

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO  
DE AGUAS LLUVIAS PARA MÚLTIPLES USOS EN EL ABASTECIMIENTO RURAL  
MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. CASO: GARBANZAL

Francisco Germain Oñate Duarte

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Directora

PhD. Isabel Cristina Domínguez Rivera

Codirector

PhD. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

A mis padres, por su amor incondicional, su ejemplo y los innumerables sacrificios que me han permitido alcanzar cada meta.

A mis hermanos, por ser fuente constante de apoyo, alegría y motivación en los momentos más difíciles.

A mi abuela, por sus oraciones, sabiduría y cariño que siempre me acompañan.

Y a mi sobrino canino.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	10
1. Objetivos.....	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos .....	11
2. Marco Referencial .....	11
2.1 Marco Conceptual.....	12
2.1.4 Caracterización del caso de estudio y alternativas tecnológicas .....	17
3. Metodología.....	18
3.1. Definición del objetivo y alcance del Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	19
3.2. Caracterización del caso de estudio y alternativas tecnológicas .....	20
3.3. Elaboración del inventario del Ciclo de Vida (LCI) .....	21
3.4. Evaluación de impacto del Ciclo de Vida (LCIA).....	21
3.5. Análisis de sensibilidad de resultados del ACV .....	22
3.6. Análisis e interpretación de impactos ambientales de punto final .....	23
4. Resultados y discusión.....	24
4.1 Definición del objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	24
4.2 Caracterización de las alternativas tecnológicas .....	31
4.3 Inventario de Ciclo de Vida .....	32
4.4. Resultados de modelación en software OpenLCA.....	35
4.5. Resultados de análisis de sensibilidad en software OpenLCA.....	41
4.6. Discusión de resultados del análisis de ciclo de vida.....	43
5. Conclusiones y recomendaciones .....	48
Referencias Bibliográficas.....	50
Apéndices .....	52

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Etapas consideradas del sistema .....	25
<b>Tabla 2.</b> Esquema de las alternativas propuestas .....	31
<b>Tabla 3.</b> Volumen anual potencial de agua lluvia recolectada por alternativa (adaptado de Prieto, 2024). .....	34
<b>Tabla 4.</b> Contribución por categoría al Potencial de Calentamiento Global (GWP). .....	36
<b>Tabla 5.</b> Contribución por categoría al Consumo Acumulado de Energía (CED) .....	36
<b>Tabla 6</b> Análisis de sensibilidad a la precipitación (-20 %, Base, +20 %) – Indicadores de punto final .....	43

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema general de los componentes de un sistema de recolección de agua lluvia: captación, almacenamiento, tratamiento y distribución.....	13
Figura 2. Esquema del proceso de selección de criterios y subcriterio. Fuente: Prieto (2024) .....	18
Figura 3. Esquema de la metodología propuesta. ....	18
Figura 4. Límites del sistema del análisis de ciclo de vida.....	20
Figura 5. Comparación sintética de los resultados.....	37
Figura 6. Indicadores de punto medio por alternativa .....	38
Figura 7. Indicadores de punto final por alternativa .....	39
Figura 8. Análisis de sensibilidad de punto final por alternativa.....	43

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A .Configuración y supuestos de diseño – Alternativa 1 .....	52
Apéndice B. Componentes del sistema de captación, almacenamiento, impulsión y tratamiento –Alternativa 1 .....	52
Apéndice C. Vida útil y requerimientos de operación y mantenimiento – Alternativa 1 .	53
Apéndice D. Energía anual de operación – Alternativa 1.....	53
Apéndice E. Configuración, usos y supuestos de diseño – Alternativa 2.....	54
Apéndice F. Inventario adicional, criterios de mantenimiento y consumo energético de la Alternativa 2 respecto a la Alternativa 1.....	54
Apéndice G. Configuración, usos y supuestos de diseño – Alternativa 3 .....	55
Apéndice H. Componentes adicionales respecto a la Alternativa 1 (Alternativas 2 y 3).	55
Apéndice I. Energía de operación (anual) – Alternativa 1.....	55
Apéndice J. Cálculo de precipitación.....	56
Apéndice K. Contribución al Agotamiento de Recursos Fósiles.....	56
Apéndice L. Contribución al Agotamiento de Recursos Minerales .....	57
Apéndice M. Contribución a la Toxicidad Humana .....	57
Apéndice N. Contribución a la Ecotoxicidad .....	57
Apéndice O. Indicadores de punto medio por alternativa.....	57
Apéndice P. Indicadores de punto final por alternativa.....	58
Apéndice Q. Resultados – Daño a la salud humana (DALY/m <sup>3</sup> ) Punto Final.....	58
Apéndice R. Resultados – Daño a ecosistemas (species·yr/m <sup>3</sup> ) Punto Final.....	58

Apéndice S. Resultados – Daño a recursos naturales (USD/m <sup>3</sup> )Punto Final.....	58
Apéndice T. Supuestos generales adoptados en el modelamiento.....	59
Apéndice U. Resultados del balance hídrico anual.....	59
Apéndice V. Consumo energético asociado al bombeo.....	59

## Resumen

**Título:** Evaluación del impacto ambiental de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para múltiples usos en el abastecimiento rural mediante análisis de ciclo de vida. caso: garbanzal

**Autor:** Francisco Germain Oñate Duarte\*

**Palabras Clave:** Aprovechamiento de agua lluvia, análisis de ciclo de vida, abastecimiento rural, sostenibilidad ambiental, OpenLCA, sistemas descentralizados de agua

**Descripción:** El aprovechamiento de agua lluvia se ha consolidado como una alternativa viable para el abastecimiento de agua en zonas rurales con acceso limitado a sistemas centralizados; sin embargo, la selección de tecnologías suele basarse en criterios técnicos y económicos, sin considerar de manera integral su desempeño ambiental. En este contexto, el presente estudio evalúa comparativamente el impacto ambiental de tres alternativas de sistemas rurales de aprovechamiento de agua lluvia con diferentes configuraciones de uso: (i) usos domésticos potables y no potables, (ii) usos domésticos, agrícolas y avícolas para autoconsumo, y (iii) usos domésticos y avícolas para autoconsumo y producción a pequeña escala, aplicadas al caso de estudio de la vereda Garbanzal, en el departamento de Santander, Colombia.

La evaluación se realizó mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo un enfoque de “cuna a la tumba”, empleando el software OpenLCA, la base de datos LCA Commons y los métodos de caracterización TRACI 2.1 y ReCiPe 2016. Se analizaron indicadores de punto medio y punto final, considerando como unidad funcional un metro cúbico de agua lluvia aprovechada. Asimismo, se incorporó un análisis de sensibilidad frente a variaciones en la precipitación anual. Los resultados evidencian que, aunque las tres alternativas presentan configuraciones tecnológicas similares, el volumen de agua efectivamente aprovechado y los usos finales influyen de manera determinante en su desempeño ambiental. La alternativa orientada al autoconsumo doméstico, agrícola y avícola presenta los menores impactos ambientales por unidad funcional, lo que resalta la importancia de integrar criterios ambientales en la toma de decisiones para el diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Dominguez Rivera. PhD En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

### Abstract

**Title:** Environmental Impact Assessment of Rainwater Harvesting Systems for Multiple Uses in Rural Water Supply Using Life Cycle Assessment: Case Study of Garbanzal

**Author:** Francisco Germain Oñate Duarte\*\*

**Key Words:** Rainwater harvesting, life cycle assessment, rural water supply, environmental sustainability, OpenLCA, decentralized water systems

**Description:** Rainwater harvesting has become a feasible alternative for water supply in rural areas with limited access to centralized systems; however, the selection of technological options is often based primarily on technical and economic criteria, overlooking their overall environmental performance. In this context, this study presents a comparative Life Cycle Assessment (LCA) of three rural rainwater harvesting system alternatives with different end-use configurations: (i) domestic potable and non-potable uses, (ii) domestic, agricultural, and poultry uses for self-consumption, and (iii) domestic and poultry uses for self-consumption and small-scale production. The analysis was conducted for the case study of Garbanzal village, located in the department of Santander, Colombia.

The assessment was carried out following a “cradle-to-grave” approach using the OpenLCA software, the LCA Commons database, and the TRACI 2.1 and ReCiPe 2016 impact assessment methods. Both midpoint and endpoint impact indicators were evaluated, using one cubic meter of harvested rainwater as the functional unit. In addition, a sensitivity analysis was performed to assess the influence of annual precipitation variability on the results.

The results show that, although the three alternatives exhibit similar technological configurations, the volume of water effectively harvested, and its final uses play a decisive role in their environmental performance. The alternative designed for domestic, agricultural, and poultry self-consumption presents the lowest environmental impacts per functional unit, highlighting the importance of incorporating environmental criteria into decision-making processes for the design of rural water supply systems.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera, PhD in Agriculture, Food and Rural Development. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD in Engineering, with emphasis on Sanitary and Environmental Engineering.

## Introducción

El acceso al agua potable segura continúa siendo uno de los principales desafíos en las zonas rurales de países en desarrollo, particularmente en regiones andinas donde la dispersión poblacional, las limitaciones topográficas y la falta de infraestructura dificultan la provisión de servicios centralizados de abastecimiento (WHO & UNICEF, 2023). En Colombia, una proporción significativa de la población rural depende de fuentes alternativas de agua, muchas veces sin tratamiento adecuado, lo que incrementa los riesgos para la salud humana y limita el desarrollo social y productivo de las comunidades (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

En este contexto, los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias (SAALL) han surgido como una solución técnica viable para el abastecimiento rural, al permitir la captación, almacenamiento y uso del recurso hídrico a escala local. Estos sistemas ofrecen ventajas como la reducción de la dependencia de fuentes superficiales o subterráneas, la adaptación a condiciones de variabilidad climática y la posibilidad de atender múltiples usos del agua, incluyendo consumo doméstico, actividades agrícolas y producción avícola de pequeña escala (Ghimire et al., 2017; Patel & Ghimire, 2022). No obstante, la selección de la alternativa tecnológica más adecuada no debe basarse únicamente en criterios técnicos o económicos, sino que también debe considerar su desempeño ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una herramienta robusta para evaluar los impactos ambientales asociados a productos y sistemas desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (ISO, 2006a). Aplicado a sistemas de abastecimiento descentralizados, el ACV permite identificar los procesos y componentes que generan mayores cargas ambientales, comparar alternativas tecnológicas bajo una unidad funcional común y apoyar la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad (ISO, 2006b; Ghimire et al., 2017).

Sin embargo, en el contexto rural colombiano, aún son limitados los estudios que integran el ACV en la evaluación comparativa de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias con múltiples usos.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental de tres alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para abastecimiento rural con múltiples usos, mediante la aplicación del análisis de ciclo de vida. El estudio se desarrolla para la vereda Garbanzal como caso de estudio, considerando las particularidades climáticas, técnicas y de uso del agua del contexto local. Los resultados obtenidos buscan aportar criterios ambientales cuantitativos que complementen enfoques técnicos, sociales y económicos previos, contribuyendo a una selección más informada y sostenible de sistemas de abastecimiento rural.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el impacto ambiental de sistemas rurales de aprovechamiento de aguas lluvias para abastecimiento rural con múltiples usos de agua. Caso: Garbanzal.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar los tres sistemas tecnológicos de SAALL y usos finales del agua en el caso de estudio.
- Determinar mediante ACV los impactos ambientales de los SAALL del caso de estudio.
- Analizar los impactos ambientales de punto final de los SAALL del caso de estudio.

## **2. Marco Referencial**

En esta sección se expone la información requerida para realizar la investigación; por un lado, se presentan los conceptos fundamentales tratados en el presente proyecto; luego, se describen las investigaciones más recientes relacionadas con el tema, apoyadas por la búsqueda en

bases de datos. Se concluye con una recopilación de los datos encontrados y los posibles vacíos en el conocimiento. En la preparación de esta sección se utilizó la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (modelo GPT-4, desarrollada por OpenAI) como apoyo en la redacción preliminar de textos, organización de ideas y verificación de coherencia argumentativa. Su uso se limitó a funciones de asistencia lingüística y estructural; todo el contenido, análisis y conclusiones reflejan el criterio y autoría del estudiante.

## ***2.1 Marco Conceptual***

En esta sección se definen los conceptos de aprovechamiento de agua lluvia, análisis de ciclo de vida y selección de alternativas.

### ***2.1.1. Aprovechamiento de Agua Lluvia***

El crecimiento poblacional a lo largo de los años obligó a las civilizaciones a ocupar nuevas zonas, las cuales eran áridas y semiáridas, lo que trajo consigo el uso de los primeros sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, los cuales eran edificaciones que contaban con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua lluvia. En la República Romana (siglos III y IV a.C.), la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas “la Domus” que contaban con un espacio principal a cielo abierto (“atrio”) y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua lluvia llamado “impluvium”, al que el agua lluvia entraba por un orificio en el techo llamado “compluvium”. En Loess Plateau, en la provincia de Gansu en China existían pozos y jarras para la captación de agua lluvia desde hace más de 2000 años. En Irán se encuentran los “abarbans”, sistemas tradicionales locales para la captación y el almacenamiento de aguas lluvias (Ballén Suárez et al., 2000). Actualmente, la recolección de agua de lluvia es una alternativa que incluye la recolección y almacenamiento de agua que escurre de los tejados, superficies terrestres, superficies de carreteras o cuencas rocosas (Abdulla y Al-

Shareef, 2009; Kahinda et al., 2007). Cada sistema de recolección de agua de lluvia consta de una superficie de captación para recolectar el agua de lluvia (es decir, la superficie del techo o del suelo) y un sistema de distribución para transportar el agua a un tanque de almacenamiento (Hanida et al., 2003). Con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento general de los sistemas de recolección de agua lluvia, en la Figura 1 se presenta un esquema conceptual que ilustra sus componentes principales: captación, almacenamiento, tratamiento y distribución, así como el flujo del agua entre cada una de estas etapas.

