

- Gomez Rozo, M. A., & Silva Lara, M. C. (2019). Propuesta de tecnologías para el tratamiento de aguas lluvias, como opción para su aprovechamiento en viviendas unifamiliares. caso de estudio: Bucaramanga (colombia). <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/13131>
- Guerrero Ferreira, J. S. (2017). Factibilidad técnica, social y financiera de la implementación de un sistema de reuso de aguas pluviales y aguas grises en un edificio estrato seis del Área Metropolitana de Bucaramanga. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/35971>
- Lee, M.-Y., & Mendoza, J. A. M. (2022). Evaluation and diagnosis for policy of water reuse in the Republic of Korea. *Water Cycle*, 3, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.11.001>
- Lepcha, R., Kumar Patra, S., Ray, R., Thapa, S., Baral, D., & Saha, S. (2024). Rooftop rainwater harvesting a solution to water scarcity: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101305. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101305>
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment*, 407(11), 3439-3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Liu, H., Yao, Y., Chen, Z., Leng, F., & Zhou, X. (2018). Grey water reuse of a multi-functional super-high building: Evaluation of model treatment processes. *Desalination and Water Treatment*, 116, 96-102. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22608>
- Madzaramba, T. H., & Zanamwe, P. (2023). User perceptions and acceptance of treated greywater reuse in low-income communities: A narrative review. *Journal of Water and Climate Change*, 14(11), 4236-4244. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.414>
- Márquez, I. D., Escaf, C. E. C., Sánchez, N. G., Prada, F. C., & Carrascal, F. M. C. (s. f.).
LINEAMIENTOS PARA POTENCIALIZAR EL USO DEL AGUA LLUVIA.

- Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049-2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>
- Mendoza Santos, J. G., & Rincon Mendez, C. I. (2016). Evaluación de la viabilidad social, técnica y económica de la implementación de un sistema de recolección, tratamiento y aprovechamiento de aguas lluvias y aguas grises en un proyecto de vivienda de interés social. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/33984>
- Monroy Sanchez, A. L., & Zambrano Aparicio, J. D. (2018). Viabilidad técnica, financiera y social en la implementación de un sistema para el reuso de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias en apartamentos estrato tres del Área Metropolitana de Bucaramanga, Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/38017>
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Gabarrell, X., Gasol, C. M., & Rieradevall, J. (2014). Financial and environmental modelling of water hardness—Implications for utilising harvested rainwater in washing machines. *Science of The Total Environment*, 470-471, 1257-1271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.101>
- Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & DeVries, N. K. (2019). Predicting greywater reuse for potable and nonpotable purposes in a developing country – a theory of planned behaviour approach. *Desalination and Water Treatment*, 142, 56-64. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23414>
- Radingoana, M. P., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 116, 102853. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102853>

- Rivera Sánchez, M. L., & Zaraza Peña, J. M. (2015). Factibilidad técnica y económica de un sistema hidrosanitario para la reutilización de aguas grises y pluviales, caso de estudio en vivienda de alto consumo del a.m. De Bucaramanga. Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/33398>
- Rodrigues, P. M., Pinto, F. S., & Marques, R. C. (2024). A framework for enabling conditions for wastewater reuse. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 355-366. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.022>
- Rodríguez, C., García, B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano, J., & Leiva, E. (2022). Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation. *Water*, 14(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/w14213589>
- Rosa, G., & Ghisi, E. (2021). Water Quality and Financial Analysis of a System Combining Rainwater and Greywater in a House. *Water*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/w13070930>
- Sarkar, D. (2023). Life cycle costing analysis of grey water recycling systems for commercial and residential projects of Ahmedabad, India. *Materials Today: Proceedings*, 77, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.298>
- Sarkar, P., Sharma, B., & Malik, U. (2014). Energy generation from grey water in high raised buildings: The case of India. *Renewable Energy*, 69, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.046>
- Shanableh, A., Khalil, M. A., Mustafa, A., Abdallah, M., Idris, A. E., Yilmaz, A., Merabtene, T., Siddique, M., Al-Ruzouq, R., Imteaz, M. A., Darwish, N., Al Bardan, M., & Salim, G. (2020a). Greywater reuse experience in Sharjah, United Arab Emirates: Feasibility,

challenges and opportunities. *Desalination and Water Treatment*, 179, 211-222.

<https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25048>

Shanableh, A., Khalil, M. A., Mustafa, A., Abdallah, M., Idris, A. E., Yilmaz, A., Merabtene, T.,

Siddique, M., Al-Ruzouq, R., Imteaz, M. A., Darwish, N., Al Bardan, M., & Salim, G.

