



Estudio de factibilidad para el diseño de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural de la vereda Zafra del Municipio de San Pedro de los Milagros, Antioquia, como alternativa ante la intermitencia en el servicio de acueducto y la insuficiencia en la oferta hídrica.

Isabel Echavarría Álzate

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Evaluación Socioeconómica de Proyectos

Director

Sergio Alexander Rúa Álvarez,
Especialista (Esp) Gestión Ambiental, Formulación y Evaluación de Proyectos

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Especialización en Evaluación Socioeconómica de Proyectos
Medellín, Antioquia, Colombia
2026

Cita	(Echavarría Álzate, 2026)
Referencia	Echavarría Álzate, I. (2026). <i>Estudio de factibilidad para el diseño de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural de la vereda Zafra del Municipio de San Pedro de los Milagros, Antioquia, como alternativa ante la intermitencia en el servicio de acueducto y la insuficiencia en la oferta hídrica</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Evaluación Socioeconómica de Proyectos, Cohorte XXX.



Centro de Documentación Economía

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Planteamiento del problema	12
Antecedentes y Justificación	14
Objetivos	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
Alcance	20
Hipótesis	21
Hipótesis de trabajo	21
Hipótesis nula	21
Hipótesis alterna	21
Variables	21
Alternativas de Solución	23
Marco conceptual	25
Definiciones:	29
Marco normativo	32
Descripción del entorno	34
Entorno Económico	34
Entorno Social	34
Entorno Ambiental	35
Entorno Político	36

Entorno Tecnológico	36
Entorno Sectorial	37
Estudio de mercado	39
Análisis de la demanda.....	40
Oferta hídrica del Acueducto	43
Oferta hídrica del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.....	45
Mercado Objetivo.....	47
Estudio Técnico.....	49
Localización y tamaño óptimo	49
Descripción del Sistema	52
Ingeniería del proyecto.....	54
Distribución física del sistema	55
Estudio Organizacional y Legal	57
Evaluación Financiera	59
Evaluación Económica.....	62
Evaluación Social y Ambiental	64
Conclusiones	66
Recomendaciones.....	67
Referencias	68

Lista de tablas

Tabla 1	Comparación cuantitativa alternativas de solución	23
Tabla 2	Comparación cuantitativa alternativas de solución	24
Tabla 3	Definiciones componentes del Ciclo del Agua	26
Tabla 4	Resumen Oferta vs Demanda	46
Tabla 5	Ficha técnica.....	54
Tabla 6	Disposiciones legales	58
Tabla 7	Inversión inicial.....	59
Tabla 8	Proyección ingresos, costos y gastos.....	60
Tabla 9	Flujo de caja proyectado	60
Tabla 10	Evaluación financiera.....	61
Tabla 11	Análisis Beneficio - Costo.....	62

Lista de figuras

Figura 1	Cobertura de acueducto en asentamiento rural vigencia 2023	17
Figura 2	Ciclo hídrico	25
Figura 3	Distribución del agua en el mundo	28
Figura 4	Mapa de veredas y corregimiento del municipio de San Pedro de los Milagros.....	39
Figura 5	Localización, límites y subregiones del departamento de Antioquia	41
Figura 6	Población total departamento de Antioquia.....	42
Figura 7	Distribución poblacional en Antioquia.....	42
Figura 8	Tabla climática del tiempo.....	46
Figura 9	Mapa localización vivienda rural en la vereda Zafra.....	49
Figura 10	Localización del predio.....	50
Figura 11	Diagrama de procesos en bloques.....	51
Figura 12	Sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en techo	52
Figura 13	Distribución física del sistema.....	55
Figura 14	Plan de ejecución de actividades	56
Figura 15	Organigrama	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AAS S.A. E.S.P.	Acueductos y Alcantarillados Sostenibles Sociedad Anónima Empresa de Servicios Públicos
ASUAZA	Acueducto Veredal Zancudito – Zafra
CAR	Corporaciones Autónomas Regionales
CIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
GIRH	Gestión Integral del Recurso Hídrico
ICA	Índice de Calidad del Agua
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IRCA	Índice de Riesgo de la Calidad del Agua
IUA	Índice de Uso del Agua
NTC	Norma Técnica Colombiana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PDET	Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial
PRI	Período de Recuperación de la Inversión
SCALL	Sistemas de Cosecha de Aguas Lluvias
SICCALL	Sistema Inteligente en Cascada para la Cosecha de Agua Lluvia
TIR	Tasa Interna de Retorno
VPN	Valor Presente Neto

Resumen

La monografía evaluó la factibilidad de implementar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural de la vereda Zafra, San Pedro de los Milagros (Antioquia), como alternativa ante la intermitencia del acueducto veredal y la insuficiencia en la oferta hídrica. En este contexto, donde el acueducto comunitario presenta deficiencias operativas y administrativas, se propone una solución sostenible que garantice el acceso continuo al recurso hídrico, mejore la calidad de vida y fortalezca la autonomía hídrica de la comunidad.

El estudio tuvo como objetivo principal determinar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de un sistema de captación, almacenamiento y distribución de aguas lluvias, considerando las condiciones climáticas, la infraestructura disponible y el perfil socioeconómico de los beneficiarios. Se aplicó una metodología mixta que incluyó análisis cuantitativo de oferta y demanda hídrica, comparación de alternativas de solución bajo criterios de costo, impacto, pertinencia, factibilidad técnica y sostenibilidad, y evaluación financiera mediante indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (PRI).

Los resultados muestran que el sistema cubre el 100% del déficit hídrico de la vivienda y genera excedentes que pueden beneficiar a otras viviendas. Además, promueve la autogestión del recurso, el empoderamiento comunitario y la sostenibilidad ambiental. Se concluye que esta alternativa es eficaz, replicable y recomendable para otras viviendas rurales, en articulación con políticas públicas que promuevan la gestión integral del recurso hídrico en territorios rurales.

Palabras clave: Factibilidad, Sostenibilidad, Agua lluvia, Recurso hídrico.

Abstract

The monograph evaluated the feasibility of implementing a rainwater harvesting system in a rural household located in the Zafra village, San Pedro de los Milagros (Antioquia), as an alternative to address the intermittency of the community aqueduct and the insufficiency of water supply. In this context, where the community aqueduct presents operational and administrative deficiencies, a sustainable solution is proposed to ensure continuous access to water resources, improve quality of life, and strengthen the community's water autonomy.

The main objective of the study was to determine the technical, economic, social, and environmental viability of a rainwater collection, storage, and distribution system, considering climatic conditions, available infrastructure, and the socioeconomic profile of the beneficiaries. A mixed methodology was applied, including a quantitative analysis of water supply and demand, comparison of solution alternatives based on cost, impact, relevance, technical feasibility, and sustainability criteria, and financial evaluation using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PRI).

The results show that the system covers 100% of the household's water deficit and generates surpluses that can benefit other homes. Furthermore, it promotes resource self-management, community empowerment, and environmental sustainability. It is concluded that this alternative is effective, replicable, and recommended for other rural households, in alignment with public policies that promote integrated water resource management in rural areas.

Keywords: Feasibility, Sustainability, Rainwater, Water resource.

Introducción

El agua lluvia es una fuente esencial para la vida en la tierra. Sin ella, los ecosistemas no podrían sostenerse, y es parte fundamental en el ciclo hidrológico. Al ser un recurso abundante, el aprovechamiento del agua lluvia tiene múltiples beneficios económicos, ambientales y sociales; adicionalmente, permite ser aprovechada para el uso doméstico, agrícola, ganadero, entre otras y contribuye a la adaptación al cambio climático y a la conservación del agua potable. En contextos rurales como la vereda Zafra, del municipio de San Pedro de los Milagros (Antioquia), donde el servicio de acueducto veredal presenta alta intermitencia y no logra suplir la demanda hídrica de las viviendas, el aprovechamiento del agua lluvia se convierte en una alternativa estratégica para reducir la dependencia de fuentes externas y garantizar el acceso sostenible al recurso hídrico.

En la actualidad, ASUAZA, el Acueducto Veredal Zancudito – Zafra, es la empresa encargada de suministrar agua en diferentes veredas del municipio, entre ellas Zafra, lugar del presente estudio. La problemática está relacionada principalmente con la informalidad del acueducto comunitario, lo que se traduce en un bajo nivel de recaudo y recuperación de los costos mínimos de operación, mantenimiento y renovación de la infraestructura existente. Además, la ausencia de elementos como contadores o medidores de agua genera pérdidas y un uso ineficiente del recurso sin posibilidad de cuantificación. Estas condiciones han originado constantes intermitencias e interrupciones en la prestación del servicio, y han limitado la capacidad del acueducto para suplir adecuadamente la demanda hídrica de las viviendas con la oferta disponible.

Ante esta problemática de dependencia a fuentes externas que suministran el recurso hídrico para el uso doméstico, y considerando que el acueducto veredal no logra suplir completamente la demanda de agua de las viviendas con la oferta disponible, el estudio tiene como propósito evaluar la factibilidad de diseñar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural de la vereda Zafra. Además, busca comparar tecnologías de aprovechamiento de aguas lluvias utilizadas en viviendas rurales similares, con el fin de determinar la aplicabilidad e identificar la infraestructura necesaria para conformar el sistema de captación, almacenamiento y distribución del agua lluvia. Esto permitirá estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento, y

analizar indicadores socioeconómicos que justifiquen la viabilidad del sistema en términos de beneficio o ahorro económico, mejora en la calidad de vida y sostenibilidad del recurso hídrico.