### Figura 1

*Esquema general de los componentes de un sistema de recolección de agua lluvia: captación, almacenamiento, tratamiento y distribución*



*Fuente: Elaboración propia a partir de Abdulla y Al-Shareef (2009) y Hanida et al. (2003)*

#### 2.1.2 Análisis de Ciclo de Vida

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite evaluar el desempeño ambiental de un proceso, producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida completo y es usado principalmente para comparar alternativas (Luterbacher et al., 2009). Solo algunos autores incorporan este tipo de análisis en sus métodos de diseño de proyectos y sistemas ambientales (Luterbacher et al., 2009).

Es por esto que, desde la perspectiva del ACV, se han desarrollado diversas herramientas a nivel mundial para llevar a cabo estudios de ACV relacionados con el sector de la ingeniería

(Jorge-Ortiz et al., 2025). En Colombia, los ACV se realizan conforme a la norma ISO 14040 en materia ambiental (Jorge-Ortiz et al., 2025). Según esta norma, el ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales (por ejemplo, la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertidos) a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima hasta su disposición final (ISO, 2006).

La integración de criterios ambientales en la evaluación de alternativas es esencial para promover la sostenibilidad y minimizar los impactos negativos en el entorno. Diversos estudios han resaltado la importancia de incorporar estos aspectos en los procesos de toma de decisiones (Farahdel et al., 2024).

El ACV es una herramienta fundamental para evaluar alternativas en SAALL, ya que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados a cada etapa del proceso, desde la captación hasta el consumo. Al considerar aspectos como el consumo de energía, los materiales utilizados y las emisiones generadas, el ACV facilita una comparación objetiva entre distintas alternativas, orientando la toma de decisiones hacia soluciones más sostenibles y eficientes en la gestión del recurso hídrico (Farahdel et al., 2024).

### ***2.1.3 Estado del Arte***

Los SAALL han cobrado importancia como estrategia sostenible para la gestión del recurso hídrico en diversos contextos, desde la agricultura hasta el entorno urbano. Su implementación permite mejorar la resiliencia de los sistemas productivos ante la variabilidad climática, garantizar el abastecimiento de agua en zonas con escasez de agua y contribuir a la conservación de los ecosistemas. A continuación, se presentan diversos estudios que evidencian la relevancia y los beneficios de esta práctica en diferentes regiones y sectores.

Los SAALL son una estrategia clave para mejorar la resiliencia agrícola y enfrentar la escasez hídrica en diversas regiones del mundo. En un estudio realizado en el distrito de Wadla, al noreste de Etiopía, se identificaron los factores determinantes para la adopción de prácticas agrícolas climáticamente inteligentes, entre ellas la cosecha de agua lluvia. Se encontró que el 59% de los agricultores implementaron esta práctica, influenciados por factores como el acceso al crédito, la capacitación y la distancia al mercado, lo que resalta la importancia de generar políticas de apoyo para fomentar su uso (Belay et al., 2023).

En zonas de cultivo por secano, la cosecha de agua lluvia ha demostrado ser clave para la intensificación sostenible de la agricultura y la generación de resiliencia en los pequeños productores. Un estudio llevado a cabo entre 2013 y 2021 evaluó un modelo de producción en un sistema de cultivo de secano con la implementación de estanques de almacenamiento de agua lluvia, cultivos de bajo requerimiento hídrico y agroforestería. Los resultados evidenciaron un aumento en la productividad y la rentabilidad, destacando que, sin el almacenamiento de agua lluvia, los agricultores no podían realizar cultivos en la temporada seca (Palsaniya et al., 2023).

Diferentes estudios han analizado la efectividad de los SAALL, destacando su impacto en la reducción de la pobreza y en la mejora de la calidad de vida. Por ejemplo, en Gansu, China, la captación de agua lluvia ha sido clave para mitigar la escasez hídrica y mejorar las condiciones socioeconómicas de las comunidades rurales (Zhu, 2003). De manera similar, en Mbale, Uganda, esta estrategia se ha utilizado para fortalecer la seguridad alimentaria mediante el abastecimiento de agua para la producción agrícola (Durodola et al., 2020). En Ghana, el gobierno ha promovido iniciativas de captación de agua lluvia, las cuales han tenido efectos positivos en los medios de vida locales y el equilibrio entre el trabajo y la vida personal (Koranteng et al., 2024). En el contexto del sudeste asiático, un estudio en Filipinas evidenció la percepción favorable de las

comunidades hacia los sistemas integrados de captación de agua lluvia como una solución efectiva para el suministro en regiones con escasez hídrica (Ignacio et al., 2019). Asimismo, en Islamabad, Pakistán, se ha demostrado que estos sistemas pueden satisfacer la demanda doméstica de agua, contribuyendo a la resiliencia hídrica de las viviendas rurales (Rashid et al., 2018).

En paralelo, el ACV se ha utilizado como una herramienta clave para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de recolección de agua lluvia y apoyar la selección de alternativas tecnológicas en viviendas rurales (Ignacio et al., 2019). A través de este enfoque, es posible cuantificar impactos ambientales asociados a las etapas de captación, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua lluvia, mediante indicadores como potencial de calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq), consumo de energía (MJ), consumo de recursos materiales (kg) y toxicidad humana y ecotoxicidad. Esta cuantificación permite comparar diferentes configuraciones, tecnologías y materiales, con el fin de optimizar la eficiencia del sistema y minimizar sus efectos negativos sobre el entorno. La integración de este enfoque en la planificación y gestión de los sistemas de abastecimiento de agua lluvia es fundamental para garantizar soluciones sostenibles que respondan a las necesidades de las comunidades rurales (Prieto, 2024). Por ejemplo, un estudio de captación de agua de lluvia reveló beneficios significativos en términos de autonomía hídrica y bienestar comunitario (Castelán, 2022).

Si bien estos estudios evidencian el potencial del ACV para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua lluvia, en Colombia aún son limitadas las evaluaciones aplicadas específicamente a contextos rurales, donde las condiciones de acceso, infraestructura y uso del recurso difieren notablemente de los entornos urbanos. En este sentido, los trabajos desarrollados previamente por Prieto (2024), en el Trabajo de Grado titulado *“Propuesta de herramienta de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para asentamientos*

*rurales andinos, considerando criterios técnicos, sociales y económicos*”, constituyen un referente para el análisis de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en viviendas rurales, al establecer una caracterización inicial de alternativas desde el punto de vista técnico, económico y social. No obstante, dicho estudio no abordó, desde el punto de vista ambiental, un análisis comparativo detallado entre diferentes configuraciones de captación ni integró escenarios ampliados de uso doméstico, agrícola y avícola. Por ello, la presente investigación retoma estos avances y los complementa mediante un ACV más exhaustivo, orientado a comparar tres alternativas tecnológicas bajo condiciones de operación en la vereda Garbanzal (Santander, Colombia), lo que permite fortalecer la toma de decisiones y aportar evidencia para el diseño de sistemas más sostenibles en zonas rurales del país.

#### ***2.1.4 Caracterización del caso de estudio y alternativas tecnológicas***

La vereda Garbanzal es el sitio objeto de estudio, el cual se seleccionó por el lugar donde se desarrolló un estudio previo de alternativas de SAALL en contextos rurales, adelantado por Prieto (2024). La vereda se encuentra aproximadamente a 2 km de la cabecera municipal del municipio Los Santos (Santander) y tiene un área de 1.97 km<sup>2</sup>, donde viven 145 personas en 38 viviendas (DANE, 2014). Además, las características hidrológicas, combinadas con los efectos del cambio climático, han hecho del suministro de agua en este sector un problema relevante (INGEOMINAS, 2009). El proceso metodológico propuesto por Prieto (2024) se basó en la aplicación secuencial de criterios y subcriterios de tipo económico, social y técnico, organizados en diferentes niveles de filtrado. En la Figura 1 se ilustra el esquema del proceso de selección de criterios y subcriterios, destacando la evolución y depuración de estos a lo largo de las distintas etapas.

**Figura 2.**

*Esquema del proceso de selección de criterios y subcriterio. Fuente: Prieto (2024)*



### 3. Metodología

Esta investigación busca complementar el proceso de selección de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en viviendas rurales mediante una evaluación ambiental a través del ACV, con el fin de comprender y comparar los impactos ambientales asociados a las diferentes alternativas tecnológicas. La Figura 3 sintetiza la metodología empleada para el logro del objetivo; sus fases se describen a continuación.

**Figura 3.**

*Esquema de la metodología propuesta.*



El ACV a desarrollar tiene como propósito comparar el desempeño ambiental de tres alternativas de sistemas de recolección de agua lluvia, diferenciadas por su alcance funcional: (1) un sistema diseñado para usos domésticos; (2) un sistema que incorpora usos domésticos, agrícolas y avícolas para autoconsumo; y (3) un sistema que incluye usos domésticos y avícolas tanto para

autoconsumo como para producción a pequeña escala. El análisis se realiza para el caso de la selección de alternativas de SAALL en la vereda Garbanzal (departamento de Santander), incluyendo el componente ambiental en la propuesta planteada por Prieto (2024).

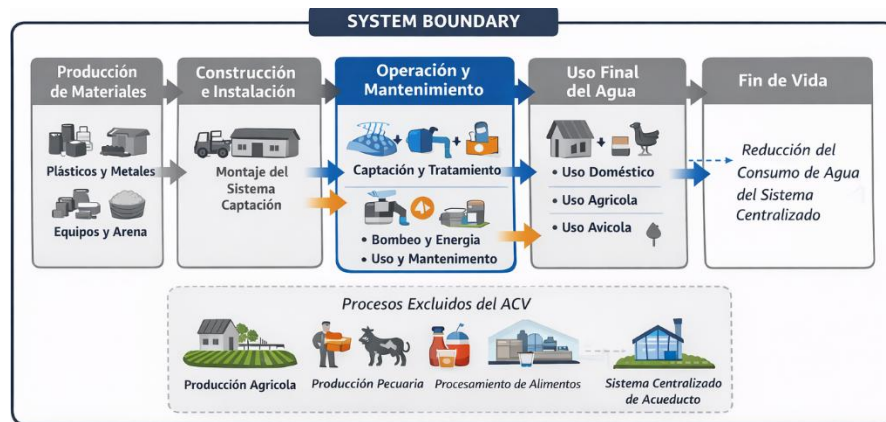
### ***3.1. Definición del objetivo y alcance del Análisis del Ciclo de Vida (ACV)***

El análisis de ciclo de vida se desarrolló con el propósito de comparar el desempeño ambiental de tres configuraciones de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, considerando diferencias en su nivel de complejidad tecnológica y en los usos finales del agua.

La unidad funcional se definió como el volumen de agua aprovechada por el sistema, seleccionándose 1 m<sup>3</sup> de agua como referencia de comparación. Esta unidad funcional fue elegida debido a que permite comparar alternativas con diferentes escalas, demandas y configuraciones tecnológicas, y es consistente con enfoques empleados en estudios previos sobre sistemas de recolección de agua lluvia (Ghimire et al., 2014; Patel & Ghimire, 2022).

El alcance del estudio se estableció bajo un enfoque de “cuna a la tumba”, el cual incluyó las etapas de obtención de materiales, construcción, operación, mantenimiento y fin de vida de los sistemas. Este enfoque permite capturar de manera integral los impactos ambientales asociados a todas las fases del ciclo de vida, siguiendo criterios similares a los adoptados por Ghimire et al. (2017).

Adicionalmente, considerando que las alternativas evaluadas se diferencian principalmente por los usos finales del agua, el alcance del estudio incorporó la modelación ambiental de dichos usos, así como su efecto en la reducción del consumo de agua proveniente de sistemas centralizados de abastecimiento. Con el fin de clarificar el alcance del análisis de ciclo de vida, la Figura 4 presenta de manera esquemática los límites del sistema (system boundary) definidos para los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia evaluados.

**Figura 4***Límites del sistema del análisis de ciclo de vida*

### 3.2. Caracterización del caso de estudio y alternativas tecnológicas

El caso de estudio corresponde a una vivienda rural para la cual se evaluaron tres alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, diseñadas con base en los lineamientos propuestos por Prieto (2024).

La definición de cada alternativa se realizó considerando: (i) **usos finales del agua** (domésticos, agrícolas y pecuarios); (ii) las **demandas hídricas** asociadas a cada uso; (iii) el **área de captación** y los componentes hidráulicos del sistema; y (iv) los **procesos de tratamiento** requeridos según el nivel de calidad del agua.

Para todas las alternativas se asumió la incorporación de un esquema de tratamiento compuesto por: (i) un tratamiento preliminar mediante malla en canaletas, rejillas en bajantes y un dispositivo desviador de primer flujo; (ii) un tratamiento secundario a través de un filtro lento de arena; y (iii) un tratamiento terciario basado en la ebullición del agua, de acuerdo con lo propuesto por Prieto (2024). Estas configuraciones fueron utilizadas como base para la construcción de los modelos de inventario en OpenLCA.