(2020b). Greywater reuse experience in Sharjah, United Arab Emirates: Feasibility,

challenges and opportunities. *Desalination and Water Treatment*, 179, 211-222.

<https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25048>

Wanjiru, E., & Xia, X. (2018). Sustainable energy-water management for residential houses with

optimal integrated grey and rain water recycling. *Journal of Cleaner Production*, 170,

1151-1166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.212>

Winward, G. P., Avery, L. M., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T., &

Jefferson, B. (2008). A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of

treatment technologies for reuse. *Ecological Engineering*, 32(2), 187-197.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.11.001>

Winward, G. P., Avery, L. M., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). Chlorine disinfection of

grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research*, 42(1), 483-491.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.042>

Zeng, Z., Liu, J., & Savenije, H. H. G. (2013). A simple approach to assess water scarcity

integrating water quantity and quality. *Ecological Indicators*, 34, 441-

449. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.012>

Apéndices

Apéndice A. Características del agua en diferentes tecnologías

Referencia	Proceso	TSS(mg/L)		Turbiedad (NTU)		DQO (mg/L)		DBO (mg/L)	
		Dentro	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera
Physical processes Gerba et al. (1995)	Filtro de cartucho	19	8	21	7	--	--	--	--
Brewer. Brown. and Stanfield (2000)	Filtración + desinfección	--	--	21	7	157	47	--	--
March. Gual. and Orozco (2004)	Cribado + sedimentación + desinfección	44	19	20	17	171	78	--	--
Ramon et al. (2004)	Membrana UF	35	18	--	--	280	130	195	86
	Membrana NF	28	0	30	1	226	15	--	--
	Membrana del RO	18	0	--	--	130	3	86	2
Prathapar et al. (2006)	Filtración + Carbono activado + Filtro de arena	9	4	13	6	51	35	--	--
Chemical processes liu et al. (2005)	Electro-coagulación + desinfección	29	9	43	4	52	22	23	9
Sostar-turk. Petrinic. and Simonic (2005)	Coagulación + Filtro de arena + GAC	35	<5	--	--	280	20	195	10
Pidou et al (2008)	Coagulación con sal de aluminio	--	--	46.6	4.28	791	287	205	23
Pidou et al (2008)	Resina de intercambio iónico magnético	--	--	46.6	8.14	791	272	205	33
Biological processes nolde (2000)	Sedimentación + RBC + desinfección UV	--	--	--	--	100-430		50-250	<5
Abdel-Kader (2013)	Sedimentación + RBC + desinfección UV	28	4.59	39		179	--	72	4.19
Liu et al. (2005)	Pantalla + RBC	43	7.9	33	0.61	158	40	59	2.3

		+ Filtración de arena + cloración							
Lesjean and gnirss (2006)	MBR	--	<1	--	--	493	24	--	--
Merz et al. (2007)	MBR	--	--	29	0.5	109	15	59	4
Friedler and Gilbao (2010)	MBR	--	--	43	0.21	84	42	95	1.1
Elmitwalli et al. (2007)	UASB	--	--	--	--	681	470	--	--
Gross et al. (2007)	Humedales construidos	158	3	--	--	839	157	466	0.7

Nota: UF: Ultrafiltración; NF: Nanofiltración; RO: ósmosis inversa; GAC: Carbón Activado ranular; UV: ultravioleta; RBC: Reactores Biológicos Rotativos; MBR: Reactores Biológico de Membrana; UASB: Reactor Anaeróbico de flujo ascendente. Tomado de (Gisi & et al ,2015).

Apéndice B. Literatura internacional sobre el reúso de AG y aprovechamiento de ALL

ID	Nombre	Año publicación	Autor	Revista	Ubicación	Citas
1	User perceptions and acceptance of treated greywater reuse in low-income communities: a narrative review	2023	Tendai Hardwork Madzaramba y Pesanai Zanamwe	Water & Climate change	Filabusi, Zimbabwe	9
2	Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges	2020	Makgalake P. Radingoana, Timothy Dube, Dominic Mazvimavi	Physics and Chemistry of the Earth	Bellville, South Africa	33
3	Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation	2022	Carolina Rodríguez, Bárbara García, Caterin Pinto, Rafael Sánche, Jennyfer Serrano and Eduardo Leiva	Water	Chile	9
4	Economic Feasibility of Rainwater Harvesting and Greywater Reuse in a Multifamily Building	2024	Enedir Ghisi, Douglas Anselmo Freitas	Water	Brazil	0
5	From mathematical models to policy design: Predicting greywater reuse scheme effectiveness and water reclamation benefits based on individuals' preferences	2021	Gloria Amaris a, Richard Dawson, Jorge Gironas	Sustainable Cities and Society	Chile	7
6		2021		KeAi		4