El estudio está alineado con diferentes marcos normativos y políticas públicas existentes a nivel mundial que promueven la gestión sostenible del agua y el aprovechamiento de recursos hídricos. A nivel nacional, el Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES ha emitido políticas de gestión integral del recurso hídrico para la adaptación al cambio climático, las cuales determinan que el aprovechamiento de aguas lluvias es una de las soluciones más efectivas para enfrentar la escasez de agua en el país, especialmente en las zonas rurales más vulnerables (CONPES, 2020). A su vez, el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible ha emitido lineamientos para el uso de aguas lluvias y el manejo de sedimentos, reconociendo su potencial para mejorar la disponibilidad de agua en diversas regiones del país, con énfasis en zonas donde el acceso a fuentes hídricas convencionales es limitado (Ministerio de Ambiente, 2022). A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud y la Organización de las Naciones Unidas ha destacado la importancia del aprovechamiento de aguas lluvias como una estrategia clave para mejorar el acceso al agua en áreas rurales (ONU, 2018). Todas ellas promueven el uso de soluciones basadas en la naturaleza, como el aprovechamiento de aguas lluvias, para mejorar el acceso al agua y avanzar en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6, que busca "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos" (ODS, 2015).

A través del estudio de factibilidad, no solo se espera aportar una solución a la problemática, sino también contribuir al cumplimiento de las políticas públicas en Colombia en relación con la gestión sostenible del recurso hídrico. Ante la presente realidad en la vereda Zafra, el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias permite tener independencia, autonomía, y autogestión sostenible del agua para el uso doméstico; también generar empoderamiento comunitario y fortalecer el tejido social al promover la participación y cohesión entre los miembros de la comunidad, fomentando el liderazgo social, la educación sobre el uso eficiente y responsable del agua, y la sensibilización sobre la importancia de la conservación del agua. De esta manera, se asegura el recurso hídrico para el bienestar y desarrollo de la comunidad.

Planteamiento del problema

El área rural del municipio de San Pedro de los Milagros se compone de 19 veredas, entre ellas la vereda Zafra, lugar de estudio y cuya problemática está relacionada principalmente con la informalidad del acueducto comunitario, lo que se traduce en un bajo nivel de recaudo y recuperación de los costos mínimos de operación, mantenimiento y renovación de la infraestructura existente. Además, la ausencia de elementos como contadores o medidores de agua genera pérdidas y un uso ineficiente del recurso, sin posibilidad de cuantificación, estas condiciones han originado constantes intermitencias e interrupciones en la prestación del servicio, y han limitado la capacidad del acueducto para suplir adecuadamente la demanda hídrica de las viviendas con la oferta disponible.

Si bien los acueductos multiveredales emergen como una solución innovadora y sostenible para impulsar el desarrollo local, enfrentan un desafío para garantizar el acceso al recurso hídrico, ya que es fundamental garantizar la participación activa de la comunidad en la planificación, construcción, operación, mantenimiento y renovación de esta infraestructura, así como asegurar la sostenibilidad financiera, económica, social, ambiental y técnica del acueducto veredal; por lo tanto, existen retos por superar.

Según el Plan de Desarrollo Territorial 2024 – 2027 del Municipio de San Pedro de los Milagros, la cobertura de servicios básicos, calidad del agua y la infraestructura de acueducto y alcantarillado revelan desigualdades significativas entre zonas urbanas y rurales, pues la cobertura de acueducto alcanza el 100% en zonas urbanas, con un suministro continuo de 24 horas diarias, contrario para el área rural. Adicionalmente, presenta un alto riesgo según el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), indicando que no es apta para el consumo humano. Esto subraya la necesidad de mejorar la infraestructura y los servicios de agua y alcantarillado en las zonas rurales para garantizar el acceso a agua segura y reducir riesgos de salud asociados con el consumo de agua contaminada (Plan de Desarrollo Territorial, 2024-2027).

Con el propósito de contribuir a la causa y alineado con el plan de desarrollo territorial del Municipio, se plantea el sistema de aprovechamiento del agua lluvia como una alternativa de solución para disminuir el problema de la intermitencia, interrupciones nocturnas y cortes

adicionales durante la semana que se presenta en el servicio de acueducto, afectando la vivienda rural y en general a toda la vereda Zafra. Según el análisis realizado de oferta y demanda, el acueducto veredal presenta una disponibilidad del servicio de aproximada del 64,29%, lo que genera un déficit hídrico significativo del 35,71% aproximadamente, el cual se atenderá con el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias. Este sistema no solo cubre completamente este déficit, sino que genera un excedente hídrico que permitirá abastecer parcialmente el déficit de otras viviendas, cubriendo aproximadamente el déficit de unas 2.22 viviendas y que se puede generar ingresos mediante la venta del recurso, promoviendo la sostenibilidad y la autonomía hídrica. La población objetivo son principalmente los residentes rurales de la vereda Zafra, con una población estimada de 480 personas en la vereda, conformada por 120 viviendas, para un promedio de 4 personas por hogar.

Antecedentes y Justificación

El aprovechamiento del agua lluvia ha sido una práctica histórica utilizada por diversas civilizaciones como respuesta a la escasez hídrica y a la necesidad de garantizar el acceso al agua en zonas con limitaciones de infraestructura, fuentes naturales o dependencia de fuentes externas, esta técnica ha evolucionado como parte de estrategias de gestión hídrica sostenible, especialmente en regiones vulnerables al cambio climático y al estrés hídrico.

En Colombia, diferentes investigaciones han demostrado el potencial de estos sistemas para complementar el abastecimiento de agua convencional, especialmente en zonas rurales que indican la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de estos sistemas.

Según (Ramírez, 2021), en la investigación titulada “Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá”, realizado en Bogotá, Colombia, encontraron que los sistemas de cosecha de aguas lluvias (SCALL) demuestran viabilidad tecnológica, económica, ambiental y social. Además, proponen una nueva metodología para evaluar el potencial de eficiencia energética de servicios basados en recursos distribuidos como el agua lluvia y recomienda al Distrito Capital implementar políticas que promuevan el uso del sistema inteligente en cascada para la cosecha de agua lluvia (SICCALL), como estrategia para gestionar eficientemente la demanda de agua y energía, apoyándose en economías colaborativas y redes distribuidas, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el modelo de ciudades inteligentes.

Según (Guzmán, 2018), en la monografía titulada “Recolección y aprovechamiento de aguas pluviales mediante sistemas de recolección”, desarrollada en el contexto del Instituto Distrital para la Recreación y el Deporte (IDRD) en Bogotá, analiza los alcances y limitaciones de implementar sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en parques públicos. El estudio surge como respuesta a la creciente preocupación ambiental, especialmente por la escasez y contaminación del recurso hídrico, donde plantean el aprovechamiento del agua lluvia como una alternativa para el abastecimiento parcial en zonas con baja disponibilidad, y como estrategia para reducir la huella ecológica urbana.

Además, (Guzmán, 2018) propone el uso de infraestructura verde en espacios recreativos, con el fin de optimizar beneficios ambientales, sociales y económicos, y destacan la importancia de establecer alianzas entre gestores de parques y responsables de la gestión de aguas pluviales, como parte de una visión integral de sostenibilidad urbana, y que la metodología cualitativa utilizada permite reflexionar sobre la participación ciudadana, la viabilidad técnica y financiera, y el potencial de replicabilidad de estos sistemas en otros contextos urbanos.

Según (Arboleda, 2016), en el estudio titulado “diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de los Lagos, Buenaventura”, evidenció el alto potencial de aprovechamiento de aguas lluvias como principal fuente de abastecimiento en una comunidad sin acceso a sistemas de acueducto. El análisis mostró que, aunque todas las viviendas practican la captación de agua lluvia, la capacidad de almacenamiento es limitada, lo que genera desabastecimiento cuando cesan las lluvias por más de una semana. Los sistemas utilizados incluyen techos de zinc y asbesto como superficies de captación, canaletas para conducción y recipientes diversos para almacenamiento, sin embargo, se identificaron deficiencias en la limpieza y mantenimiento, especialmente en techos y canaletas de asbesto.

El agua lluvia, según (Arboleda, 2016), se utiliza para todos los usos domésticos, incluyendo el consumo directo, aunque el tratamiento es mínimo, lo que ha generado problemas de salud como diarreas, principalmente en niños. El estudio concluye que existe una necesidad urgente de mejorar los sistemas de captación, almacenamiento y tratamiento del agua lluvia, y que la comunidad está dispuesta a adoptar mejoras para reducir los riesgos sanitarios y garantizar una mejor calidad de vida.

Estos antecedentes permiten comprender que el aprovechamiento de aguas lluvias no solo representa una solución técnica, sino también una herramienta para la gestión integrada del recurso hídrico.

A lo largo del tiempo, Colombia ha desarrollado un marco legal y normativo que establece las pautas para la gestión integral del recurso hídrico. El Plan Nacional de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico rural para favorecer a las familias que habitan el campo del Ministerio de Vivienda busca asegurar el acceso al agua potable y saneamiento básico en las zonas rurales, a través de soluciones tecnológicas apropiadas y procesos de participación de las comunidades. Esta

es una estrategia de alcance nacional que beneficiará a todas las zonas rurales de Colombia, priorizando acciones en las regiones pertenecientes al Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial que se conocen como PDET, fortaleciendo la inversión, planificación y el mantenimiento de las infraestructuras que finalmente se traducen en una mejor calidad de vida para las familias campesinas. (Minvivienda, 2021).