### ***3.3. Elaboración del inventario del Ciclo de Vida (LCI)***

El inventario del ciclo de vida incluyó la recopilación de datos primarios y secundarios relacionados con materiales, consumo energético, actividades de mantenimiento, durabilidad de los componentes y procesos de fin de vida, siguiendo enfoques similares a los reportados por Ghimire et al. (2014). Para cada alternativa se consideraron: (i) los materiales empleados en la infraestructura del sistema (tanques, canaletas, filtros, bombas, entre otros); (ii) el consumo energético asociado a la operación, particularmente en los sistemas que requirieron bombeo o procesos de ebullición del agua; (iii) la frecuencia de mantenimiento y reposición de componentes, tales como filtros, productos químicos y lámparas UV; (iv) la vida útil estimada del sistema y de cada uno de sus componentes; y (v) el volumen anual de agua recolectada, calculado a partir de datos climáticos locales y del área efectiva de captación.

Los datos se obtuvieron principalmente de literatura técnica, de bases de datos como Ecoinvent y de estudios previos (Ghimire et al., 2014; Ghimire et al., 2017; Patel & Ghimire, 2022), que proporcionaron parámetros de referencia sobre materiales y consumo energético para cada tipo de sistema. Este inventario sirvió como base para la evaluación de impactos ambientales mediante la selección de indicadores de punto medio, tales como potencial de calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq), consumo acumulado de energía (MJ), agotamiento de recursos fósiles y minerales, y potencial de toxicidad humana y ecotoxicidad, los cuales permiten capturar los principales efectos ambientales asociados a sistemas de aprovechamiento de agua lluvia y facilitan la comparación entre alternativas tecnológicas.

### ***3.4. Evaluación de impacto del Ciclo de Vida (LCIA)***

La evaluación de impactos del ciclo de vida se llevó a cabo utilizando el software especializado de acceso libre OpenLCA, empleando la base de datos LCA Commons y los métodos

de caracterización ambiental TRACI 2.1 y ReCiPe 2016, en concordancia con su aplicación en estudios previos de sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua en contextos rurales (Ghimire et al., 2017; Patel & Ghimire, 2022).

Con base en experiencias previas de ACV en sistemas descentralizados de agua y en la naturaleza de los procesos evaluados, se seleccionaron indicadores de punto medio que permitieran capturar los impactos asociados principalmente al uso de materiales, al consumo energético y a los procesos de tratamiento. En particular, se consideraron el potencial de calentamiento global (GWP), por su relación directa con el consumo de combustibles fósiles y energía eléctrica; el consumo acumulado de energía (CED), como indicador integral de la demanda energética a lo largo del ciclo de vida; el agotamiento de recursos fósiles y minerales, para evaluar la presión ejercida por el uso de materiales plásticos y metálicos; y las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad, relevantes para identificar impactos potenciales asociados a la producción de materiales, generación de energía y emisiones indirectas al ambiente.

La selección de estos indicadores de punto medio permite identificar de manera detallada los procesos y componentes que contribuyen en mayor medida a los impactos ambientales del sistema, facilitando la comparación entre alternativas tecnológicamente similares y la identificación de oportunidades de mejora en el diseño de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en contextos rurales.

### ***3.5. Análisis de sensibilidad de resultados del ACV***

Para fortalecer la interpretación de los resultados, se realizó un análisis de sensibilidad que examinó cómo estos variaron ante cambios en parámetros clave, tales como la precipitación (comparando años húmedos y secos), la inclusión o no de tratamiento químico con cloro, el uso de energía renovable frente a energía de la red, y la diferencia entre la vida útil proyectada y la real

del sistema. Este enfoque siguió la lógica de Ghimire et al. (2014) y Patel & Ghimire (2022), quienes evidenciaron que pequeñas variaciones en los insumos o en el diseño pudieron modificar significativamente los impactos acumulados del sistema.

### ***3.6. Análisis e interpretación de impactos ambientales de punto final***

Finalmente, se interpretaron los resultados para evaluar el desempeño ambiental de las alternativas. Esta etapa incluyó:

El análisis de resultados permitió: (i) la identificación de los puntos críticos y de los procesos con mayor contribución a los impactos ambientales; (ii) la evaluación de compensaciones (*trade-offs*) entre el desempeño funcional de los sistemas y su carga ambiental; y (iii) la discusión de la viabilidad de cada alternativa en función de su contexto de aplicación, considerando usos rurales, domésticos y productivos. La interpretación fue guiada por los principios del ACV establecidos en los estudios de Ghimire et al. (2017) y reforzados por Patel & Ghimire (2022), quienes integraron los resultados del ACV en procesos de toma de decisión y diseño comunitario.

El análisis de indicadores de punto final permitió evaluar los impactos ambientales de manera más integrada y comprensible, al traducir los resultados de los indicadores de punto medio en efectos potenciales sobre áreas de protección clave. En este estudio, el alcance del ACV incluyó las fases de construcción, operación y postoperación de los sistemas, considerando tanto la fabricación e instalación de los componentes como su uso, mantenimiento y disposición final al término de su vida útil. De esta manera, los impactos asociados a la fase de operación no se evaluaron de forma aislada, sino en conjunto con las demás etapas relevantes del ciclo de vida.

En este estudio se consideraron tres indicadores de daño: “Damage to human health”, que reflejó las consecuencias potenciales sobre la salud humana, expresadas en años de vida ajustados por discapacidad (DALY); “Damage to ecosystem diversity”, que representó la pérdida potencial

de biodiversidad en ecosistemas, medida en especies-año; y “Damage to natural resources”, que estimó el agotamiento de recursos naturales, expresado en costos económicos asociados a la futura extracción de recursos energéticos y minerales. Su cálculo se realizó siguiendo los protocolos establecidos por el método ReCiPe 2016 a nivel de punto final (Endpoint H), desarrollado por Huijbregts et al. (2017), y de acuerdo con las directrices de la norma ISO 14044 para la evaluación de impactos del ciclo de vida. Estos indicadores permitieron una comparación más holística entre las alternativas evaluadas, al vincular los impactos ambientales con dimensiones relevantes para la sostenibilidad a largo plazo.

## **4. Resultados y discusión**

### ***4.1 Definición del objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)***

#### ***4.1.1 Objetivo del estudio***

El análisis de ciclo de vida permitió evaluar y comparar los impactos ambientales asociados a tres configuraciones de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias (SAALL) aplicables a zonas rurales de la vereda Garbanzal, municipio de Los Santos (Santander). Las alternativas analizadas se diferenciaron por su alcance funcional y nivel de complejidad tecnológica: (i) un sistema orientado exclusivamente a usos domésticos (Alternativa 1); (ii) un sistema destinado a usos domésticos, agrícolas y avícolas para autoconsumo (Alternativa 2); y (iii) un sistema enfocado en usos domésticos y avícolas, con autoconsumo y producción a pequeña escala (Alternativa 3).

La comparación mediante indicadores ambientales de punto medio y punto final permitió identificar diferencias claras en el desempeño ambiental de las alternativas a lo largo de su ciclo de vida. Estos resultados constituyen un insumo clave para la integración del componente ambiental dentro de la herramienta de selección propuesta por Prieto (2024), aportando evidencia

cuantitativa para la toma de decisiones orientadas a soluciones hídricas más sostenibles en contextos rurales.

#### ***4.1.2 Unidad funcional (UF)***

La unidad funcional seleccionada fue **1 m<sup>3</sup> de agua aprovechada** por cada sistema, considerando el destino final del recurso en los usos establecidos para cada alternativa. Esta definición permite una comparación justa entre alternativas con diferentes volúmenes y propósitos de uso, siguiendo enfoques previos aplicados en ACV de sistemas de captación de agua lluvia (Ghimire et al., 2014; Patel & Ghimire, 2022).

#### ***4.1.3. Límites del sistema***

El alcance del estudio considera un enfoque “de la cuna a la tumba”, que incluye todas las etapas relevantes del ciclo de vida, desde la obtención de materias primas para la construcción de los sistemas hasta la disposición final o el reciclaje de sus componentes. Para cada alternativa analizada, se incluyeron explícitamente las siguientes etapas y componentes tecnológicos:

**Tabla 1.**

*Etapas del sistema consideradas*

<b>Etapas del sistema</b>	<b>Descripción</b>
Captación	Superficies de techo, canaletas y estructuras de conducción inicial del agua lluvia.
Transporte	Bajantes y tuberías destinadas a la conducción del agua hacia el sistema de almacenamiento.
Almacenamiento	Tanques elevados y a nivel del suelo, así como los elementos auxiliares asociados.
Tratamiento	Procesos de filtración, ebullición u otros métodos de tratamiento incorporados según la alternativa evaluada.
Distribución interna	Redes internas de conducción y mecanismos de bombeo, cuando aplicó según la configuración del sistema.

Uso final del agua	Usos domésticos, agrícolas y/o avícolas, de acuerdo con la configuración de cada alternativa.
Fin de vida	Disposición final, reciclaje o reemplazo de los componentes al término de su vida útil.

**Nota:** El límite del sistema se define hasta el uso final del agua en las actividades domésticas, agrícolas y avícolas consideradas en cada alternativa. No se incluyen en el análisis los procesos productivos asociados a la agricultura o la actividad pecuaria (por ejemplo, producción de cultivos, crecimiento animal o transformación de productos), dado que estos no forman parte del sistema tecnológico de aprovechamiento de agua lluvia evaluado y su inclusión introduciría variables externas que no son comparables entre alternativas.

Quedan excluidos de los límites del sistema los impactos asociados a la construcción de edificaciones existentes, viajes de los usuarios no relacionados con la instalación, operación o mantenimiento del sistema y cualquier infraestructura ajena al sistema de captación y uso de agua lluvia.

#### ***4.1.4 Supuestos iniciales del estudio***

- Vida útil de referencia de cada sistema: 20 años, ajustable según el componente.

La selección de una vida útil de 20 años se fundamentó en valores comúnmente adoptados en ACV para sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia. Estudios como los de Ghimire et al. (2014, 2017) y Patel & Ghimire (2022) emplean rangos de 15 a 25 años para equipos similares (tanques, estructuras de soporte, canaletas y sistemas básicos de tratamiento), lo que permite garantizar comparabilidad metodológica. Además, la normativa técnica y la literatura especializada en diseño de infraestructura hidráulica para zonas rurales suelen considerar horizontes de planificación del orden de 20 años, con el fin de capturar adecuadamente el desempeño del sistema durante su vida útil. En el contexto colombiano, el *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS* establece periodos de diseño comprendidos entre 20 y 25 años para sistemas de abastecimiento de agua, incluyendo aquellos aplicados a pequeñas comunidades y zonas rurales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio,

2017). De manera consistente, lineamientos internacionales para sistemas descentralizados de abastecimiento de agua recomiendan horizontes similares para evaluar sostenibilidad técnica y ambiental a largo plazo (WHO, 2017; Ghimire et al., 2014). lo que hace de este un valor representativo y aceptado para evaluar sostenibilidad a largo plazo. Por ello, se adoptó este periodo como referencia, ajustando la duración específica de cada componente según su vida útil individual, reportada en la literatura o por los fabricantes.

- Condiciones de precipitación promedio anual basadas en registros climáticos locales.

Bajo condiciones de precipitación promedio anual, los volúmenes de captación estimados permitieron representar el comportamiento típico de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en el contexto de estudio. El uso de valores medios de precipitación evitó que los resultados estuvieran dominados por condiciones climáticas extremas, reflejando así un escenario operativo representativo de la oferta hídrica habitual del territorio.

Esta aproximación permitió comparar las alternativas en un marco climático homogéneo, garantizando que las diferencias observadas en los impactos ambientales se atribuyeran principalmente a las características estructurales, funcionales y operativas de cada sistema, y no a variaciones externas en la disponibilidad hídrica. Adicionalmente, los efectos de escenarios climáticos atípicos, como años secos o húmedos, fueron evaluados de manera independiente mediante el análisis de sensibilidad, lo que fortaleció la interpretación de los resultados del ACV.

- Suministro energético principal de la red nacional; en escenarios de sensibilidad, se evaluará la energía renovable.

Se tomó como referencia el suministro energético de la red nacional ya que corresponde a la fuente real y predominante de energía en la zona de estudio. Este enfoque asegura la coherencia con las condiciones actuales de operación del sistema y con la matriz eléctrica del país, la cual influye

directamente en los impactos de categorías como el cambio climático o el agotamiento de recursos. No obstante, en coherencia con estudios previos y con lineamientos metodológicos del análisis de ciclo de vida orientados a evaluar escenarios de sostenibilidad futura, se incluyó un escenario alternativo con incorporación de energía renovable dentro del análisis de sensibilidad. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de ACV para sistemas de agua e infraestructura, con el fin de explorar la influencia de cambios en la matriz energética sobre los impactos ambientales y apoyar la toma de decisiones de largo plazo (ISO 14044, 2006; Ghimire et al., 2017; Patel & Ghimire, 2022).

- Métodos de tratamiento estandarizados en todas las alternativas: malla en canaletas, rejilla en bajantes, desviador de primer flujo, filtro lento de arena y ebullición.

La estandarización de los métodos de tratamiento (malla en canaletas, rejilla en bajantes, desviador de primer flujo, filtro lento de arena y ebullición) se basó en dos criterios:

- **Asegurar la comparabilidad entre las alternativas**, evitando que la diferencias en la calidad del tratamiento introduzcan sesgos en la evaluación ambiental.
- **Alinearse con el diseño base establecido por Prieto (2024)** y con las prácticas técnicas recomendadas para sistemas de abastecimiento rural en Colombia, tales como la prefiltración mediante mallas y rejillas, la eliminación de las primeras escorrentías, la filtración lenta en arena y la desinfección térmica, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS* del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017), así como en las guías de la Organización Mundial de la Salud para el uso seguro del agua en contextos rurales y descentralizados (WHO, 2011; WHO, 2017).