	Greywater characterization of an Indian household and potential treatment for reuse		Pravin D. Patil, Vivek P. Bhange b, Soniya S. Shende		Mumbai, India	
7	Greywater reuse experience in Sharjah, United Arab Emirates: feasibility, challenges and opportunities	2019	Abdallah Shanableha, Mohamad Ali Khalil	Deswater	Sharjah, United Arab Emirates	8
8	Predicting greywater reuse for potable and nonpotable purposes in a developing country – a theory of planned behaviour approach	2019	Michael Oteng-Pepraha, Mike Agbesi Acheampong	deswater	Ghana	4
9	Nudging greywater acceptability in a Muslim country: Comparisons of different greywater reuse framings in Qatar	2018	Laurent A. Lambert, Jordan Lee	Environmental Science & Policy	Qatar	28
10	Evolution of water quality in rainwater harvesting systems during long-term storage in non-rainy seasons	2024	Zan Gao, Qionghua Zhang, Yufei Wang	Science of the Total Environment	China	7
11	Quantifying the Benefits of Residential Greywater Reuse	2020	Josh Byrne Stewart Dallas Martin Anda	Water	Australia	8
12	Water Quality and Financial Analysis of a System Combining Rainwater and Greywater in a House	2021	Gustavo Rosa Enedir Ghisi	Water	Brazil	9
13	A framework for enabling conditions for wastewater reuse	2024	Paulo M. Rodrigues a Francisco S. Pinto b	Sustainable Production and Consumption	Portugal	3
14	Sustainable energy-water management for residential houses with optimal integrated grey and rain water recycling	2017	Evan Wanjiru Xiaohua Xia	Journal of Cleaner Production	Sudafrica	42
15	Studying the effect of rain water harvesting from roof surfaces on runoff and household consumption reduction	2018	Mehdi Sepehri y Hossein Malekinezhad a Ali Reza Ilderomi	Sustainable Cities and Society	Iran	50
16	Analysis of profitability of rainwater harvesting, gray water recycling and drain water heat recovery systems	2015	Agnieszka Stec, Sabina Kordana	Resources, Conservation and Recycling	Polonia	63
17	Rooftop rainwater harvesting a solution to water scarcity: A review	2024	Rodrick Lepcha, Sanmay Kumar Patra	Groundwater for	India	1

				Sustainable Developme nt		
18	Grey water reuse of a multi-functional super-high building: evaluation of model treatment processes	2018	Hongbo Liu, Yangyang Yao, Zihua Chen	Desalinatio n and Water Treatment	China	1
19	Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis	2020	Hamad Yoonus, Sami G. Al-Ghamdi	Science of The Total Environmen t	Qatar	37
20	Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses	2009	Li Fangyue, Knut Wichmann,Ralf Otterpohl	Science of The Total Environmen t	Alemania	477
21	Life cycle costing analysis of grey water recycling systems for commercial and residential projects of Ahmedabad, India	2023	Debasis Sarkar	Materials Today: Proceedings	India	3
22	Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles	2008	Gideon P. Winward, Lisa M. Avery	Water Research	Reino Unido	174
23	A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse	2008	Gideon P. Winward, Lisa M. Avery	Ecological Engineering	Reino Unido	172
24	Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities	2022	Joana AC Castellar, Antonina Torrens	Journal of Cleaner Production	España	38
25	Energy generation from grey water in high raised buildings: The case of India	2014	Prabir Sarkar, Bhaanuj Sharma	Renewable Energy	India	26
26	Evaluation and diagnosis for policy of water reuse in the Republic of Korea	2022	Min-Yong Lee, José Alberto M. Mendoza	KEAI Water Cycle	República de Corea	4

Apéndice C. Características de las viviendas objeto de estudio

Característica	Vivienda A	Vivienda B	Apartamento C	Apartamento D
Nombre	Toscana	Ciudadela nuevo Girón	Tribeca	Cabecera del Llano
Número total de predios	115	1593	63	122