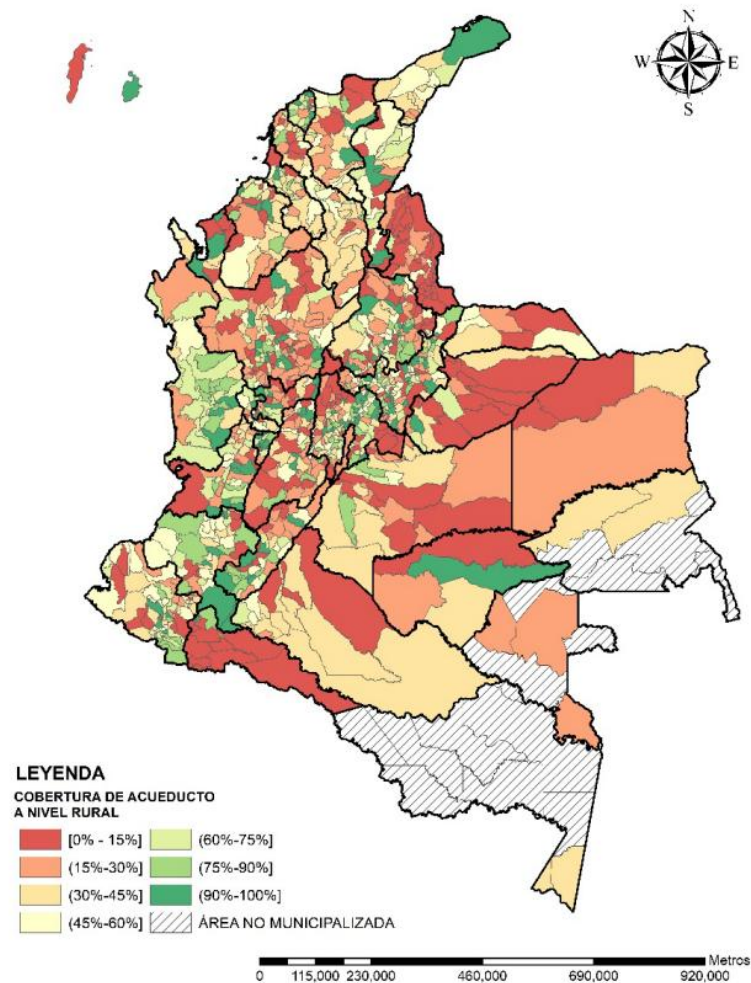
Sin embargo, las problemáticas más destacadas en el suministro de agua potable y saneamiento básico en zonas rurales están relacionadas con los bajos niveles de articulación a nivel nacional, regional y local. La normatividad orientada a los servicios en las zonas urbanas no tiene en cuenta las particularidades de las zonas rurales, también la deficiente planeación, baja capacidad institucional, baja destinación de recursos, alta atomización de prestadores de este servicio y los altos índices de informalidad de los mismos no permiten que algunas zonas rurales cuenten con este servicio básico esencial (Minvivienda, 2020).

A pesar de la cobertura que tiene el país en la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento básico en zonas rurales, Colombia tiene grandes retos para disminuir la brecha en cuanto a la calidad y la continuidad de ellos, ya que, al construir infraestructura robusta y sistemas complejos en zonas apartadas, generan altos costos de operación que superan la capacidad de pago de los usuarios y la capacidad técnicas de las organizaciones comunitarias para hacer mantenimiento a la infraestructura y equipos. Adicional, enfrentan dificultades para mantener la infraestructura en operación, debido al bajo nivel de recaudo y el cobro de cuotas o aportes que no aseguran la recuperación de costos mínimos de operación y administración. (Minvivienda, 2020).

Según el informe nacional de coberturas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo de Superservicios de 2023, con respecto a las zonas rurales, 400 municipios del país presentan coberturas menores o iguales al 30% (colores rojos en el mapa), lo que constituye el 36,26% del país. Adicionalmente, 196 municipios presentan su cobertura entre 30% y 45%; mientras que 131 municipios presentan coberturas entre el 90% y el 100%, siendo este el 11,87% del país (Superservicios, 2023).

Figura 1

Cobertura de acueducto en asentamiento rural vigencia 2023



Fuente: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Coberturas-AAA-2023.pdf>

Teniendo en cuenta la cobertura actual en las zonas rurales del país, es claro el desafío que tiene el gobierno nacional, departamental y municipal para abastecer a la comunidad rural en la prestación del servicio de acueducto, ya que esto tiene repercusiones directas en la salud de la población, generando un problema de índice económico y social. Así las cosas, la implementación de tecnologías para la gestión del recurso hídrico como los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, se convierte en una alternativa de solución muy viable. (Superservicios, 2023).

La implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias se convierte en una solución muy relevante en zonas rurales donde no haya cobertura del servicio de acueducto o exista una alta dependencia a fuentes externas que suministran el recurso, y naturalmente, donde las condiciones climáticas sean adecuadas para la recolección del agua. Estos sistemas captan, almacenan y distribuyen el agua lluvia, permitiendo a las comunidades rurales disponer de una fuente de agua que no sea excluyente de otros sistemas como aljibes, pilas comunales, captación de agua de niebla entre otros. Algunos de los beneficios de estos sistemas incluyen:

- Independencia, autonomía, autogestión, empoderamiento y autosuficiencia del recurso.
- Reducción de la dependencia de fuentes de agua externas.
- Mitigación de los efectos de la variabilidad y cambios climáticos.
- Sensibilización del nivel de conciencia sobre la importancia de la conservación del agua.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la factibilidad de diseñar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural con dependencia a fuentes externas que suministran el recurso hídrico, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

Objetivos específicos

Comparar diferentes tecnologías de aprovechamiento de aguas lluvias utilizadas en viviendas rurales similares para determinar su aplicabilidad.

Identificar la infraestructura necesaria que conforma el sistema de captación, almacenamiento y distribución del agua lluvia, para estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Determinar la viabilidad financiera mediante la evaluación de los indicadores el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Período de Recuperación de la Inversión (PRI) y la relación costo-beneficio.

Analizar indicadores socioeconómicos que justifiquen la viabilidad del proyecto, en términos del beneficio o ahorro económico, mejora en la calidad de vida y la sostenibilidad del recurso hídrico.

Alcance

El alcance de la monografía está centrado en la evaluación de la factibilidad de diseñar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en una vivienda rural de la vereda Zafra de San Pedro de los Milagros en Antioquia. Esto incluye:

Estudio Técnico:

Evaluación y comparación de tecnologías de aprovechamiento de aguas lluvias existentes para la captación, almacenamiento y distribución del agua lluvia en viviendas rurales, de esta manera determinar cuál es la más adecuada.

Diseño y definición de los componentes del sistema para identificar las especificaciones técnicas y funcionales de la infraestructura necesaria.

Estudio Financiero y Económico:

Estimación de costos de inversión inicial, operación y mantenimiento del sistema, así como el análisis de los beneficios económicos, tales como el ahorro en la compra de agua cuando la fuente externa no suministra el agua y la viabilidad Financiera en relación con la venta del excedente del agua recolectada.

Estudio Ambiental y Social:

Evaluación de los impactos ambientales asociados con la implementación del sistema, con énfasis en la conservación de los recursos hídricos y el uso sostenible del agua.

Desarrollo de estrategias para promover la participación comunitaria, el liderazgo social y el fortalecimiento del tejido social en torno al sistema.

El proyecto no incluye la implementación del sistema, pues el alcance se limita a la fase de diseño.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Se plantea que el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en la vivienda rural es una solución integral y sostenible que resuelve el déficit hídrico causado por la intermitencia del acueducto veredal ASUAZA. Este sistema no solo garantizará el suministro continuo de agua para el uso doméstico, sino que genera un excedente hídrico suficiente para abastecer parcialmente a algunas viviendas de la vereda. Además, con la autonomía hídrica mejoraría la calidad de vida, habría adaptación al cambio climático, entre otros beneficios.

Hipótesis nula

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias es una solución viable y sostenible que transforma la gestión hídrica en la vereda Zafra. Específicamente genera un Valor Presente Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno superior al 12%, recupera la inversión inicial en menos de 3 años, produce un excedente hídrico para la venta o comercialización y mejora significativamente la autonomía, seguridad hídrica y calidad de vida, reflejada en mayor disponibilidad de agua. Este sistema no solo resuelve el déficit hídrico, sino que se convierte en un modelo de autogestión replicable y rentable.

Hipótesis alterna.

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias no representa una solución viable ni sostenible para la vivienda rural en Zafra. Específicamente no genera beneficios económicos netos, la inversión no se recupera en menos de 3 años, no produce un excedente hídrico comercializable y no mejora la autonomía hídrica ni la calidad de vida de los habitantes. En resumen, el SCALL no justifica su implementación frente al costo actual de depender del acueducto intermitente.

Variables.

Volumen de agua captada: es una variable dependiente que describe la cantidad total de agua lluvia que ingresa al sistema desde el techo hasta el tanque de almacenamiento para la distribución.

Precipitación efectiva: es una variable dependiente que describe el coeficiente de escorrentía en el sistema.

Costo total de inversión: es una variable independiente que suma todas las variables de inversión, costos y gastos.

VPN: el valor presente neto es una variable independiente que permite evaluar la rentabilidad de la inversión.

TIR: la Tasa Interna de Retorno es una variable independiente que permite determinar el nivel mínimo de interés que la inversión debe alcanzar para ser rentable.