De esta forma, se garantizó que los impactos comparados provinieran principalmente de las diferencias estructurales y funcionales de cada alternativa, y no de variaciones en los procesos de tratamiento del agua, dado que en todas las alternativas se consideró una fracción del volumen recolectado destinada a consumo humano, la cual fue sometida a la misma cadena de tratamiento. El resto del agua, destinada a usos no potables, no requirió procesos adicionales de potabilización, en coherencia con el diseño base propuesto por Prieto (2024).

- Datos de materiales y procesos obtenidos de la literatura técnica y de las bases de datos Ecoinvent y LCA Commons.

La selección de estas fuentes respondió a la necesidad de emplear bases de datos consolidadas, validadas y ampliamente utilizadas en estudios de análisis de ciclo de vida. *Ecoinvent* es reconocida como una de las bases de datos internacionales de referencia en ACV, al proporcionar inventarios armonizados y revisados por pares para materiales, transporte, energía y procesos industriales, siendo ampliamente utilizada en estudios académicos y aplicaciones regulatorias (Wernet et al., 2016; ISO 14044, 2006). Por su parte, *LCA Commons* reúne inventarios desarrollados y verificados por agencias gubernamentales y centros de investigación de los Estados Unidos, con énfasis en sectores ambientales e infraestructura, lo que la convierte en una fuente relevante para el modelado de sistemas de agua y energía en contextos comparables (US EPA, 2023). Su combinación permitió llenar vacíos de información y asegurar la representatividad de los materiales y procesos incluidos.

La literatura técnica y los estudios de Ghimire et al. 2017 complementaron estos datos, aportando parámetros específicos para sistemas de captación de agua lluvia, especialmente en contextos rurales.

#### *4.1.5 Método de evaluación del impacto*

Los resultados del análisis de ciclo de vida se obtuvieron a partir del modelamiento de las tres alternativas de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, permitiendo cuantificar y comparar sus impactos ambientales en diferentes categorías de punto medio y punto final. La evaluación evidenció diferencias marcadas entre las alternativas, tanto en la magnitud como en la composición de los impactos ambientales, lo que facilitó la identificación de los procesos y componentes con mayor contribución a la carga ambiental total.

Los impactos fueron analizados inicialmente mediante indicadores de punto medio, lo que permitió desagregar las contribuciones asociadas al uso de materiales, al consumo energético y a los procesos de tratamiento del agua. Este nivel de análisis hizo posible identificar los principales puntos críticos del sistema, particularmente aquellos relacionados con el consumo de energía térmica y eléctrica durante la fase de operación, así como con la fabricación y reposición de componentes estructurales.

Posteriormente, los resultados de punto medio se integraron en indicadores de daño de punto final —Damage to human health, Damage to ecosystem diversity y Damage to natural resources— con el fin de evaluar las consecuencias ambientales desde una perspectiva más agregada y orientada a la toma de decisiones. Esta integración permitió confirmar que la jerarquía de desempeño ambiental observada en los indicadores de punto medio se mantiene al analizar los daños potenciales sobre la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad futura de recursos naturales. El análisis conjunto de ambos niveles de indicadores evidenció que las alternativas con mayor complejidad tecnológica y mayores requerimientos energéticos presentan impactos ambientales más elevados por unidad funcional, mientras que los sistemas optimizados en función del volumen efectivamente aprovechado y del tratamiento diferenciado del agua muestran un mejor desempeño

ambiental a lo largo de su ciclo de vida. Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios previos de ACV aplicados a sistemas descentralizados de abastecimiento de agua, y permiten sustentar comparaciones robustas entre las alternativas evaluadas.

#### 4.2 Caracterización de las alternativas tecnológicas

Cada alternativa presentó diferencias en los usos finales del agua, demandas hídricas y componentes del sistema. La Tabla 2 resume las principales características técnicas y funcionales de las alternativas evaluadas.

**Tabla 2.**

*Esquema de las alternativas propuestas adaptado de Prieto (2024).*

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Usos	P, NP	P, NP, CA, AA	P, NP, AV, AA
Demanda P	15 L/hab*día	15 L/hab*día	15 L/hab*día
Demanda NP	56 L/hab*día	56 L/hab*día	56 L/hab*día
Demanda CA	-	Según CROPWAT (cultivo de maíz 100 m <sup>2</sup> )	-
Demanda AA	-	11 aves – 0.2 L/cabeza*día	11 aves – 0.2 L/cabeza*día
Demanda AV	-	-	20 aves – 0.2 L/cabeza*día
Área de captación	100 m <sup>2</sup>	125 m <sup>2</sup>	125 m <sup>2</sup>
Dimensiones canaletas	Alto: 12 cm; Base: 6 cm	Alto: 12 cm; Base: 6 cm	Alto: 12 cm; Base: 6 cm
Dimensión bajantes	Tejado vivienda: 3"	Tejado vivienda: 3" / Tejado depósito: 2"	Tejado vivienda: 3" / Tejado depósito: 2"
Volumen de almacenamiento	1 tanque elevado: 1000 L / 1 tanque a nivel de suelo: 1000 L	1 tanque elevado: 1000 L / 1 tanque a nivel de suelo: 1000 L	1 tanque elevado: 1000 L / 1 tanque a nivel de suelo: 1000 L

**Nota:** P: usos domésticos que requieren agua potable, NP: usos domésticos que no requieren agua potable, CA: usos agrícolas para autoconsumo, AA: crianza de animales para autoconsumo y AV: crianza de animales para venta. Además de esto, cada alternativa

presentó un tratamiento preliminar de malla en canaletas, rejilla en bajantes y desviador de primer flujo; un tratamiento secundario de filtro lento de arena y un tratamiento terciario en ebullición (Prieto, 2024).

### ***4.3 Inventario de Ciclo de Vida***

El inventario de ciclo de vida (ICV) corresponde a la fase del análisis en la que se recopilan y organizan de manera sistemática los flujos de entrada y salida asociados a cada alternativa evaluada, incluyendo materiales, energía, agua y emisiones, dentro de los límites del sistema definidos. En este estudio, el ICV se elaboró de forma diferenciada para cada alternativa tecnológica, considerando sus configuraciones específicas, demandas hídricas, componentes constructivos, requerimientos energéticos, actividades de mantenimiento y procesos de fin de vida, información que posteriormente fue empleada para la modelación de los sistemas en OpenLCA y la evaluación de sus impactos ambientales.

#### ***4.3.1 Alternativa 1 — Usos domésticos P y NP (vivienda)***

La Alternativa 1 correspondió a un sistema de aprovechamiento de agua lluvia diseñado exclusivamente para el abastecimiento doméstico de una vivienda rural tipo, considerando usos potables y no potables. El sistema cuenta con un área de captación de 100 m<sup>2</sup> correspondiente a la cubierta metálica de la vivienda, desde la cual el agua es conducida mediante canaletas metálicas y bajantes en PVC hacia un sistema de almacenamiento compuesto por dos tanques plásticos de 1000 L, uno a nivel del suelo y otro elevado. La distribución interna del agua se realiza por gravedad desde el tanque elevado, apoyada por un sistema de bombeo de baja potencia (½ hp), cuya operación diaria se estimó en aproximadamente 15 minutos. El tratamiento del agua incluye una etapa primaria de retención de sólidos (mallas, rejillas y desviador de primer flujo), un tratamiento secundario mediante filtro lento de arena y un tratamiento terciario por ebullición para la fracción de agua destinada a consumo humano. El inventario de materiales incluye los elementos

de captación, conducción, almacenamiento, impulsión, tratamiento y red hidrosanitaria interna, así como las actividades de mantenimiento y reposición de componentes durante la vida útil del sistema. La demanda doméstica considerada fue de 264 L/día, y el rendimiento anual del sistema se estimó mediante la herramienta THETA desarrollada por Prieto (2024), obteniendo una eficiencia aproximada del 37 %. El detalle de los componentes, cantidades y parámetros de operación se presenta en los Apéndices A, B, C y D correspondientes.

#### ***4.3.2 Alternativa 2 - Doméstico P/NP + agrícola autoconsumo + avícola autoconsumo***

La Alternativa 2 amplía el alcance del sistema al incorporar, además del abastecimiento doméstico, el riego de un cultivo de maíz para autoconsumo y el suministro de agua para la crianza de aves. Para ello, el área total de captación se incrementó a 125 m<sup>2</sup> mediante la incorporación de una cubierta adicional asociada a un depósito, manteniendo la misma configuración de canaletas, bajantes, almacenamiento y bombeo definida en la Alternativa 1. Los tratamientos de agua se mantuvieron idénticos a los de la Alternativa 1, garantizando la comparabilidad ambiental entre alternativas. El inventario adicional incluyó los materiales asociados a la cubierta extra y los volúmenes de agua requeridos para riego, estimados mediante la herramienta CROPWAT (FAO, 2010), así como la demanda avícola correspondiente. El rendimiento del sistema, calculado mediante balance hídrico mensual, fue del orden del 33 %. Los detalles del inventario adicional y los calendarios de demanda se presentan en los Apéndices E y F.

#### ***4.3.3 Alternativa 3: Doméstico P/NP + avícola venta + avícola autoconsumo***

La Alternativa 3 mantiene la configuración hidráulica y de tratamiento de la Alternativa 2, pero modifica el destino final del agua al incorporar un mayor número de aves, incluyendo producción

avícola para venta. El sistema conserva un área de captación total de 125 m<sup>2</sup>, dos tanques de almacenamiento de 1000 L y un esquema de distribución similar al de las alternativas anteriores. El inventario adicional se concentró en los elementos de la red interna asociados a los puntos de consumo avícola y en la mayor demanda hídrica derivada del incremento en el número de aves. El tratamiento del agua para consumo humano se mantuvo idéntico al de las demás alternativas, asegurando la comparabilidad de impactos. El rendimiento anual del sistema fue aproximadamente del 40 %, según el balance hídrico realizado con datos climáticos del IDEAM (2024). El detalle del inventario y los supuestos adoptados se presentan en los Apéndices G, H y I.

#### ***4.3.4 Estimación del volumen potencial de agua lluvia recolectada***

Con base en la serie histórica de precipitación anual de la estación pluviométrica *Mesa La [24060050]* para el período 2015–2024 (IDEAM, 2024), se estimó el volumen anual potencial de agua lluvia que podría ser recolectado por cada alternativa del sistema de aprovechamiento en la vereda Garbanzal. El procedimiento detallado de cálculo, así como los datos hidrometeorológicos empleados y las conversiones realizadas, se presentan en el Apéndice J.

A partir de una precipitación media anual de 677.06 mm/año y considerando un coeficiente de escorrentía de 0.85 para cubiertas metálicas, se obtuvieron los volúmenes potenciales de captación mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Volumen anual potencial de agua lluvia recolectada por alternativa (adaptado de Prieto, 2024).*

<b>Alternativa</b>	<b>Área de captación (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen anual potencial (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Volumen promedio diario (L/día)</b>
Alternativa 1	100	57.55	157.9
Alternativa 2	125	71.94	197.2
Alternativa 3	125	71.94	197.2

#### ***4.4. Resultados de modelación en software OpenLCA***

A partir del inventario de ciclo de vida consolidado para cada alternativa, los impactos ambientales fueron calculados en categorías de punto medio siguiendo un enfoque equivalente al implementado en el software OpenLCA. Para ello, los flujos de materiales fueron modelados por masa (kg) y caracterizados mediante factores de emisión representativos de bases de datos secundarias comúnmente empleadas en estudios de ACV, tales como LCA Commons y literatura especializada. Los resultados fueron posteriormente normalizados a la unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de agua lluvia aprovechada, con el fin de garantizar la comparabilidad entre alternativas con diferentes capacidades y vidas útiles. La Tabla 4 presenta la contribución de las principales categorías de proceso al potencial de calentamiento global (GWP) para cada alternativa. Se observó que la Alternativa 1 presenta los mayores impactos, dominados por el consumo de energía térmica asociada a la ebullición con Gas Licuado de Petróleo (LPG), seguida por la fabricación y reposición de materiales. En contraste, las Alternativas 2 y 3 muestran valores significativamente menores, atribuibles a menores requerimientos energéticos y a una infraestructura más eficiente por volumen de agua aprovechada.

Aunque las tres alternativas emplean el mismo tipo de sistema de bombeo, el consumo eléctrico no depende únicamente de la potencia del equipo, sino del volumen anual efectivamente bombeado y de las horas de operación. Estas variables cambian entre alternativas debido a diferencias en la demanda y en el rendimiento hídrico del sistema. Por esta razón, al normalizar los resultados por unidad funcional, el aporte del bombeo al GWP y CED no es similar entre alternativas, aun cuando la configuración del equipo sea la misma. Esto se puede complementar con los Apéndices T a V.

**Tabla 4.***Contribución por categoría al Potencial de Calentamiento Global (GWP).*

Categoría	Alternativa 1 (kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>3</sup> )
Materiales (fabricación y reemplazos)	6.8	0.21	0.34
Energía eléctrica (bombeo)	0.11	0.08	0.085
Energía térmica (LPG – ebullición)	17.7	0.13	0.23
<b>Total GWP</b>	<b>27.4</b>	<b>0.42</b>	<b>0.66</b>

Nota: El sistema de bombeo es idéntico en las tres alternativas (bomba de ½ hp). Las diferencias en el impacto por metro cúbico se deben al proceso de normalización, ya que el mismo consumo anual de energía eléctrica se distribuye sobre diferentes volúmenes de agua aprovechada.