Número de encuestados	35	65	41	42
Estrato	6	1	3	6
Precipitación promedio (mm/año)	1053	974	1303	1294
Temperatura promedio (°C)	25	25	25	25
Área de la vivienda (m ²)	216	48	70	99
Área de cubierta	101	30.5	229	165.25
Número de habitantes por vivienda	4	4	3	4
Material de la cubierta	Tejas de barro tipo española	láminas de Asbesto-cemento	Superficie en concreto	Superficie en concreto
Coefficiente de escorrentía	0.9	0.9	0.8	0.8
Consumo de agua (L/hab/día)	203±84	130±61	103.06	160
Usos del agua lluvia	Lavadora: 27% Grifo externo: 3.4% Grifo interno: 5.5%	Riego de plantas: 2.6% Limpieza del hogar: 4.8% Lavadora: 12%	Lavado de carro: 60% Zonas comunes: 43% Inodoro: 32%	Limpieza y riego de zonas sociales 100%
Aceptación social	97% reúso All 86% reusó de AG	91% reúso All el 66% lo haría por cuidar el medio ambiente y el 61% por ahorro de dinero. El 7.5% no aceptaron por higiene. 78% reusó de AG el 100% aceptaron usarla en descarga de	98% reúso AG 59% por medio ambiente 36% ahorro dinero 2% no aceptaron por higiene 95% uso All 5% no aceptaron por higiene	86% All 94% por motivos ambientales 83% AG 17% no aceptaron por higiene

		inodoros, el 43% aceptaron usarla en la limpieza del hogar y el 28% en el riego del jardín.	62% por medio ambiente 38% ahorro dinero	
Disponibilidad a Pagar	94% están dispuestos a pagar menos de 7 millones COP 54% están dispuestos a pagar entre 7 y 15 millones COP. 14% estaría dispuesto a pagar más de 15 millones COP.		66% estaría dispuesto a pagar menos del 3% del costo del inmueble 27% entre 4% y 7% del costo del inmueble 7% entre 8 y 10% del costo del inmueble	64% de rango de inversión menor a 3 millones COP por apartamento, seguido de un 21% entre 3 y 6 millones COP.
Fuentes AG	Duchas	Duchas Lavamanos	Lavadora Ducha	Ducha
Usos AG	Inodoros	Inodoros	Inodoro	Inodoros Lavadero Lavadora
Uso ALI	Lavadero Lavadora Grifo exterior	Inodoro Limpieza del hogar Riego del jardín Lavadora.	Inodoro Duchas Lavadora	Limpieza de áreas sociales Riego de zonas verdes
Volumen tanque AG	Oferta: $177 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}}$ Demanda $169 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}}$ Tanque: 300 Litros	250 Litros	Oferta: $3100 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}}$ Demanda: $2950 \frac{\text{Litros}}{\text{dia}}$ Tanque: 4000 Litros	Tanque :3000 Litros
Volumen de tanque All	2 tanques de 1000 Litros cada uno Total: 2000 Litros	500 Litros	Demanda $1100 \frac{\text{Litros}}{\text{Semana}}$ Tanque: 1500 Litros	2000 Litros
Ubicación	Cuarto de maquinas	Patio	Sótano	Parqueadero -Sótano 3

Ahorro AG	$60.7 \frac{m^3}{Año}$	$39.54 \frac{m^3}{Año}$	$1077.95 \frac{m^3}{Año}$	$1674 \frac{m^3}{Año}$
Ahorro ALI	$77.3 \frac{m^3}{Año}$	$20.7 \frac{m^3}{Año}$	$48.65 \frac{m^3}{Año}$	$96.3 \frac{m^3}{Año}$
Potencia requerida AG Tratada	0.119 HP ALL 0.47 HP AG	No implementado	10.08 HP	0.3 HP ALL 3.1 HP AG
Potencia bomba sistema hidráulico	$\frac{1}{4}$ HP lluvias $\frac{1}{2}$ HP grises	No implementado	6.57 HP	2.9 HP
Consumo energético año	$28,32 \frac{Kw}{Año}$	No implementado	$1600.5 \frac{Kwh}{Año}$	$1135 \frac{Kwh}{Año}$
Sistema de tratamiento ALI	1) Filtro de hojas, filtro grueso y malla anti-plagas. 2) Desviador de primer flujo (102 litros) (1 mm de precipitación) 3) Filtro autolimpiante 4) Tanque 1 (1100 L) -Tanque 2 (1100 L)	1) Malla anti-plagas 2) Filtro autolimpiante y filtro de hojas 3) Desviador del primer flujo	1) Filtro de hojas 2) Desviador de primer flujo 3) Filtro autolimpiante 4) Tanque almacenamiento Distribución zona común	1) Filtro de hojas 2) Desviador de primer flujo 3) Filtro autolimpiante 4) Tanque almacenamiento Distribución zona común
Sistema de tratamiento AG	1) Trampa de grasas de concreto (914 L) 2) Tanque de compensación (55 gal) 3) Dos filtros lentos de arena (paralelos) (55 gal) 4) Almacenamiento principal (300 L)	se decide no hacer ningún tipo de tratamiento al agua gris y diseñar el sistema para un ciclo de reúso de agua gris de 24 horas.	1) Trampa de grasas 2) Tanque sedimentador 3) Filtro de arena 4) Tanque almacenamiento 5) Desinfección 6) Distribución	1) Trampa de sólidos y pelos (con sistema de canasto para limpieza manual) 2) tanque receptor para el tratamiento biológico con sistema de aireación. 3) desinfección automatizada (que incluye adicción de cloro) y una bomba instalada en su interior, realiza el manejo de las aguas