PRI: el periodo de recuperación de la inversión o payback una variable independiente que determina el tiempo que tarda el sistema en recuperar la inversión inicial.

Beneficio/Costo económico: es una variable independiente que evalúa la viabilidad del proyecto, comparando los beneficios esperados con los costos, tanto tangibles como intangibles.

Alternativas de Solución

Las alternativas de solución planteadas para abordar la problemática presentada en la vereda Zafra se enmarcan en las siguientes 3 opciones, basadas en los criterios de costo, impacto, pertinencia, factibilidad técnica y sostenibilidad.

Tabla 1

Comparación cuantitativa alternativas de solución

ALTERNATIVAS							
Criterios	Peso	Sistema de Aprovechamiento de agua lluvia		Fortalecimiento del Acueducto Veredal Asuaza		Abastecimiento de Fuentes Informales (Carrotanques, ríos, pozos)	
		Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado	Calificación	Peso ponderado
Costo	20%	4	0,80	3	0,60	2	0,40
Impacto	20%	5	1,00	3	0,60	2	0,40
Pertinencia	20%	5	1,00	4	0,80	2	0,40
Factibilidad Técnica	20%	4	0,80	3	0,60	2	0,40
Sostenibilidad	20%	5	1,00	3	0,60	1	0,20
TOTAL PONDERADO	100%	4,60		3,20		1,80	

Nota: Los valores de las calificaciones son los siguientes:

- 1 - Muy desfavorable:** presenta grandes debilidades, baja viabilidad o alto riesgo.
- 2 - Desfavorable:** tiene limitaciones importantes que afectan la implementación.
- 3 - Aceptable:** cumple parcialmente con los criterios, pero requiere ajustes.
- 4 - Favorable:** cumple adecuadamente con los criterios, con buena viabilidad.
- 5 - Muy favorable:** sobresale en el criterio, alta viabilidad, impacto positivo.

Fuente Elaboración propia con fuentes de información secundaria

El **Sistema de Aprovechamiento de Agua Lluvia** obtiene la puntuación más alta en la ponderación total de los criterios de costo, impacto, pertinencia, factibilidad técnica y sostenibilidad, y está justificado con la siguiente información cualitativa:

Tabla 2
Comparación cuantitativa alternativas de solución

Criterios	Sistema de Aprovechamiento de agua lluvia	Fortalecimiento del Acueducto Veredal Asuaza	Abastecimiento de Fuentes Informales (Carrotanques, ríos, pozos)
Costo	* Requiere una inversión inicial moderada, pero es accesible comparado con sistemas convencionales. * Bajos costos de operación y mantenimiento. * Posibilidad de autoconstrucción con materiales locales.	* Inversión compartida por la comunidad o entes territoriales. * Costos de operación y mantenimiento pueden ser altos. * Dependencia de tarifas y pago de cuota mensual.	* Costos variables y a menudo altos (transporte, bombeo). * No hay control sobre precios ni disponibilidad. * No es una solución económica a largo plazo.
Impacto	* Alta contribución a la autonomía hídrica. * Mejora la calidad de vida al garantizar disponibilidad de agua. * Promueve la conciencia ambiental y el empoderamiento comunitario.	* Mejora el acceso al agua, pero puede ser intermitente. * Impacto limitado si la cobertura es baja o el servicio es irregular. * Menor empoderamiento comunitario.	* Acceso limitado y no garantizado. * Riesgo sanitario por calidad del agua. * Genera dependencia y vulnerabilidad.
Pertinencia	* Responde directamente a la problemática. * Compatible con políticas públicas rurales y sostenibilidad hídrica. * Adaptado a las condiciones climáticas y sociales de la vereda Zafra.	* Es una solución tradicional, pero no siempre adecuada para zonas dispersas. * Puede no responder a las particularidades de la vereda Zafra. * Depende de la articulación institucional.	* Solución temporal o de emergencia. * No responde a necesidades permanentes. * No se alinea con políticas de sostenibilidad.
Factibilidad Técnica	* Requiere conocimientos básicos para instalación y mantenimiento. * Tecnología disponible y probada en contextos rurales similares. * Puede necesitar asesoría técnica inicial.	* Requiere infraestructura compleja y mantenimiento especializado. * Alta dependencia de operadores y entidades externas. * Riesgo de fallas por falta de recursos técnicos.	* Fácil acceso en algunos casos (ríos, pozos), pero con riesgos. * No requiere infraestructura compleja. * Puede ser viable en ausencia de otras opciones.
Sostenibilidad	* Promueve el uso responsable del agua. * Reduce presión sobre fuentes externas. * Contribuye a la resiliencia frente al cambio climático.	* Puede ser sostenible si hay buena gestión comunitaria. * Riesgo de deterioro por falta de mantenimiento. * Menor flexibilidad ante eventos climáticos extremos.	* No es sostenible ambiental ni socialmente. * Riesgo de agotamiento o contaminación de fuentes. * No promueve gestión responsable del recurso.

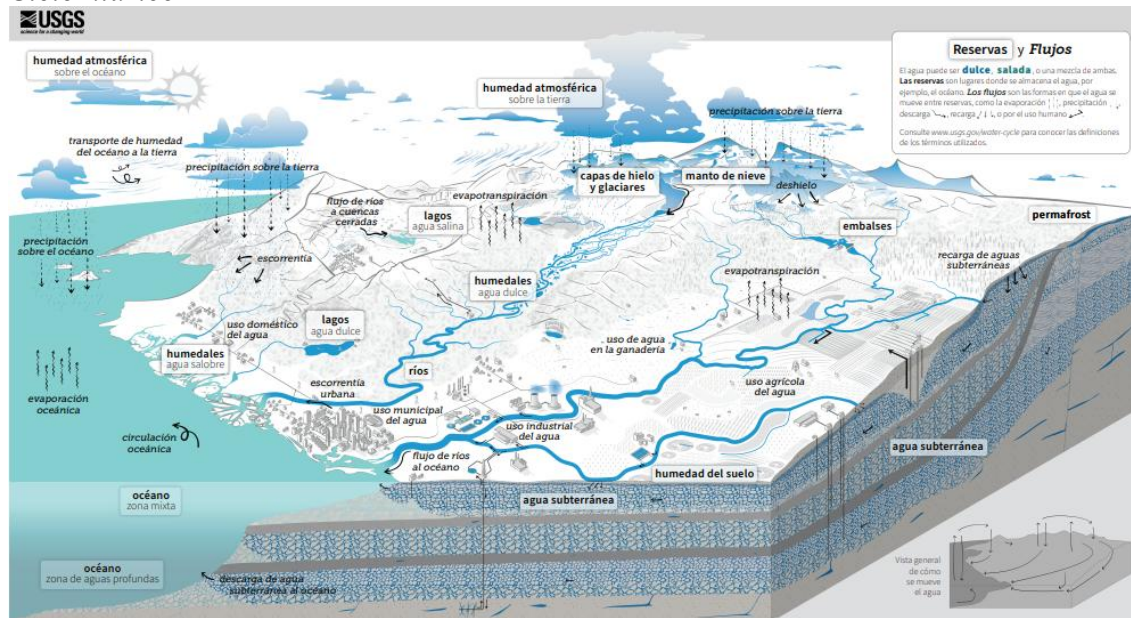
Fuente Elaboración propia con fuentes de información secundaria

Marco conceptual

En este marco conceptual se relacionan diferentes conceptos, como los componentes que conforman el Ciclo Hídrico, componentes técnicos relacionados con los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia y conceptos relacionados con el potencial del agua lluvia para abastecer necesidades existentes en zonas rurales del país, para el uso doméstico.

En primer lugar, es importante comprender el ciclo hidrológico, los componentes y la relevancia en relación con el propósito de aprovechar el agua lluvia. El ciclo hídrico representa la circulación continua de agua en el sistema tierra, por lo tanto, los cambios sobre algún componente del ciclo pueden influir en el comportamiento de otros componentes.

Figura 2
Ciclo hídrico



Fuente: (USGS, 2022)