En la Tabla 5 se resume el consumo acumulado de energía (CED), expresado en MJ por metro cúbico de agua aprovechada. Nuevamente, la Alternativa 1 evidencia el mayor consumo energético total, destacándose la energía térmica como el principal contribuyente. Las Alternativas 2 y 3 presentan reducciones sustanciales, reflejando un uso más eficiente de los recursos energéticos a lo largo de su ciclo de vida.

**Tabla 5.***Contribución por categoría al Consumo Acumulado de Energía (CED)*

Categoría	Alternativa 1 (MJ / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (MJ / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (MJ / m <sup>3</sup> )
Materiales (energía incorporada)	820	6.9	12
Energía eléctrica (bombeo)	6.4	5.1	5.1
Energía térmica (LPG – ebullición)	294	0.6	1.1
<b>Total CED</b>	<b>1 120</b>	<b>12.6</b>	<b>21.9</b>

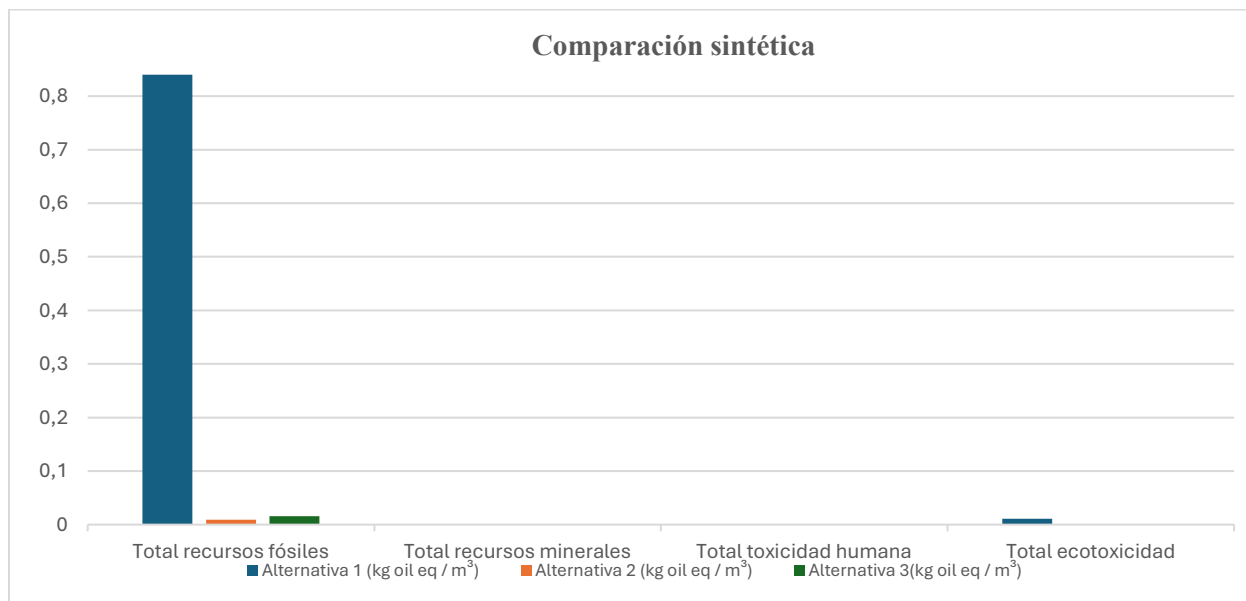
La Figura 5 presenta una comparación sintética de los resultados obtenidos para los indicadores de agotamiento de recursos fósiles, agotamiento de recursos minerales, toxicidad humana y ecotoxicidad, expresados por unidad funcional (1 m<sup>3</sup> de agua aprovechada). En todas las categorías evaluadas, la Alternativa 1 presentó los mayores impactos ambientales, lo cual se asocia principalmente al mayor uso relativo de materiales y al consumo energético requerido para el

tratamiento del agua. Por el contrario, las Alternativas 2 y 3 mostraron impactos significativamente menores, con reducciones de varios órdenes de magnitud en comparación con la Alternativa 1.

Entre estas dos alternativas, la Alternativa 3 exhibe impactos ligeramente superiores a la Alternativa 2, atribuibles a una mayor complejidad del sistema y a la incorporación de componentes adicionales asociados al uso avícola. Los resultados detallados por categoría de impacto y por contribución de materiales y energía se presentan en los Apéndices K, L, M y N.

### Figura 5

#### *Comparación sintética de los resultados*

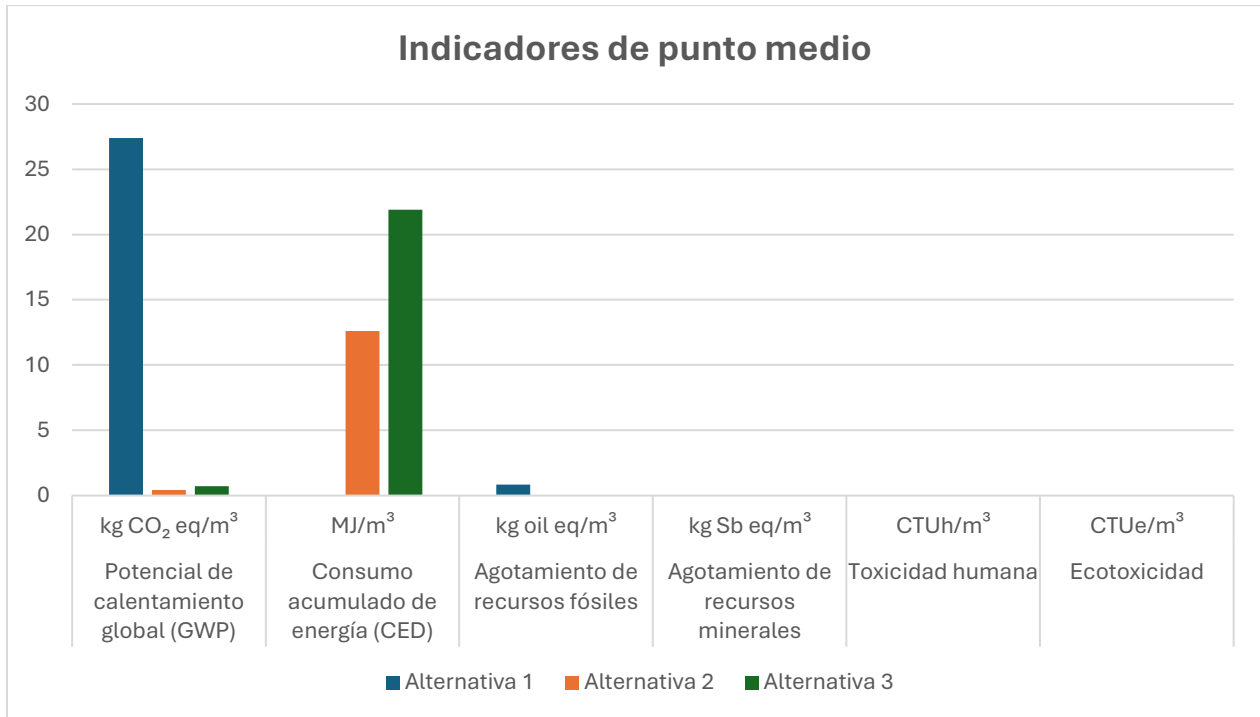


La Figura 6 presenta la comparación de los indicadores de punto medio seleccionados para las tres alternativas, normalizados respecto a la Alternativa 1. Los resultados evidencian que la Alternativa 1 concentra los mayores impactos ambientales en todas las categorías evaluadas, mientras que las Alternativas 2 y 3 muestran reducciones significativas, superiores al 95 % en la mayoría de los indicadores. Entre estas, la Alternativa 2 presenta el mejor desempeño ambiental global, con los menores valores en todas las categorías de impacto, mientras que la Alternativa 3 exhibe impactos ligeramente superiores debido a la mayor complejidad del sistema y al incremento en el uso de

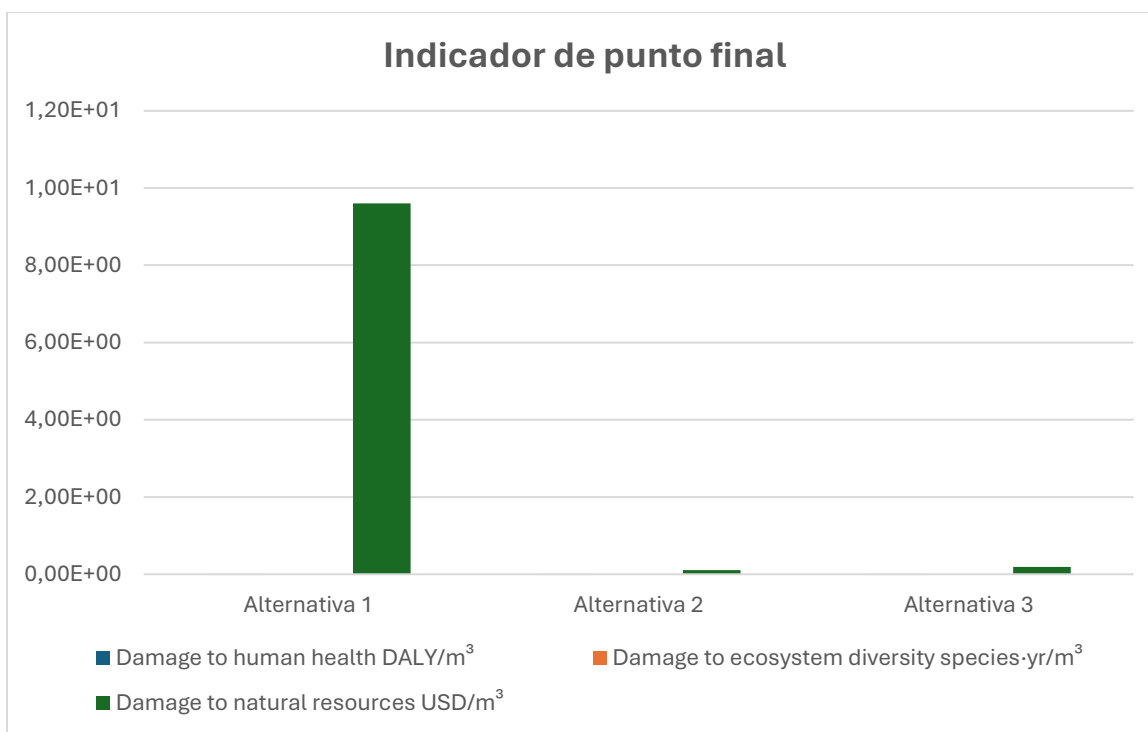
materiales y energía asociados al componente avícola. Los valores absolutos de cada indicador se presentan en el Apéndice O.

### Figura 6

*Indicadores de punto medio por alternativa*



La Figura 7 muestra los resultados de los indicadores de punto final obtenidos mediante el método ReCiPe 2016 Endpoint (H), los cuales integran los impactos de punto medio en daños potenciales sobre la salud humana, la diversidad de los ecosistemas y la disponibilidad de recursos naturales. De manera consistente con los resultados de punto medio, la Alternativa 2 presenta los menores daños potenciales en las tres áreas de protección evaluadas, seguida por la Alternativa 3. La Alternativa 1 concentra los mayores impactos, particularmente en la categoría de recursos naturales, reflejando el mayor consumo energético y de materiales por unidad funcional. Los resultados numéricos detallados se incluyen en el Apéndice P.

**Figura 7***Indicadores de punto final por alternativa*

Aunque las tres alternativas evaluadas corresponden a sistemas de aprovechamiento de agua lluvia con principios tecnológicos similares —captación en cubierta, almacenamiento, conducción y uso final—, los resultados del análisis de ciclo de vida muestran diferencias marcadas en los impactos ambientales por metro cúbico de agua aprovechada. Estas diferencias se explican principalmente por la intensidad material y energética de cada alternativa, así como por la asignación de los impactos a la unidad funcional.

En primer lugar, la Alternativa 1 presenta los mayores impactos en todas las categorías debido a la incorporación de componentes con alta carga ambiental por unidad de volumen de agua suministrado, tales como sistemas de almacenamiento de mayor capacidad, infraestructura fija y procesos de tratamiento más intensivos. Al tratarse de un sistema destinado exclusivamente al uso

doméstico, el volumen total de agua aprovechada es relativamente bajo, lo que incrementa los impactos específicos cuando se expresan por metro cúbico de agua lluvia utilizada.

Por el contrario, la Alternativa 2, aunque incorpora usos adicionales (agrícolas y avícolas para autoconsumo), logra diluir los impactos ambientales de la infraestructura al distribuirlos sobre un mayor volumen anual de agua aprovechada. Este efecto de escala resulta particularmente evidente en indicadores asociados al consumo de energía, al potencial de calentamiento global y al agotamiento de recursos, donde los impactos disminuyen significativamente respecto a la Alternativa 1. Asimismo, la ausencia de tratamientos avanzados y el uso de tecnologías de baja complejidad contribuyen a un mejor desempeño ambiental global.

La Alternativa 3 presenta impactos intermedios entre las dos anteriores. Si bien también se beneficia del aumento en el volumen de agua aprovechada, la inclusión de un sistema avícola orientado a producción a pequeña escala implica mayores requerimientos de materiales, mantenimiento y consumo energético, especialmente asociados a la operación y al manejo del agua. Estos factores incrementan los impactos en comparación con la Alternativa 2, aunque sin alcanzar los valores observados en la Alternativa 1.