				para el tratamiento primario y el pulido final.
Costo de inversión en el año de publicación	\$13'160,000	\$3,109,083, el de reúso de aguas grises un costo de \$1,565,120 y el de aguas lluvias un costo de \$1,592,597	\$43'526,228.86	\$99'105,997
Inflación	4.05%	4.16%	4.14%	4.28%
Costo de mantenimiento anual	\$2'476,440	\$252,000	\$984,838.70	\$3'392,530 \$924,500
Costos energético anual	\$298,921.00	No implementado	\$788,390.30	\$716,036
Costo inversión por predio	\$35'589,583.00 (sin construir) \$13'160.000 (construido)	\$3,109,083	\$ 385,187 - \$ 770.375	64% de rango de inversión menor a 3 millones COP por apartamento, seguido de un 21% entre 3 y 6 millones COP.
Costo de operación y mantenimiento por vivienda	\$505,291.00 anual	86% de los encuestados está dispuesto a realizarlas cada 15 días, el 69% dos veces por semana y el 33% de forma diaria.	\$726.28/mes \$1452.56/mes	31% para realizar mensualmente un mantenimiento preventivo del sistema; 83% para contratación de una persona adicional en caso de requerirse para su operación
Tiempo retorno inversión (años)	22	26	16	16
TIR	6.8%	4.61%	8%	8.19
VPN	\$14,111,605.26	\$ 939,355	\$231'663,827	169'497,962.6 $\frac{COP}{Año}$
Relación C/B	2.07	1.31	2.17	1.43

Ahorro de agua potable	224.64 $\frac{m^3}{Año}$ con sistema hibrido	59 $\frac{m^3}{Año}$ con sistema hibrido	2258 $\frac{m^3}{Año}$ con Sistema Hibrido,	1972.86 $\frac{m^3}{Año}$ con Sistema Hibrido,
	Disminución del consumo en un 24.2% respecto al sistema convencional	Disminución del consumo en un 25% respecto al sistema convencional	Disminución del consumo en un 20.95% respecto al sistema convencional	Disminución del consumo en un 11.97% respecto al sistema convencional

Apéndice D. Tabla Calidad del AGC generada en la vivienda de estudio del Barrio La Victoria por (Burgos Arias, 2024)

Parámetro	n	promedio
pH	27	7.49
CE (μS/cm)	27	188.07
Turbiedad (NTU)	27	280.95
NT (mgN/L)	26	6.37
PT (mgP/L)	23	0.74
Grasas y aceites (mg/L)	26	187.05
SST (mg/L)	24	214.58
DQO (mgO ₂ /L)	27	879.68
DBO5 (mgO ₂ /L)	26	387.92
CF (UFC/100 ml)	10	1.87E+05
CT (UFC/100 ml)	10	4.13E+05
Cloruros (mgCl ⁻ /L)	7	6.3

Nota. n= número de muestras analizadas; CE = conductividad eléctrica; CF = coliformes fecales; CT = coliformes totales. Adaptada de (Burgos Arias, 2024)

Apéndice E. Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida.

Tabla 8

Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido – edificio estrato medio Tribecca.