Tabla 3

Definiciones componentes del Ciclo del Agua

Componentes del Ciclo Hídrico	Definición Según USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos)	Relevancia
Atmósfera	Es el espacio donde se almacena el agua en forma de vapor. El vapor de agua se transporta desde los océanos hacia la tierra a través de los vientos.	Regula la distribución del agua a través de la precipitación y la evapotranspiración, fundamental para el ciclo natural y los climas globales.
Océanos	Almacenan el 96% del agua de la Tierra en forma salina. A través de la evaporación, el agua regresa a la atmósfera.	Los océanos son la mayor fuente de agua para el ciclo, influyendo en los climas y en la cantidad de agua disponible para otros procesos.
Evaporación oceánica	El proceso mediante el cual el agua líquida de los océanos se convierte en vapor y asciende hacia la atmósfera.	Es crucial para la formación de nubes y la precipitación, redistribuyendo el agua hacia la tierra.
Circulación oceánica	Movimiento del agua en los océanos que distribuye el calor y el vapor de agua por todo el planeta.	Afecta el clima y la distribución del agua, facilitando la evaporación y la precipitación a nivel global.
Precipitación sobre el océano	El vapor de agua en la atmósfera se condensa y cae nuevamente al océano como lluvia o nieve.	Completa el ciclo del agua al devolver el agua al océano, donde puede ser reutilizada por otros procesos.
Precipitación sobre la tierra	El vapor de agua se convierte en lluvia o nieve y cae sobre la tierra, alimentando la superficie terrestre.	Es esencial para mantener el abastecimiento de agua dulce para las plantas, animales y las actividades humanas.
Deshielo	El proceso por el cual el agua congelada (nieve o hielo) se derrite y vuelve a ser agua líquida.	Aporta agua dulce adicional a los ríos y lagos, especialmente en regiones frías o de montaña.
Escorrentía	El agua fluye sobre la superficie terrestre, moviéndose hacia ríos, lagos y océanos.	Asegura que el agua captada por la precipitación llegue a los cuerpos de agua, renovando los recursos hídricos.
Ríos y lagos	Los ríos y lagos almacenan agua dulce y facilitan el flujo de agua sobre la superficie terrestre.	Son fuentes cruciales para el suministro de agua potable, riego agrícola y actividades industriales.
Uso agrícola del agua	El agua de ríos, lagos y acuíferos se usa para regar cultivos.	Es esencial para la producción de alimentos y la agricultura, que depende directamente del agua disponible.
Uso industrial del agua	El agua se utiliza en la generación de energía, minería, acuicultura y otros procesos industriales.	Afecta el desarrollo económico, pero puede generar problemas si no se gestiona de forma sostenible.
Humedad del suelo	El agua presente en el suelo que es utilizada por las plantas y otros organismos.	Es crucial para la agricultura y la vida vegetal, afectando la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas.
Acuíferos subterráneos	El agua almacenada en las formaciones rocosas bajo la tierra.	Proporciona una fuente confiable de agua para beber, riego y otros usos, especialmente en áreas con baja precipitación.

Permafrost	El agua almacenada como hielo en el suelo en regiones frías.	Actúa como un reservorio de agua congelada que puede liberar agua cuando se derrite, aunque es sensible al cambio climático.
Capas de hielo y glaciares	El agua congelada almacenada en grandes masas de hielo en regiones frías.	Son importantes para la regulación del clima y proporcionan agua dulce a largo plazo cuando se derriten.
Manto de nieve	El agua almacenada en forma de nieve en las zonas de alta montaña o en climas fríos.	Alimenta ríos y lagos cuando se derrite, siendo vital para las regiones que dependen de este recurso en épocas más cálidas.
Evapotranspiración	El proceso por el cual las plantas liberan agua en forma de vapor hacia la atmósfera.	Regula la humedad del aire y contribuye a la cantidad de vapor de agua disponible para la precipitación.
Recarga de aguas subterráneas	El agua de lluvia y escorrentía que infiltra el suelo y recarga los acuíferos subterráneos.	Asegura el abastecimiento de agua a largo plazo para consumo humano y actividades agrícolas, especialmente en áreas secas.

Fuente: elaborado a partir de (USGS, 2022)

Los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia reflejan un avance hacia una gran alternativa de solución para abordar la escasez global del recurso, pues solo el 2.5% del agua del mundo está conformado por agua dulce y de este porcentaje, menos del 1% es agua disponible para el consumo humano y los ecosistemas. Estos sistemas se posicionan como una estrategia de adaptación al cambio climático. (Agua.org.mx, 2017).

Figura 3
Distribución del agua en el mundo



Fuente: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

Colombia es un país con una gran riqueza hídrica, pero esa riqueza no llega a todos los habitantes, pues aunque es uno de los nueve territorios del mundo con mayores recursos de agua, un tercio de la población está afectada por estrés hídrico a raíz del cambio climático, la alta demanda por el aumento del desarrollo industrial, la contaminación de fuentes de agua por desechos industriales, agrícolas (fertilizantes y pesticidas), sumado a los residuos domésticos que es un problema creciente, lo que afecta la calidad del agua disponible para consumo y uso. Según el Word Bank Group en el informe titulado “Un cambio de rumbo” (World Bank Group, 2022), la disponibilidad de agua ha venido disminuyendo durante las últimas dos décadas, desde sequías extremas hasta inundaciones graves, y Colombia ya está presentando síntomas de inseguridad hídrica en todo el territorio, lo que se refleja problemas de “exceso, escasez y contaminación” del agua. Adicional a esto y de acuerdo con Naciones Unidas, miles de millones de personas siguen sin tener acceso a ella, ya que se calcula que más de 800.000 personas mueren cada año por

enfermedades atribuidas directamente al agua no apta para el consumo, un saneamiento inadecuado y prácticas de higiene deficientes. (ONU, 2025).

Definiciones:

Agua Potable

Según el Decreto 1575 de 2007, el agua potable es aquella que cumple con las características físicas, químicas y microbiológicas establecidas por la normativa vigente, y que puede ser consumida por la población sin producir efectos adversos a la salud. Se utiliza para bebida directa, preparación de alimentos e higiene personal. La calidad del agua potable se garantiza mediante procesos de tratamiento, análisis y vigilancia, realizados por las autoridades sanitarias y las empresas prestadoras del servicio de acueducto. (Minsalud, 2022).

Demanda hídrica

En el contexto de la hidrología, se entiende como la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas, desde el punto de vista económico, y para el uso doméstico. También se entiende a partir de la competencia por el uso que hacen los sectores y, por lo tanto, se asume como la no disponibilidad de agua para otras actividades antrópicas y los ecosistemas en un territorio y por un periodo de tiempo. (IDEAM, 2019).

Demanda hídrica actual y potencial

Consiste en los volúmenes de agua requeridos para satisfacer las necesidades actuales desde el punto de vista económico, productivo y para el uso doméstico. Son los requerimientos mínimos de volúmenes de agua, proyectados de acuerdo con la concentración y crecimiento de la población. (IDEAM, 2019).

Huella Hídrica

Es un concepto que permite determinar los impactos de un proceso antrópico sobre el agua, respecto a la cantidad o la calidad, para lo cual se definen tres componentes: las huellas hídricas verde, azul y gris. Los dos primeros se relacionan con el impacto en la cantidad de agua y la huella hídrica gris se relaciona con el impacto sobre la calidad del agua. Se define como el agua que

responde exclusivamente al requerimiento hídrico consuntivo del proceso productivo, por lo que es una parte del agua extraída y tras el proceso antrópico no retorna a la cuenca. (IDEAM, 2019).

Oferta Hídrica

Es el Volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS), el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento de los ecosistemas y de los sistemas fluviales y, en alguna medida, un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas, es decir, el caudal ambiental. (IDEAM, 2019).

Oferta Hídrica Total Superficial

Corresponde al volumen de agua por unidad de tiempo que escurre por la superficie del suelo, que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos de una unidad hidrográfica (área, zona y subzona) (IDEAM, 2019). Los usos pueden ser para consumo humano y doméstico, sectores económicos, ecosistemas y el sostenimiento de los sistemas hídricos superficiales. Se expresa en términos de la variable escurrentía. (IDEAM, 2019).

ICA

El Índice de calidad del agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t . (IDEAM, 2019).

IRCA

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo humano es un indicador compuesto que permite evaluar el grado de riesgo sanitario asociado al consumo de agua, según el cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas establecidas en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007. Este índice clasifica el agua en rangos de riesgo que determinan si es apta o no para el consumo humano. Es utilizado por las autoridades

sanitarias para vigilar la calidad del agua en sistemas de abastecimiento urbanos y rurales, y forma parte del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Agua Potable. (Minsalud, 2022).

Índice de Uso del Agua (IUA)

Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espacio. (IDEAM, 2019).

Sequía hidrológica (déficit hídrico)

Período de tiempo anormalmente seco, lo suficientemente prolongado para ocasionar una escasez de agua, que se refleja en una disminución apreciable en el caudal de los ríos y en el nivel de los lagos y/o en el agotamiento de la humedad del suelo y el descenso de los niveles de aguas subterráneas por debajo de sus valores normales. (IDEAM, 2019).

Sistema de aprovechamiento de aguas lluvias: Conjunto de componentes diseñados para captar, almacenar, distribuir y, en algunos casos, tratar el agua lluvia, incluyen canaletas, filtros, tanques de almacenamiento, sistemas de distribución y mecanismos de control de calidad. Según el Ministerio de Ambiente estos sistemas forman parte de una estrategia de gestión integral del recurso hídrico (GIRH), orientada al uso eficiente, equitativo y sostenible del agua, la implementación contribuye a reducir la presión sobre fuentes convencionales, mitigar riesgos climáticos y fortalecer la seguridad hídrica territorial. (Minambiente, 2025)

Captación: Proceso mediante el cual se recoge el agua de lluvia que cae sobre superficies impermeables, como techos, y se dirige hacia un sistema de almacenamiento. En el marco de la gestión hídrica, la captación representa el primer paso para integrar el agua lluvia al ciclo de uso humano, promoviendo la conservación de fuentes naturales y la resiliencia frente a eventos extremos como sequías o inundaciones. (FAO, 2013).

Almacenamiento: Proceso de conservar el agua recogida en tanques, cisternas o reservorios para su uso posterior. Este componente es clave en la planificación hídrica, ya que

permite regular la disponibilidad del recurso en función de la demanda, garantizando su uso racional y sostenible. El almacenamiento debe considerar criterios de calidad, seguridad y capacidad según el contexto territorial. (FAO, 2013).

Distribución: Proceso de transportar y entregar el agua desde el punto de captación o almacenamiento a los usuarios finales. En la gestión hídrica, la distribución debe ser equitativa, eficiente y adaptada a las necesidades locales, considerando aspectos técnicos, sociales y ambientales. Un sistema bien diseñado permite optimizar el uso del recurso, reducir pérdidas y asegurar el acceso justo al agua. (FAO, 2013).