En conjunto, los resultados evidencian que, en sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, pequeñas diferencias en el diseño, los usos finales del agua y el volumen total aprovechado pueden generar variaciones significativas en los impactos ambientales específicos. Por tanto, el desempeño ambiental no depende únicamente de la similitud tecnológica del sistema, sino de la relación entre la infraestructura instalada, la energía requerida y la cantidad efectiva de agua suministrada a lo largo de su vida útil.

#### ***4.5. Resultados de análisis de sensibilidad en software OpenLCA***

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar la influencia de la variabilidad en la precipitación anual sobre los impactos ambientales por metro cúbico de agua lluvia aprovechada. Dado que la configuración tecnológica de los sistemas y su inventario de ciclo de vida permanecen constantes, las variaciones en los resultados se deben exclusivamente a cambios en el volumen anual de agua captada y utilizada. Los escenarios analizados corresponden a una condición **seca**, representada por una reducción del 20 % en el volumen de agua aprovechada, y a una condición **húmeda**, asociada a un incremento del 20 % respecto al escenario base. En este contexto, una disminución del volumen aprovechado conlleva un aumento proporcional de los impactos específicos por metro cúbico, mientras que un mayor aprovechamiento del recurso permite una dilución de los impactos ambientales asociados a la infraestructura y operación del sistema.

Los resultados muestran que, en el escenario seco, todas las alternativas presentan incrementos en los indicadores de impacto por unidad funcional, siendo este efecto más pronunciado en la Alternativa 1, debido a su menor volumen anual de agua aprovechada. Por el contrario, en el escenario húmedo se observa una reducción sistemática de los impactos por metro cúbico, particularmente en las Alternativas 2 y 3, que se benefician en mayor medida del aumento del volumen de servicio prestado.

En conjunto, el análisis confirma que la precipitación anual es una variable crítica en el desempeño ambiental de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, y que la robustez ambiental de las alternativas con mayores volúmenes de uso se mantiene incluso bajo condiciones climáticas desfavorables.

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran un aumento sistemático de los impactos ambientales por metro cúbico de agua aprovechada bajo el escenario seco (-20 %) y una

disminución bajo el escenario húmedo (+20 %) para las tres alternativas evaluadas, tanto en los indicadores de daño a la salud humana, a los ecosistemas como a los recursos naturales. Este comportamiento se explica porque el inventario de ciclo de vida permanece constante entre escenarios, mientras que el volumen anual de agua recolectada varía en función de la precipitación. En consecuencia, en años secos, los impactos asociados a la construcción y operación del sistema se distribuyen sobre un menor volumen de agua, incrementando el impacto específico por unidad funcional ( $m^3$ ), mientras que en años húmedos ocurre el efecto contrario.

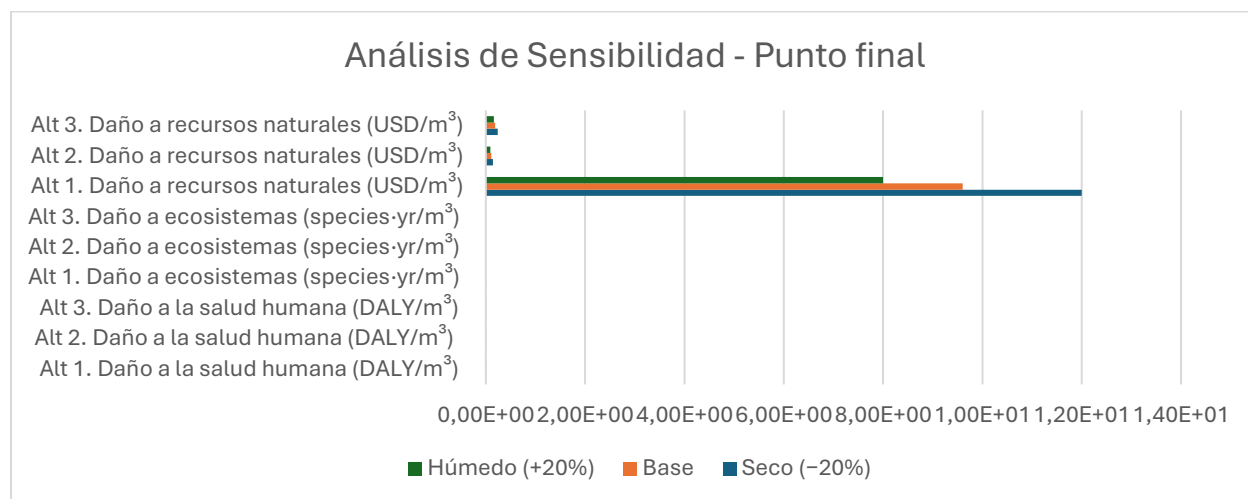
No obstante, la magnitud de este efecto difiere entre alternativas. La Alternativa 1 presenta la mayor sensibilidad a las variaciones de precipitación debido a su baja eficiencia volumétrica, es decir, a la limitada cantidad de agua efectivamente aprovechada en relación con la infraestructura instalada y los requerimientos energéticos del sistema. Bajo condiciones secas, esta característica se acentúa, resultando en incrementos marcados de los indicadores de daño por metro cúbico.

Por el contrario, las Alternativas 2 y 3 muestran una menor variabilidad relativa entre escenarios, lo que indica un desempeño más robusto frente a la variabilidad climática. Esto se debe a que estos sistemas aprovechan un mayor volumen de agua anual, permitiendo diluir los impactos de fabricación y operación incluso en condiciones desfavorables de precipitación. En particular, la Alternativa 2 mantiene consistentemente los valores más bajos de daño en los tres escenarios analizados, confirmando su mejor desempeño ambiental no solo bajo condiciones promedio, sino también en contextos de estrés hídrico.

Estos resultados evidencian la eficiencia ambiental de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia no depende únicamente de su configuración técnica, sino también de su capacidad para adaptarse a la variabilidad climática, aspecto especialmente relevante en zonas rurales con alta incertidumbre en disponibilidad hídrica. Dichos resultados se presentan en la Figura 8 y Tabla 6.

**Tabla 6***Análisis de sensibilidad a la precipitación (-20 %, Base, +20 %) – Indicadores de punto final*

Alternativa	Seco (-20%)	Base	Húmedo (+20%)
Alt 1. Daño a la salud humana (DALY/m <sup>3</sup> )	6.00E-04	4.80E-04	4.00E-04
Alt 2. Daño a la salud humana (DALY/m <sup>3</sup> )	9.50E-06	7.60E-06	6.30E-06
Alt 3. Daño a la salud humana (DALY/m <sup>3</sup> )	1.63E-05	1.30E-05	1.10E-05
Alt 1. Daño a ecosistemas (species·yr/m <sup>3</sup> )	2.63E-06	2.10E-06	1.75E-06
Alt 2. Daño a ecosistemas (species·yr/m <sup>3</sup> )	4.25E-08	3.40E-08	2.83E-08
Alt 3. Daño a ecosistemas (species·yr/m <sup>3</sup> )	7.63E-08	6.10E-08	5.08E-08
Alt 1. Daño a recursos naturales (USD/m <sup>3</sup> )	1.20E+01	9.60E+00	8.00E+00
Alt 2. Daño a recursos naturales (USD/m <sup>3</sup> )	1.40E-01	1.10E-01	9.20E-02
Alt 3. Daño a recursos naturales (USD/m <sup>3</sup> )	2.40E-01	1.90E-01	1.60E-01

**Figura 8***Análisis de sensibilidad de punto final por alternativa*

#### 4.6. Discusión de resultados del análisis de ciclo de vida

Los resultados obtenidos mediante la modelación del ciclo de vida permiten identificar diferencias en el desempeño ambiental de las tres alternativas de aprovechamiento de agua lluvia evaluadas.

En términos generales, los indicadores de punto medio y punto final muestran que la Alternativa 1 presenta los mayores impactos ambientales por unidad funcional, mientras que la Alternativa 2 exhibe consistentemente el mejor desempeño ambiental, seguida por la Alternativa 3.

#### ***4.6.1. Interpretación de los resultados de punto medio***

Los elevados valores de potencial de calentamiento global (GWP) y consumo acumulado de energía (CED) de la Alternativa 1 evidencian un desempeño ambiental desfavorable por metro cúbico de agua aprovechada. Este comportamiento está dominado por el uso de energía térmica para la ebullición del agua mediante LPG, principal fuente de emisiones y consumo energético en las tres alternativas. No obstante, su contribución relativa es mayor en la Alternativa 1 debido al menor volumen anual de agua aprovechada, lo que amplifica los impactos específicos por unidad funcional. En contraste, las Alternativas 2 y 3 diluyen el consumo energético asociado a la ebullición sobre un mayor volumen de agua suministrada, reduciendo significativamente los impactos por metro cúbico, en concordancia con estudios previos sobre sistemas descentralizados de tratamiento de agua (Angrill et al., 2012; Morales-Pinzón et al., 2015).

Las Alternativas 2 y 3 presentan consistentemente menores impactos en todas las categorías de punto medio, lo que se explica por una mejor relación entre la infraestructura instalada y el volumen de agua aprovechada, así como por la aplicación de tratamientos intensivos únicamente al agua destinada a usos que requieren calidad potable. Este resultado pone de manifiesto que es ambientalmente más eficiente diferenciar el nivel de tratamiento según el uso final del agua, en lugar de tratar todo el volumen recolectado con procesos energéticamente intensivos. Este enfoque contrasta con los sistemas convencionales de abastecimiento urbano, donde el agua es tratada hasta estándares de potabilidad incluso para usos no potables, como la descarga de inodoros, generando ineficiencias ambientales relevantes (Ghimire et al., 2014).

La Alternativa 2 destaca como la opción con menor impacto ambiental global, debido a su diseño optimizado para autoconsumo, bajos requerimientos energéticos y una vida útil que permite

distribuir los impactos de fabricación y operación sobre un mayor volumen de agua suministrada, reforzando la pertinencia de estrategias de tratamiento diferenciado.

En cuanto al agotamiento de recursos fósiles y minerales, la Alternativa 1 ejerce la mayor presión, principalmente como consecuencia del reducido volumen de agua aprovechada, que concentra los impactos asociados a la fabricación de materiales y al consumo energético por unidad funcional. Este comportamiento coincide con la literatura de ACV aplicada a sistemas de captación y tratamiento de aguas lluvias, donde la relación entre infraestructura, fuente energética y volumen suministrado resulta determinante (Friedrich et al., 2009). Los indicadores de toxicidad humana y ecotoxicidad confirman esta tendencia, evidenciando mayores impactos para la Alternativa 1, asociados principalmente a la producción de materiales metálicos y al uso de energía, mientras que las Alternativas 2 y 3 presentan valores considerablemente menores.

#### ***4.6.2. Interpretación de los indicadores de punto final***

La agregación de impactos mediante los indicadores de punto final permite una evaluación integrada de las consecuencias ambientales. Los resultados indican que los daños potenciales sobre la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales reproducen la jerarquía observada en los indicadores de punto medio. El daño a la salud humana, expresado en DALY, es significativamente mayor en la Alternativa 1, lo que sugiere que las emisiones asociadas a su ciclo de vida podrían traducirse en una mayor carga de enfermedad a largo plazo. Este comportamiento es coherente con la literatura, que reporta una estrecha relación entre el uso de combustibles fósiles y los impactos sobre la salud humana en sistemas de abastecimiento descentralizados (Huijbregts et al., 2017). De forma análoga, los daños sobre la diversidad de los ecosistemas y el agotamiento de recursos naturales reflejan la mayor intensidad material y energética de la Alternativa 1. En contraste, la

Alternativa 2 presenta los menores daños en todas las áreas de protección, consolidándose como la opción con mejor desempeño ambiental desde una perspectiva de ciclo de vida completo.

#### ***4.6.3. Discusión del análisis de sensibilidad***

El análisis de sensibilidad frente a variaciones en la precipitación confirma la robustez de los resultados, dado que el orden relativo de desempeño ambiental entre las alternativas se mantiene constante bajo escenarios secos y húmedos. Si bien una reducción del 20 % en el volumen de agua aprovechada incrementa los impactos por metro cúbico, este efecto es esperado, ya que los impactos de fabricación y operación se distribuyen sobre un menor volumen de agua suministrada. Este comportamiento concuerda con la literatura, que señala que la eficiencia ambiental de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia depende en gran medida del volumen efectivamente utilizado (Morales-Pinzón et al., 2015). En este contexto, la Alternativa 2 no solo presenta el mejor desempeño bajo condiciones promedio, sino que conserva su ventaja relativa incluso bajo escenarios climáticos desfavorables. Adicionalmente, existen escenarios de potabilización comunes en contextos rurales que no fueron modelados explícitamente. En particular, el uso de leña para la ebullición del agua podría alterar significativamente el perfil ambiental del sistema. Aunque la sustitución de LPG por biomasa puede reducir el agotamiento de recursos fósiles, la literatura advierte que la combustión tradicional de leña está asociada a mayores emisiones de material particulado y a impactos relevantes sobre la salud humana y los ecosistemas. Por otra parte, la incorporación de fuentes renovables, como sistemas fotovoltaicos para suplir los requerimientos energéticos, podría reducir de forma sustancial los impactos durante la etapa de operación, especialmente en las categorías de calentamiento global y agotamiento de

recursos. Estos escenarios representan oportunidades de mejora ambiental y líneas futuras de investigación para el diseño de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en zonas rurales.