Categoría de Impacto	Unidad	Valor absoluto		Contribución relativa	
		Construcción	Operación	Construcción	Operación
Cambio climático, excluyendo el carbono biogénico	kg CO2 eq.	7.35.E-02	3.90.E+00	1.85%	98.24%
Cambio climático, incluyendo el carbono biogénico	kg CO2 eq.	7.35.E-02	4.53.E+00	1.60%	98.69%
Consumo de agua dulce	m3	2.55.E-04	3.68.E-03	6.49%	93.64%
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4 DB eq.	1.71.E-05	4.09.E-02	0.04%	100.00%
Eutrofización de agua dulce	kg P eq.	1.62.E-07	2.40.E-03	0.01%	100.00%
Toxicidad humana, cancerígeno	kg 1,4-DB eq.	4.26.E-05	1.99.E-01	0.02%	100.00%
Toxicidad humana, no cancerígeno	kg 1,4-DB eq.	6.41.E-03	1.74.E+01	0.04%	100.00%
Uso del suelo	Annual crop eq. y	2.05.E-03	1.48.E-01	1.38%	99.33%
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq.	5.00.E-05	5.60.E-02	0.09%	100.00%
Eutrofización marina	kg N eq.	1.28.E-06	4.76.E-03	0.03%	100.00%
Deterioro de la capa de ozono	kg CFC-11 eq.	1.61.E-08	1.32.E-05	0.12%	100.00%
Acidificación terrestre	kg CO2 eq.	1.04.E-04	4.87.E-03	2.11%	98.58%
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq.	1.78.E-02	1.37. E+00	1.29%	99.28%

Tabla 9

Contribución relativa y valores absolutos de los impactos ambientales por fases de ciclo de vida para el Sistema híbrido – edificio estrato alto Cabecera del Llano

Categoría de Impacto	Unidad	Valor absoluto		Contribución relativa	
		Construcción	Operación	Construcción	Operación
Cambio climático, excluyendo el carbono biogénico	kg CO2 eq.	7.35.E-02	3.90.E+00	1.85%	98.24%
Cambio climático, incluyendo el carbono biogénico	kg CO2 eq.	7.35.E-02	4.53.E+00	1.60%	98.69%
Consumo de agua dulce	m3	2.55.E-04	3.68.E-03	6.49%	93.64%
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4 DB eq.	1.71.E-05	4.09.E-02	0.04%	100.00%

Eutrofización de agua dulce	kg P eq.	1.62.E-07	2.40.E-03	0.01%	100.00%
Toxicidad humana, cancerígeno	kg 1,4-DB eq.	4.26.E-05	1.99.E-01	0.02%	100.00%
Toxicidad humana, no cancerígeno	kg 1,4-DB eq.	6.41.E-03	1.74.E+01	0.04%	100.00%
Uso del suelo	Annual crop eq.·y	2.05.E-03	1.48.E-01	1.38%	99.33%
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq.	5.00.E-05	5.60.E-02	0.09%	100.00%
Eutrofización marina	kg N eq.	1.28.E-06	4.76.E-03	0.03%	100.00%
Deterioro de la capa de ozono	kg CFC-11 eq.	1.61.E-08	1.32.E-05	0.12%	100.00%
Acidificación terrestre	kg CO2 eq.	1.04.E-04	4.87.E-03	2.11%	98.58%
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq.	1.78.E-02	1.37.E+00	1.29%	99.28%

Tabla 10

valor absoluto y contribución relativa de los impactos de la fase de construcción y operación del Sistema híbrido– edificio estrato alto Toscana

Categoría de impacto	Unidad	Valor absoluto		Contribución relativa	
		Fase construcción	Fase operación	Fase construcción	Fase operación
Cambio climático	kg CO2 eq.	1.53E-01	2.00E+00	7.12%	93.02%
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4 DB eq.	4.00E-05	1.83E-02	0.22%	99.46%
Eutrofización del agua dulce	kg P eq.	1.76E-07	1.13E-03	0.02%	100%
Toxicidad en humanos, cancerígeno	kg 1,4 DB eq.	7.73E-05	9.30E-02	0.08%	99.89%
Toxicidad en humanos, no cancerígeno	kg 1,4 DB eq.	1.62E-02	8.43E-01	1.89%	98.14%
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DB eq.	1.21E-04	2.57E-02	0.47%	99.61%
Eutrofización marina	kg N eq.	1.24E-06	2.22E-03	0.06%	100%
Potencial de creación de ozono fotoquímico	kg NOX eq.	8.66E-04	2.01E-03	30.17%	70.03%
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq.	2.44E-08	6.35E-06	0.38%	99.69%
Acidificación terrestre	kg SO2 eq.	4.31E-04	2.25E-03	16.08%	83.96%
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4 DB eq.	3.94E-02	7.91E-01	4.75%	95.30%