Marco normativo

El marco normativo vigente en Colombia en relación con el agua o recurso hídrico para el uso, aprovechamiento y como derecho humano fundamental:

- La Constitución Política de Colombia de 1991, reconoce el agua como un recurso vital, establece el derecho al acceso al agua y la responsabilidad del Estado en la gestión sostenible. (Función Pública , 1991)
- El Código Nacional de Recursos Naturales en el Decreto 2811 de 1974, regula el uso y conservación de los recursos hídricos, estableciendo principios para su manejo de los recursos naturales renovables. (Función Pública, 1974)
- La Ley 99 de 1993, crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece la política general para la gestión de los recursos naturales renovables, incluidos los recursos hídricos. (Función Pública, 1993)
- El Decreto 1076 de 2015, compila y actualiza toda la normatividad ambiental, incluyendo recurso hídrico. (Función Pública, 2015).
- El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, incluye está compuesto por cinco grandes transformaciones o metas, entre ellas el ordenamiento del territorio alrededor del agua. (Departamento Nacional de Planeación, 2022-2026).

- Resolución 0076 de 2021 que adopta el Plan Nacional de suministro de agua potable y saneamiento Básico rural y se dictan otras disposiciones. (Minvivienda, 2021)

A nivel mundial, existen diversos lineamientos y principios que guían la gestión y uso sostenible del agua y justicia ambiental:

- Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular, el ODS 6 busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, incluye metas como la mejora de la calidad del agua, la gestión de recursos hídricos y el aumento de la cobertura de agua potable. (ODS, 2015)
- La Declaratoria de la Organización de las Naciones Unidas, reconoce el agua como un recurso esencial para la vida y el desarrollo humano, abogando por una gestión integrada y sostenible. (ONU, 2018)
- Las Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), proporciona recomendaciones sobre la calidad del agua potable y las prácticas de saneamiento, enfocándose en la salud pública. (OMS, 2023)

Descripción del entorno

Entorno Económico

En diferentes zonas rurales de San Pedro de los Milagros, el acueducto veredal está conformado por empresas que no están formalizadas ni reguladas por las autoridades competentes, operan con infraestructura precaria y suelen presentar constantes intermitencias, interrupciones y fluctuaciones en el suministro del recurso hídrico, debido a fallas en la infraestructura, fugas, y problemas de mantenimiento. Esta problemática genera varias implicaciones económicas como, por ejemplo, el aumento del gasto por la compra o abastecimiento de otras fuentes (botellones de agua, cisternas, entre otras), y afectaciones en la productividad ganadera, agrícola y otras actividades económicas por el desabastecimiento del agua y que dependen en grandes medidas de este recurso.

Los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias es una oportunidad para reducir los costos tanto para el uso humano como para las actividades económicas, reducir la dependencia del acueducto veredal y generar una autonomía de manera sostenible. También genera empleo local relacionado con la instalación, operación, mantenimiento del sistema, lo cual beneficia a la economía local.

En cuanto a la inversión, existen financiamiento de fondos internacionales, ONGs o cooperación internacional destinados a proyectos ambientales y de infraestructura sostenible, lo cual puede facilitar la obtención de recursos para la implementación del sistema.

Entorno Social

Socialmente, existe un sentimiento de vulnerabilidad en la comunidad de la vereda, especialmente cuando las interrupciones en el servicio de agua son prolongadas, lo que genera desigualdad social, ya que uno de los servicios básicos esenciales como el agua no se obtiene de manera equitativa ni confiable. Esta situación se agrava por la baja calidad del agua suministrada, que, según el Plan de Desarrollo Territorial 2024-2027 de San Pedro de los Milagros, presenta un alto riesgo según el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), indicando que no es apta para el consumo humano. Esta calidad deficiente contribuye a problemas de salud pública, como

enfermedades gastrointestinales y otras afecciones relacionadas con el consumo de agua contaminada, afectando especialmente a poblaciones vulnerables como niños y ancianos.

Adicional a esta situación, se ha generado un creciente descontento entre los habitantes, no solo por la intermitencia e irregularidades en la prestación del servicio, sino también por el mal manejo de los recursos económicos del acueducto veredal. El recaudo en efectivo, sin mecanismos de control ni transparencia, ha facilitado el desvío o hurto de dineros, lo que ha deteriorado la confianza de la comunidad en la administración del sistema. Como consecuencia, muchas personas optan por no pagar la cuota mensual del servicio, lo que repercute directamente en la sostenibilidad financiera del acueducto y en su capacidad para operar, mantener y mejorar la infraestructura existente.

En este contexto, la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias representa una solución que no solo fortalece la autonomía hídrica de las viviendas, sino que también promueve la participación activa, la cooperación social y la reconstrucción de la confianza comunitaria en torno a la gestión del recurso hídrico.

Entorno Ambiental

Ambientalmente, la dependencia de un acueducto veredal informal tiene consecuencias negativas. La extracción no controlada de fuentes hídricas naturales como nacimientos, ríos y quebradas, sin una planificación adecuada ni monitoreo ambiental, altera el equilibrio ecológico de los ecosistemas locales. Esta presión sobre las fuentes de agua se ve agravada por la falta de infraestructura técnica y operativa, lo que genera fugas, pérdidas y desperdicio del recurso hídrico, especialmente en contextos donde el servicio es intermitente y no logra suplir la demanda de la comunidad.

Además, el mal manejo de los recursos económicos destinados al mantenimiento del sistema, sumado a la informalidad en la administración, impide la implementación de mejoras que podrían reducir el impacto ambiental y aumentar la eficiencia del acueducto. Esta situación no solo compromete la sostenibilidad del acueducto, sino que incrementa la presión sobre las fuentes naturales, muchas veces sobreexplotadas para compensar las deficiencias del servicio.

De esta manera, los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias representan una alternativa ambientalmente sostenible que contribuyen a la conservación del recurso hídrico,

reducen la huella hídrica de las viviendas rurales, mitigan los efectos del cambio climático y disminuyen la presión sobre las fuentes de agua potable. Además, favorecen la sostenibilidad de los ecosistemas hídricos locales y apoyan el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, relacionado con el acceso universal y equitativo al agua potable y la gestión sostenible.

Entorno Político

Las regulaciones y políticas públicas a nivel nacional, regional y local relacionadas con la gestión del recurso hídrico no siempre se implementan de manera efectiva. El acueducto veredal informal refleja la falta de formalización y la inadecuada regulación del uso de agua en muchas áreas rurales, lo que implica que no se le asigne un presupuesto adecuado para la operación, mantenimiento y renovación, ni se someta a regulaciones estrictas de calidad y acceso al agua potable.

En el caso del acueducto veredal Zancudito – Zafra, uno de los principales problemas identificados es el manejo informal del recaudo, que se realiza en efectivo y sin mecanismos de control contable, lo que ha facilitado el hurto de recursos y una administración interna deficiente. Esta situación ha generado desconfianza en la comunidad y ha limitado la capacidad del sistema para sostenerse y mejorar su infraestructura.

Algunos programas gubernamentales brindan incentivos, como subsidios o créditos para la instalación de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, siendo fundamentales para reducir la dependencia de fuentes externas como el acueducto veredal. Sin embargo, en ocasiones los cambios en las políticas públicas afectan estos desarrollos, ya que existen casos donde no prima el bien común sino intereses particulares, desviando la atención hacia otros proyectos.

El fortalecimiento y la estabilidad de políticas públicas sobre la gestión eficiente del recurso hídrico podrían contribuir a mejorar la integración de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia con el resto de las infraestructuras hidráulicas de las zonas rurales, promoviendo así la sostenibilidad, la equidad en el acceso y la transparencia en el manejo de los recursos.

Entorno Tecnológico

A nivel tecnológico, el acueducto veredal presenta una evidente falta de infraestructura moderna, lo que limita la capacidad para garantizar un suministro continuo y seguro del recurso

hídrico. La carencia de herramientas para el control del flujo, la calidad del agua, la detección de fallas y la disponibilidad del servicio contribuye directamente a las interrupciones e intermitencias que afectan a la comunidad, además, no se cuenta con sistemas de purificación adecuados que aseguren que el agua llegue potable a las viviendas, lo que representa un riesgo para la salud pública, especialmente en zonas rurales donde el monitoreo sanitario es limitado.

El manejo informal de los recursos económicos también ha impedido la inversión en tecnologías básicas como medidores, sensores de presión, sistemas de cloración automatizados o estaciones de monitoreo de calidad del agua. Esta situación refleja una brecha tecnológica que limita la eficiencia operativa del acueducto y la capacidad de respuesta ante fallas o emergencias. En este sentido, los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias ofrecen una oportunidad para incorporar soluciones tecnológicas avanzadas que aseguren la potabilidad del agua recolectada, optimicen el uso y permitan el monitoreo y control del sistema.

Tecnologías como filtros de carbón activado, sistemas de desinfección UV, sensores de nivel, medidores de caudal y plataformas digitales de gestión pueden ser implementadas incluso en contextos rurales, favoreciendo la eficiencia, la sostenibilidad y la autonomía hídrica de las viviendas, estas innovaciones no solo mejoran la calidad del agua, sino que también fortalecen la resiliencia comunitaria frente a la escasez y el cambio climático.

Entorno Sectorial

El sector agropecuario en el municipio de San Pedro de los Milagros representa una de las principales actividades económicas de la región, pero también es altamente vulnerable a las interrupciones e intermitencias en el suministro de agua. La dependencia del acueducto veredal informal, que presenta deficiencias en infraestructura, manejo administrativo y capacidad de distribución, afecta directamente la productividad agrícola y ganadera, especialmente en épocas de escasez o variabilidad climática.