#### ***4.6.4 Implicaciones y utilidad de los resultados***

Los resultados del ACV tienen implicaciones prácticas relevantes para el diseño y la selección de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en contextos rurales y periurbanos. En primer lugar, evidencian que la incorporación de procesos de tratamiento energéticamente intensivos no garantiza un mejor desempeño ambiental, especialmente cuando el volumen de agua tratada es reducido. En segundo lugar, resaltan la necesidad de optimizar el diseño del sistema en función del uso real del agua, de modo que los impactos asociados a la infraestructura y a la operación se diluyan sobre un mayor volumen aprovechado. Desde la perspectiva de la toma de decisiones, el ACV se consolida como una herramienta clave para evitar la selección de soluciones aparentemente más “seguras” o “robustas” desde el punto de vista técnico, pero ambientalmente menos eficientes. En este sentido, los resultados respaldan la Alternativa 2 como la opción ambientalmente más sostenible, en coherencia con los principios de eficiencia energética, uso racional de materiales y minimización de impactos a lo largo del ciclo de vida. En contraste, desde una perspectiva no ambiental, el estudio de Prieto (2024) identifica como más conveniente la alternativa que maximiza la seguridad en el suministro y la versatilidad de usos, priorizando criterios técnicos y operativos como confiabilidad, cobertura de demanda y facilidad de operación en el contexto rural. Bajo este enfoque, las alternativas con mayor nivel de tratamiento y robustez tecnológica resultan favorables, aun a costa de una mayor complejidad constructiva y operativa. Sin embargo, al incorporar la dimensión ambiental mediante el ACV, se evidencia que dicha robustez técnica conlleva mayores impactos ambientales por metro cúbico de agua aprovechada,

asociados principalmente al mayor uso de materiales y energía en las etapas de construcción y operación. En contraste, la Alternativa 2, aunque técnicamente más simple, presenta un desempeño ambiental superior al optimizar la relación entre infraestructura instalada y volumen de agua efectivamente utilizado. Esta comparación demuestra que la inclusión del ACV permite complementar y matizar las decisiones de diseño, evitando la selección de sistemas sobredimensionados o innecesariamente complejos desde una perspectiva de sostenibilidad integral.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

La caracterización de los tres sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias permitió evidenciar diferencias claras en su configuración tecnológica, usos finales del agua y niveles de complejidad funcional. Las alternativas se diferenciaron principalmente por el alcance de los usos (domésticos, agrícolas y avícolas) y por la infraestructura requerida para almacenamiento, tratamiento y distribución, lo cual condicionó tanto su desempeño operativo como sus requerimientos materiales y energéticos a lo largo del ciclo de vida.

La aplicación del Análisis de Ciclo de Vida permitió cuantificar y comparar de manera objetiva los impactos ambientales de los sistemas evaluados, normalizados a la unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de agua lluvia aprovechada. Los resultados mostraron que existen diferencias significativas en el desempeño ambiental de las alternativas, siendo la Alternativa 2 la que presentó los menores impactos en la mayoría de las categorías analizadas, mientras que la Alternativa 1 registró los mayores impactos relativos debido al menor volumen aprovechado y al mayor peso de los procesos de tratamiento y materiales.

El análisis de impactos ambientales de punto final permitió integrar los resultados de punto medio en indicadores de daño sobre la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales, facilitando una interpretación más comprensible para la toma de decisiones. Estos resultados confirmaron la tendencia observada en los indicadores de punto medio y evidenciaron que las alternativas con mayor eficiencia en el aprovechamiento del recurso presentan menores daños potenciales, reforzando la utilidad del enfoque de ACV como herramienta de apoyo para la planificación de sistemas de abastecimiento rural más sostenibles.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra el uso de datos secundarios provenientes de bases de datos internacionales y literatura especializada, así como la necesidad de asumir condiciones promedio de operación y precipitación. No obstante, estos supuestos fueron definidos de manera explícita y coherente con estudios previos, garantizando la consistencia metodológica del análisis comparativo. Se recomienda que futuros estudios complementen este análisis mediante el uso de datos primarios locales, la evaluación de escenarios con fuentes energéticas renovables y la ampliación del análisis a criterios económicos y sociales. Asimismo, la integración del ACV en herramientas de selección tecnológica puede fortalecer la toma de decisiones en proyectos de abastecimiento rural, promoviendo soluciones que no solo sean técnicamente viables, sino también ambientalmente sostenibles.

### Referencias Bibliográficas

- Ballén Suárez, J. A., Ángel, M., García, G., Orlando, R., & Mosquera, O. (2000). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia*.
- Bare, J. C., Young, D. E., & Hopton, M. E. (2012). TRACI 2.1: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 16(5), 687–696.
- Belay, A. D., Kebede, W. M., & Golla, S. Y. (2023). Determinants of climate-smart agricultural practices in smallholder plots: Evidence from Wadla district, northeast Ethiopia. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 15(5), 619–637. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2022-0071>
- Castelán, R. (2022). *[Documento institucional]*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Cure, S., & Ortega, W. (2020). *Análisis de alternativas para la potabilización de agua lluvia para uso doméstico en zonas rurales de Colombia*.
- Durodola, O. S., Bwambale, J., & Nabunya, V. (2020). Using every drop: Rainwater harvesting for food security in Mbale, Uganda. *Water Practice and Technology*, 15(2), 295–310. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.019>
- Farahdel, S., Wang, C., & Awasthi, A. (2024). Literature review of current sustainability assessment frameworks and approaches for organizations.
- FAO. (2010). *CROPWAT 8.0 for Windows: User Guide*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ghimire, S. R., Johnston, J. M., Ingwersen, W. W., & Hawkins, T. R. (2014). Life cycle assessment of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*.
- Ghimire, S. R., Johnston, J. M., Ingwersen, W. W., & Hawkins, T. R. (2017). Environmental sustainability of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*.
- GreenDelta. (2023). *openLCA documentation*.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Springer.
- Huijbregts, M. A. J., et al. (2017). ReCiPe 2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147.

- IDEAM. (2024). *Base de datos climatológica nacional*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.
- Ignacio, J. J., Malenab, R. A., Pausta, C. M., Beltran, A., Belo, L., Tanhueco, R. M., Promentilla, M. A., & Orbecido, A. (2019). A perception study of an integrated water system project in a water scarce community in the Philippines. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081593>
- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- ISO. (2006). *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2025). Environmental and economic performance of residential buildings: LCA–LCC tool and case study in Colombia. *Building and Environment*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112459>
- Koranteng, A. F., Obour, P. B., & Owusu, K. (2024). Government rainwater harvesting initiative in northern Ghana and its impacts on local livelihoods and work-life balance. *Local Environment*. <https://doi.org/10.1080/13549839.2024.2368526>
- Le, C. T. D., Oláh, J., & Pakurár, M. (2024). Advanced multi-criteria decision-making technique to describe the relationship between criteria and select optimal alternatives. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-10372-3>
- Luterbacher, J. S., Froling, M., Vogel, F., Marechal, F., & Tester, J. W. (2009). Hydrothermal gasification of waste biomass: Process design and life cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, 43(5), 1578–1583. <https://doi.org/10.1021/es801532f>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS*. Colombia.
- Palsaniya, D. R., et al. (2023). Rainwater harvesting, agroforestry and goat-based intensification for livelihood resilience in drought prone rainfed smallholder farming systems. *Agroforestry Systems*, 97(8), 1405–1419. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00863-x>
- Patel, S., & Ghimire, S. R. (2022). Life cycle environmental impacts of decentralized water systems. *Journal of Cleaner Production*.
- Prieto, D. L. (2024). *Herramienta de selección de sistemas de agua lluvia* [Trabajo de grado].
- Rashid, O., Awan, F. M., Ullah, Z., & Hassan, I. (2018). Rainwater harvesting to meet domestic water requirements: A case study of Islamabad, Pakistan. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 414(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012018>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2023). *LCA Commons Database*.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.).
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines on sanitation and health*.
- World Health Organization (WHO), & United Nations Children’s Fund (UNICEF). (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022*. WHO & UNICEF

Zhu, Q. (2003). Rainwater harvesting and poverty alleviation: A case study in Gansu, China. *International Journal of Water Resources Development*, 19(4), 569–578. <https://doi.org/10.1080/0790062032000161373>

## Apéndices

### Apéndice A .Configuración y supuestos de diseño – Alternativa 1

Aspecto	Supuesto / configuración adoptada
Área de captación	100 m <sup>2</sup> de cubierta en lámina metálica
Canaletas	Sección rectangular, base 12 cm y altura 6 cm, en lámina metálica
Bajantes	Bajantes en PVC de 3", sin depósito adicional
Almacenamiento	Dos tanques plásticos de 1000 L: uno a nivel de piso y uno elevado
Bombeo	Bomba de ½ hp con operación de 15 min/día; potencia requerida ≈ 19.8 W
Red hidrosanitaria	Tanque elevado a aproximadamente 4 m, garantizando una presión mínima de 4.3 m.c.a.
Tratamiento primario	Malla en canaletas, rejilla en bajantes y desviador de primer flujo previo al tanque
Tratamiento secundario	Filtro lento de arena en tubería PVC de 6", con velocidad de filtración de 0.4 m/h y disposición de capas según Tabla 16
Tratamiento Terciario	Ebullición del agua para usos de bebida, cocción y lavado de utensilios
Demanda doméstica	264 L/d para una vivienda tipo (ver Fig. 12 para el desglose de consumos)
Eficiencia del Sistema	Aproximadamente 37 % para el sistema con dos tanques de 1000 L, según balance THETA

### Apéndice B. Componentes del sistema de captación, almacenamiento, impulsión y tratamiento –

#### Alternativa 1

Subsistema	Componente	Especificación / Supuesto de diseño
Captación y conducción	Cubierta	Lámina metálica, área de captación de 100 m <sup>2</sup>
	Canaletas metálicas	Sección rectangular 12 × 6 cm; longitud aproximada 50 m (perímetro de faldones)
	Bajantes	PVC de 3"; 2–3 unidades, longitud aproximada 4.3 m
	Mallas y rejillas	Malla en canaletas y rejilla tipo cesta en bajantes; material acero inoxidable o galvanizado (1 rejilla por bajante)
	Desviador de primer flujo	1 unidad, configuración a tanque; incluye conexiones en PVC y tanque auxiliar; volumen definido según criterio de diseño seleccionado (Fig. 13a)

<b>Almacenamiento</b>	Tanque plástico a piso	Capacidad 1000 L; 1 unidad
	Tanque plástico elevado	Capacidad 1000 L; 1 unidad (se evaluó 750 L, pero se adopta 1000 L por criterio de costo-eficiencia)
	Estructura soporte	Estructura en acero/perfiles y losa o ateta, diseñada para una carga aproximada de 1 t y una altura de 4 m de carga hidrostática
<b>Impulsión y red</b>	Bomba	Bomba periférica de ½ hp, 110 V; 1 unidad
	Tubería de impulsión y succión	PVC presión de 1"; longitud aproximada 10–15 m, según trazado
	Accesorios hidráulicos	Accesorios en PVC de 1" (codos 90°, tees, uniones, válvulas de bola y de retención); kit según conteo del Apéndice G
	Red interna	Red doméstica con diámetros estándar; longitudes por tramo definidas en el plano isométrico (Apéndice F)
<b>Tratamiento</b>	Filtro lento de arena (FLA)	1 unidad, construido en tubería PVC de 6"
	Lecho filtrante	Arena con espesor de 70 cm; tamaño efectivo $d_e = 0.15-0.35$ mm; coeficiente de uniformidad $C_u = 1.5-3$
	Capas soporte	Gravilla de 5 cm (2–5 mm) y grava de 10 cm (10–25 mm)
	Condiciones hidráulicas	Tirante hidráulico de 5 cm y borde libre de 10 cm
	Tratamiento terciario	Ebullición en cocina existente; no se incorpora equipo adicional; se contabiliza únicamente el consumo de combustible para el volumen de agua potable

### Apéndice C. Vida útil y requerimientos de operación y mantenimiento – Alternativa 1

Componente	Vida útil de referencia	Operación y mantenimiento
Canaletas y bajantes (metálicos / PVC)	15–25 años	Limpieza mensual durante periodos lluviosos y después de tormentas intensas; retiro de hojas y sedimentos como parte del tratamiento primario
Desviador de primer flujo	15–25 años (asociado a componentes en PVC)	Purga después de eventos de lluvia intensa; inspección visual mensual
Tanques plásticos (1000 L)	10–20 años	Limpieza interior semestral o anual; la selección del material plástico frente a concreto se justifica en el documento por criterios de costo, instalación y eficiencia
Bomba periférica ½ hp	8–12 años	Mantenimiento anual (revisión de sellos y rodamientos); operación diaria aproximada de 15 min
Filtro lento de arena (FLA)	Estructura >20 años; medio filtrante 1–3 años	Remoción superficial de la biocapa ("raspado") cuando se reduzca el caudal; reposición parcial de arena según uso
Ebullición	No aplica (equipo existente)	Operación cotidiana para usos de bebida, cocción y lavado; no se incorpora nuevo equipo al sistema