De esta manera los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias permiten asegurar un suministro constante de agua para riego y otras actividades productivas, reduciendo la dependencia exclusiva del acueducto veredal. Además, brindan flexibilidad a los agricultores para almacenar y utilizar el agua de lluvia durante los picos de escasez, mejorando la capacidad de adaptación frente a las variaciones climáticas y fortaleciendo la resiliencia del sector agropecuario, la

implementación de estas soluciones también puede contribuir a la diversificación productiva y al desarrollo rural sostenible.

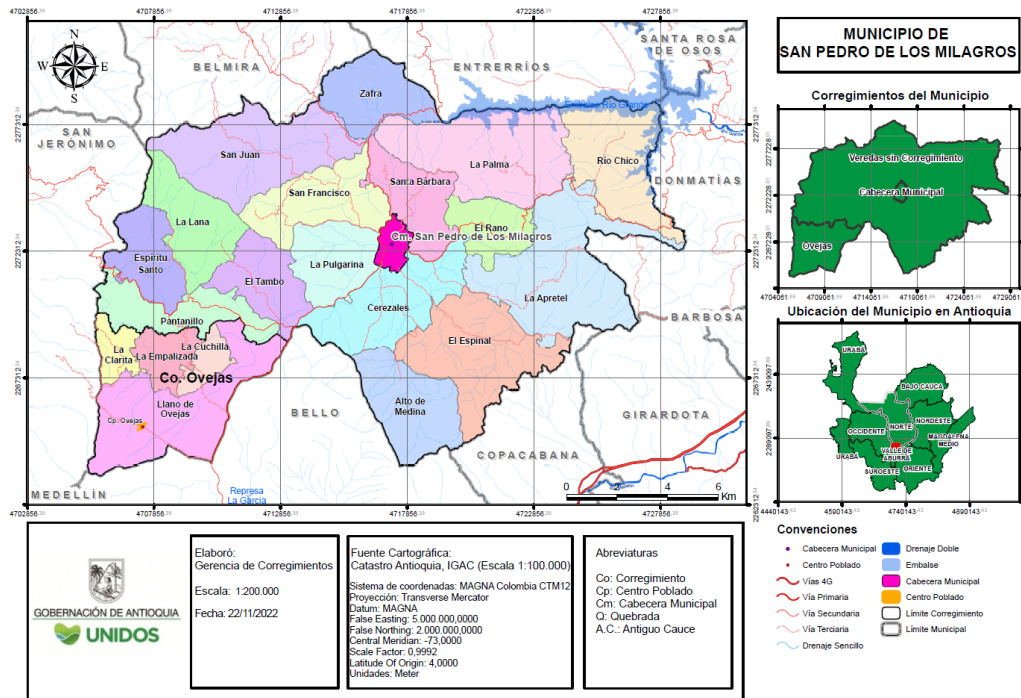
Estudio de mercado

Caracterización de la población beneficiaria

El Municipio San Pedro de Los Milagros es llamado “La Puerta Cultural del Norte”, “La Sixtina de Antioquia” y “Ciudad láctea”, está ubicado a 42 Km de la ciudad de Medellín y pertenece a la región norte del departamento de Antioquia, limita por el norte con los municipios de Belmira y Entreríos, por el oriente con Don Matías, al sur con Girardota, Copacabana y Bello y al occidente con el municipio de San Jerónimo, cuenta con 23.409 habitantes según proyección DANE postcovid 2023. (Gobernación de Antioquia, s.f.).

Figura 4

Mapa de veredas y corregimiento del municipio de San Pedro de los Milagros



Fuente <https://corregimientos.antioquia.gov.co/san-pedro-de-los-milagros/>

La vereda Zafra pertenece al municipio de San Pedro de los Milagros (Antioquia), un territorio rural con vocación agrícola y ganadera, donde la población beneficiaria en general se compone de hogares campesinos dedicados principalmente a la producción lechera y a los cultivos de pequeña escala como papa, aguacate, entre otros (Administración Municipal San Pedro de los Milagros, s.f.).

La vivienda rural objeto del estudio se encuentra en esta vereda y está habitada por una familia promedio de cuatro personas, lo que representa el perfil típico de los hogares rurales de la región. En este caso, se trata de una vivienda no productiva, es decir, el uso del agua está destinado exclusivamente a fines domésticos: consumo humano, preparación de alimentos, aseo personal, lavado de ropa y utensilios.

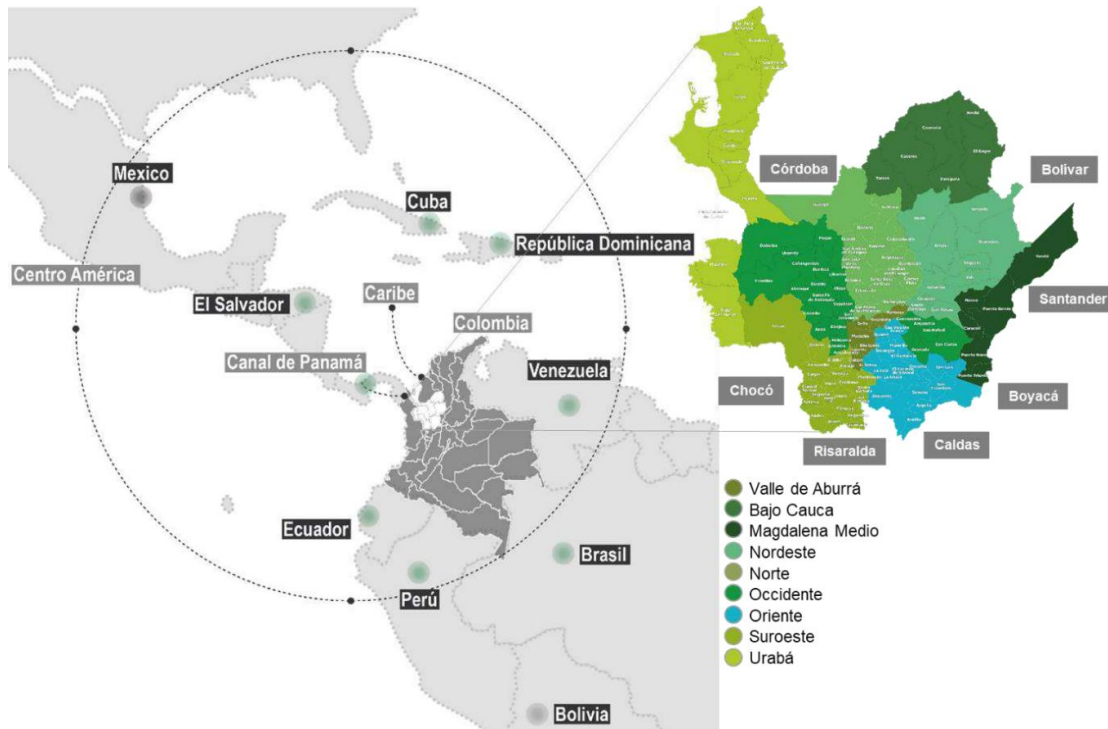
Actualmente, el acueducto veredal ASUAZA es la empresa que abastece el servicio de acueducto en la vereda de estudio en condiciones normales, sin embargo, debido a las interrupciones constantes y la baja capacidad de respuesta, la oferta actual no logra suplir la demanda real, generando una brecha hídrica que afecta directamente la calidad de vida de los habitantes.

Análisis de la demanda

El Departamento de Antioquia se encuentra en las regiones Andina y Caribe de Colombia y es conocido por su gran riqueza natural y cultural. Geográficamente, está ubicado en el noroccidente del país, está delimitado al noreste con el Mar Caribe (Golfo de Urabá), al norte con el departamento de Córdoba (Parque Nacional Natural Paramillo), al Nordeste con el departamento de Bolívar (Serranía de San Lucas, Río Tamar), al Oeste con el departamento de Chocó (Río Atrato), al Este con el departamento de Santander (Río Magdalena), al Suroeste con los departamentos de Chocó y Risaralda, al Sur con el departamento de Caldas (Ríos Arquía, Arma y Samaná Sur) y al Sureste con el departamento de Boyacá (Río Magdalena). (Gobernación de Antioquia, s.f.)

Figura 5

Localización, límites y subregiones del departamento de Antioquia



Nota. Fuente <https://antioquia.gov.co>

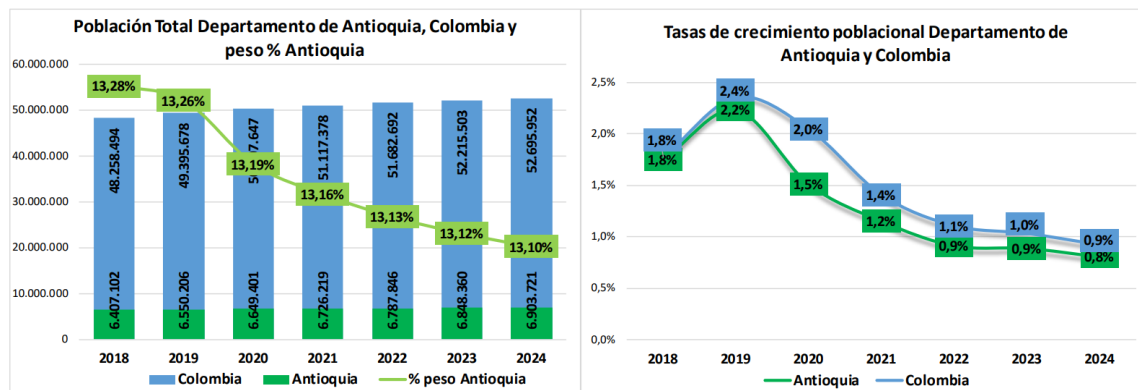
Cerca del 85% del territorio está conformado por un área extensa de montañas, que hacen parte de las cordilleras Central y Occidental. Según datos del IDEAM, en el año 2017, el 47.7% del área en Antioquia corresponde a agroecosistemas, el 38.8% corresponde a ecosistemas naturales terrestres, el 13.2% a ecosistemas acuáticos y 0.25% a ecosistemas costeros. El departamento cuenta con una gran riqueza fluvial, cruzan hacia el norte los tres ríos más importantes del país: el Magdalena, el Cauca y el Atrato. (GEOGEEKS, s.f.).