### Apéndice D. Energía anual de operación – Alternativa 1

Proceso	Parámetro	Valor adoptado	Observaciones
Bombeo	Potencia de entrada	19.8 W	Potencia calculada a partir de los requerimientos hidráulicos
	Tiempo de operación	0.25 h/día	Correspondiente a 15 min diarios
	Consumo anual	≈ 1.8 kWh/año	$19.8 \text{ W} \times 0.25 \text{ h/d} \times 365 \text{ días}$
Ebullición	Volumen de agua	264 L/d	Demanda doméstica total de la vivienda tipo

	Modelo energético	Paramétrico	Estimado mediante aproximación térmica ( $4.2 \text{ kJ/L}\cdot\text{K}$ , $\Delta T \approx 75 \text{ K}$ ) y eficiencia del sistema de cocina
	Consideración en ACV	Energía de uso final	El estudio adopta la ebullición como método de tratamiento terciario

### Apéndice E. Configuración, usos y supuestos de diseño – Alternativa 2

Aspecto	Configuración / supuesto adoptado
Usos del agua	Usos domésticos potables (P) y no potables (NP); riego de cultivo de maíz en un área de $100 \text{ m}^2$ (demanda estimada mediante CROPWAT); abastecimiento para 11 aves con una dotación de $0.2 \text{ L/ave}\cdot\text{día}$
Área de captación	$125 \text{ m}^2$ , correspondientes a $100 \text{ m}^2$ de cubierta de la vivienda y $25 \text{ m}^2$ adicionales de un depósito
Canaletas	Sección rectangular de $12 \times 6 \text{ cm}$ en lámina metálica
Bajantes	Vivienda: PVC de 3"; depósito: PVC de 2"
Almacenamiento	Dos tanques plásticos de $1000 \text{ L}$ : uno a nivel de piso y uno elevado
Eficiencia del sistema	Aproximadamente 33 %, según el balance hídrico obtenido con THETA
Bombeo	Bomba periférica de $\frac{1}{2} \text{ hp}$ ; condiciones de operación iguales a la Alternativa 1
Red hidrosanitaria	Misma configuración que la Alternativa 1 (tanque elevado, presión mínima y trazado)
Tratamientos	Tratamiento primario, secundario (filtro lento de arena) y terciario (ebullición) iguales a los adoptados en la Alternativa 1

### Apéndice F. Inventario adicional, criterios de mantenimiento y consumo energético de la Alternativa 2

respecto a la Alternativa 1

Categoría	Elemento	Descripción / criterio adoptado
<b>Inventario adicional vs. Alternativa 1</b>	Cubierta adicional (depósito)	Cubierta en lámina metálica con un área de $25 \text{ m}^2$
	Canaletas y bajantes adicionales	Canaletas metálicas asociadas al nuevo faldón y bajante en PVC de 2"
	Demanda agrícola	Demanda mensual de riego estimada mediante el modelo CROPWAT
<b>Mantenimiento y vida útil</b>	Componentes base del sistema	Vida útil y mantenimiento iguales a los adoptados en la Alternativa 1 para captación, almacenamiento, bombeo y tratamientos

	Operación agrícola/avícola	Limpieza adicional de mallas por acumulación de polvo y paja; frecuencia quincenal durante periodos de cosecha
<b>Energía de operación (anual)</b>	Bombeo	Consumo energético aproximado de 1.8 kWh/año, bajo las mismas condiciones de operación que la Alternativa 1
	Ebullición	Consumo energético modelado de forma paramétrica en función del volumen de agua potable tratada

### Apéndice G. Configuración, usos y supuestos de diseño – Alternativa 3

Aspecto	Configuración / supuesto adoptado
Usos del agua	Usos domésticos potables (P) y no potables (NP); abastecimiento para 20 aves destinadas a venta y 11 aves para autoconsumo, con una dotación de 0.2 L/ave·día
Área de captación	125 m <sup>2</sup> , correspondientes a 100 m <sup>2</sup> de cubierta de la vivienda y 25 m <sup>2</sup> adicionales de un depósito
Canaletas y bajantes	Configuración idéntica a la Alternativa 2: canaletas de 12 × 6 cm; bajantes de 3" en vivienda y 2" en depósito
Almacenamiento	Dos tanques plásticos de 1000 L: uno a nivel de piso y uno elevado
Eficiencia del sistema	Aproximadamente 40 %, según el balance hídrico obtenido con la herramienta THETA
Bombeo	Bomba periférica de ½ hp; condiciones de operación iguales a la Alternativa 1
Red hidrosanitaria	Misma configuración hidráulica que la Alternativa 1 (tanque elevado, presión mínima y tiempos de operación)
Tratamientos	Tratamiento primario, secundario (filtro lento de arena) y terciario (ebullición) idénticos a los adoptados en la Alternativa 1


### Apéndice H. Componentes adicionales respecto a la Alternativa 1 (Alternativas 2 y 3)

Elemento adicional	Especificación técnica	Observaciones
Cubierta adicional (depósito)	Lámina metálica, área de 25 m <sup>2</sup>	Incrementa el área total de captación a 125 m <sup>2</sup>
Canaletas adicionales	Sección rectangular 12 × 6 cm, material metálico	Asociadas a la cubierta del depósito
Bajante adicional	PVC de 2"	Conduce el agua desde la cubierta del depósito al sistema de almacenamiento
Acometidas internas a corrales	Tubería PVC de ½"-¾"	Longitudes reducidas para puntos de bebedero y limpieza
Puntos de consumo avícola	Bebederos y grifos	Integrados a la red interna; la red base se define en el plano isométrico del documento

### Apéndice I. Energía de operación (anual) – Alternativa 1

Aspecto	Configuración / criterio adoptado
Bombeo	Consumo energético anual aproximado de 1.8 kWh/año, igual al estimado para la Alternativa 1
Ebullición	Modelada de forma paramétrica en función del volumen diario de agua potable ( $V_{potable}$ ) efectivamente tratado
Rendimiento anual del sistema	Determinado mediante la herramienta THETA, considerando un área de captación total de 125 m <sup>2</sup>
Datos climáticos	Serie histórica de precipitación IDEAM utilizada para el balance hídrico mensual
Demandas de agua	Demanda doméstica, avícola y (cuando aplique) agrícola, evaluadas de forma mensual
Escala temporal del análisis	Balance hídrico mes a mes para estimar eficiencia y volumen anual aprovechado

### Apéndice J. Cálculo de precipitación

			
Reporte de información Hidrometeorológica de DHIME generado (22/09/2025 21:32)			
<b>Nombre estación:</b>	MESA LA [24060050]	<b>Corriente:</b>	
<b>Latitud:</b>	6.7591666670	<b>Longitud:</b>	-73.09277778
<b>Entidad:</b>	INSTITUTO DE HIDROLOGIA METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES	<b>Area Operativa:</b>	Area Operativa 08 - Santanderes-Arauca
<b>Municipio:</b>	Los Santos	<b>Fecha instalación:</b>	15/11/1973 00:00
<b>Variable:</b>	PRECIPITACION	<b>Frecuencia:</b>	Annual
<b>Parametro:</b>	Precipitación total anual	<b>Unidad medida:</b>	mm
<b>Categoría de estación:</b>			Pluviométrica
<b>Elevación:</b>			1460
<b>Departamento:</b>			Santander
<b>Fecha suspensión:</b>			-
<b>Fecha consulta:</b>			01/01/2015 00:00- 01/01/2024 00:00
<b>Fecha</b>		<b>Valor:</b>	<b>Nivel de Aprobación</b>
01/01/2015 00:00		592.6	Definitivo
01/01/2016 00:00		755.3	Definitivo
01/01/2017 00:00		725	Definitivo
01/01/2018 00:00		848.3	Definitivo
01/01/2019 00:00		617	Definitivo
01/01/2020 00:00		367.2	Definitivo
01/01/2021 00:00		601	Definitivo
01/01/2022 00:00		819.8	Definitivo
01/01/2023 00:00		697.7	Definitivo
01/01/2024 00:00		746.7	Preliminar

### Apéndice K. Contribución al Agotamiento de Recursos Fósiles

Categoría	Alternativa 1 (kg oil eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (kg oil eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (kg oil eq / m <sup>3</sup> )
Materiales (plásticos y procesos)	0.19	0.004	0.007
Energía eléctrica	0.11	0.002	0.003
Energía térmica (LPG)	0.54	0.003	0.006
<b>Total recursos fósiles</b>	<b>0.84</b>	<b>0.009</b>	<b>0.016</b>

#### Apéndice L. Contribución al Agotamiento de Recursos Minerales

Categoría	Alternativa 1 (kg Sb eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (kg Sb eq / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (kg Sb eq / m <sup>3</sup> )
Metales (aceros, aluminio, latón)	1.70E-04	2.10E-06	3.80E-06
Otros materiales	2.00E-05	2.00E-07	3.00E-07
<b>Total recursos minerales</b>	<b>1.90E-04</b>	<b>2.30E-06</b>	<b>4.10E-06</b>

#### Apéndice M. Contribución a la Toxicidad Humana

Categoría	Alternativa 1 (CTUh / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (CTUh / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (CTUh / m <sup>3</sup> )
Materiales (metales y PVC)	2.80E-06	3.90E-08	6.80E-08
Energía eléctrica	4.00E-07	5.00E-09	9.00E-09
Energía térmica (LPG)	4.00E-07	5.00E-09	1.00E-08
<b>Total toxicidad humana</b>	<b>3.60E-06</b>	<b>4.90E-08</b>	<b>8.70E-08</b>

#### Apéndice N. Contribución a la Ecotoxicidad

Categoría	Alternativa 1 (CTUe / m <sup>3</sup> )	Alternativa 2 (CTUe / m <sup>3</sup> )	Alternativa 3 (CTUe / m <sup>3</sup> )
Materiales (principalmente metales)	9.40E-03	1.30E-04	2.30E-04
Energía eléctrica	8.00E-04	1.00E-05	2.00E-05
Energía térmica (LPG)	9.00E-04	2.00E-05	4.00E-05
<b>Total ecotoxicidad</b>	<b>1.10E-02</b>	<b>1.60E-04</b>	<b>2.90E-04</b>

#### Apéndice O. Indicadores de punto medio por alternativa

Indicador de punto medio	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Potencial de calentamiento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	27.4	0.42	0.71
Consumo acumulado de energía (CED)	MJ/m <sup>3</sup>	1 120	12.6	21.9
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq/m <sup>3</sup>	0.84	0.009	0.016
Agotamiento de recursos minerales	kg Sb eq/m <sup>3</sup>	1.90E-04	2.30E-06	4.10E-06
Toxicidad humana	CTUh/m <sup>3</sup>	3.60E-06	4.90E-08	8.70E-08
Ecotoxicidad	CTUe/m <sup>3</sup>	1.10E-02	1.60E-04	2.90E-04

#### Apéndice P. Indicadores de punto final por alternativa

Indicador de punto final	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Damage to human health	DALY/m <sup>3</sup>	4.80E-04	7.60E-06	1.30E-05
Damage to ecosystem diversity	species·yr/m <sup>3</sup>	2.10E-06	3.40E-08	6.10E-08
Damage to natural resources	USD/m <sup>3</sup>	9.6	0.11	0.19

#### Apéndice Q. Resultados – Daño a la salud humana (DALY/m<sup>3</sup>) Punto Final

Alternativa	Seco (-20%)	Base	Húmedo (+20%)
Alt 1	6.00E-04	4.80E-04	4.00E-04
Alt 2	9.50E-06	7.60E-06	6.30E-06
Alt 3	1.63E-05	1.30E-05	1.10E-05

#### Apéndice R. Resultados – Daño a ecosistemas (species·yr/m<sup>3</sup>) Punto Final

Alternativa	Seco (-20%)	Base	Húmedo (+20%)
Alt 1	2.63E-06	2.10E-06	1.75E-06
Alt 2	4.25E-08	3.40E-08	2.83E-08
Alt 3	7.63E-08	6.10E-08	5.08E-08

#### Apéndice S. Resultados – Daño a recursos naturales (USD/m<sup>3</sup>) Punto Final

Alternativa	Seco (-20%)	Base	Húmedo (+20%)
Alt 1	1.20E+01	9.60E+00	8.00E+00
Alt 2	1.40E-01	1.10E-01	9.20E-02
Alt 3	2.40E-01	1.90E-01	1.60E-01

#### Apéndice T. Supuestos generales adoptados en el modelamiento

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente / Observación
Precipitación media anual	1 200	mm/año	IDEAM
Vida útil del sistema	20	años	Supuesto de diseño
Configuración de bombeo	Idéntica en las tres alternativas	–	Misma bomba
Potencia nominal de la bomba	0.5	hp	≈ 373 W
Altura manométrica	15	m	Diseño hidráulico
Eficiencia global bomba-motor	55	%	Supuesto conservador
Fuente energética	Electricidad de red	–	LCA Commons
Unidad funcional	1 m <sup>3</sup> de agua útil entregada	m <sup>3</sup>	ACV comparativo

#### Apéndice U. Resultados del balance hídrico anual

Variable	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Área de captación (m <sup>2</sup> )	100	125	125
Volumen captado (m <sup>3</sup> /año)	96	150	132
Volumen útil entregado (m <sup>3</sup> /año)	36	50	53
Rendimiento global (%)	37	33	40

#### Apéndice V. Consumo energético asociado al bombeo

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Volumen bombeado anual (m <sup>3</sup> /año)	36	50	53
Energía hidráulica requerida (kWh/m <sup>3</sup> bombeado)	0.04	0.04	0.04
Consumo energético anual (kWh/año)	1.44	2	2.12
Consumo energético normalizado (kWh/m <sup>3</sup> UF)	<b>0.04</b>	<b>0.025</b>	<b>0.023</b>