Según el DANE, la población estimada del Departamento de Antioquia para el año 2024 alcanza los 6.903.721, entre los años 2018 al 2024, e indican una leve disminución de la participación de la población Antioqueña en el total nacional, estimado en el 1,2%, al pasar del 13,28% en el año 2018 al 13,1% en el año 2024. Las tasas de crecimiento poblacional del

Departamento al igual que las nacionales presentan una clara tendencia a disminuir a partir del año 2019 siendo levemente inferiores para el territorio Antioqueño (Gobernación de Antioquia, s.f.).

Figura 6

Población total departamento de Antioquia

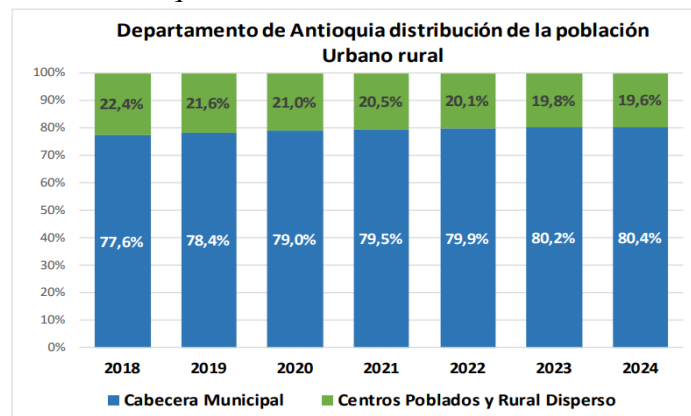


Fuente <https://antioquia.gov.co/images/PDF2/Transparencia/2025/02/version-final-ig-asamblea-25-02-2024-.pdf>

La población del Departamento se caracteriza en los últimos 6 años por ubicarse principalmente en las zonas urbanas, representando para el 2024 el 80,4% de la población Antioqueña, adicionalmente se aprecia una clara tendencia que concentra la población en dicha zona.

Figura 7

Distribución poblacional en Antioquia



Fuente <https://antioquia.gov.co/images/PDF2/Transparencia/2025/02/version-final-ig-asamblea-25-02-2024-.pdf>

la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho de todos los seres humanos a tener acceso a una cantidad de agua suficiente para el uso doméstico y personal, entre 50 y 100 litros de agua al día por persona, de manera segura, aceptable y asequible, para satisfacer

las necesidades de consumo e higiene, esto incluye beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar. (Agua ONU, 2010).

De tal manera que la demanda per cápita de agua, es decir, la cantidad promedio de agua que necesita una persona al día para cubrir las necesidades básicas, es de 75 litros, lo que representa un punto medio entre el mínimo y el máximo reconocido por la ONU.

Teniendo en cuenta dicha información, se proyecta la demanda requerida en la vivienda:

- **Para 4 personas:** $75 \text{ litros} \times 4 = 300 \text{ litros/día}$
- **Mensual (30 días):** $300 \text{ litros/día} \times 30 \text{ días} = 9.000 \text{ litros/mes}$
- **Anual (365 días):** $300 \text{ litros/día} \times 365 \text{ días} = 109.500 \text{ litros/año}$

Oferta hídrica del Acueducto

La oferta de agua en la vereda Zafra está suministrada por el acueducto veredal Zafra. Debido a la problemática que presenta, este no logra satisfacer la demanda promedio estimada para una familia de 4 personas, y en general a toda la vereda, pues se considera una intermitencia nocturna diaria desde las 21:00 a 05:00 y algunas interrupciones adicionales de 2 días aproximadamente a la semana por 2 horas.

Se calcula la disponibilidad del servicio, oferta entregada y déficit del acueducto:

Datos generales:

- **Viviendas en la vereda:** 120 viviendas
- **Personas por vivienda:** 4 personas
- **Total de personas en la vereda:** 480 personas

Demanda:

- **Demanda diaria por vivienda:** $4 \text{ personas} \times 75 \text{ litros/día} = 300 \text{ litros/día}$
- **Demanda mensual por vivienda:** $30 \text{ días} \times 300 \text{ litros/día} = 9.000 \text{ litros/mes}$
- **Demanda anual por vivienda:** $365 \text{ días} \times 300 \text{ litros/día} = 109.500 \text{ litros/año}$

- **Demanda diaria en la vereda:** $480 \text{ personas/vereda} \times 75 \text{ litros/día persona} = 36.000 \text{ litros/día}$
- **Demanda mensual en la vereda:** $30 \text{ días} \times 36.000 \text{ litros/día} = 1.080.000 \text{ litros/mes}$
- **Demanda anual en la vereda:** $365 \text{ días} \times 36.000 \text{ litros/día} = 13.140.000 \text{ litros/año}$

Disponibilidad (D) del servicio:

- **Con interrupción diaria:** 21:00 a 05:00 (8 horas/día)
Servicio base: 24 horas/día con servicio
Disponibilidad: $24 \text{ horas/día} - 8 \text{ horas/día} = 16 \text{ horas/día}$
 $16 \text{ horas/día} / 24 \text{ horas/día} = 0.6667 \rightarrow 66.67\%$
- **Con interrupciones adicionales:** 2 días/semana por 2 horas/día
Disponibilidad: $\text{Horas extra/semana} = 2 \text{ horas} \times 2 \text{ días} = 4 \text{ horas/día}$
 $4 \text{ horas/día} / 7 \text{ días} = 0.57 \text{ horas/día} / 24 \text{ horas} = 0.024 \rightarrow 2.38\%$
- **Disponibilidad total:** $66.67\% - 2.38\% = 64.29\%$

Oferta entregada:

- $\text{Oferta entregada} = \text{Demanda} \times D$

Oferta diaria en la vereda: $36.000 \text{ litros/día} \times 64.29\% = 23.144 \text{ litros/día}$

Oferta mensual en la vereda: $23.144 \text{ litros/día} \times 30 \text{ días} = 694.332 \text{ litros/mes}$

Oferta anual en la vereda: $23.144 \text{ litros/día} \times 365 \text{ días} = 8.447.560 \text{ litros/año}$

Oferta diaria en la vivienda: $300 \text{ litros/día} \times 64.29\% = 192.87 \text{ litros/día}$

Oferta mensual en la vivienda: $192.87 \text{ litros/día} \times 30 \text{ días} = 5.786 \text{ litros/mes}$

Oferta anual en la vivienda: $192.87 \text{ litros/día} \times 365 \text{ días} = 70.397,55 \text{ litros/año}$

Déficit de la Oferta

- $\text{Déficit diario} = \text{Demanda} - \text{Oferta}$

Déficit diario en la vereda: $36.000 \text{ litros/día} - 23.144 \text{ litros/día} = 12.857 \text{ litros/día}$

Déficit mensual en la vereda: $30 \text{ días} \times 12.857 \text{ litros/día} = 385.710 \text{ litros/mes}$

Déficit anual en la vereda: $365 \text{ días} \times 12.857 \text{ litros/día} \times 30 \text{ días} = 385.710 \text{ litros/mes}$

Déficit diario en la vivienda: $300 \text{ litros/día} - 192.87 \text{ litros/día} = 107,13 \text{ litros/día}$

Déficit mensual en la vivienda: $30 \text{ días} \times 107,13 \text{ litros/día} = 3.214 \text{ litros/mes}$

Déficit anual en la vivienda: $365 \text{ días} \times 107,13 \text{ litros/día} = 39.102,45 \text{ litros/año}$

- **Déficit total:** $100\% - 64.29\% = 35.71\%$

El acueducto veredal solo cubre el 64.29% de la demanda hídrica, dejando un déficit importante a nivel veredal de 12,857 litros/día, y en la vivienda de estudio de 107.13 litros/día. Esto equivale a una carencia o déficit de aproximadamente el 36% de la demanda diaria, lo que refuerza la problemática de intermitencia y la incapacidad del acueducto para satisfacer las necesidades básicas de la vivienda y la comunidad. De tal manera que el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias complementa la demanda requerida en la vivienda.

Las tarifas de los acueductos veredales en Colombia se rigen por la Resolución CRA 825 de 2017 de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, compilada en la Resolución CRA 943 de 2021 y que establece fórmulas para costos medios operativos, costo medio de inversión y tasas ambientales. Con ajustes anuales por inflación, para el año 2025 el costo promedio es 5,5 COP por litro, equivalente a 5.500 COP por m³ (CRA, 2017). Para prestadores rurales con menos de 2.500 suscriptores como el acueducto veredal ASUAZA, con 120 viviendas en la vereda Zafra, se aplica la Guía CRA N° 2 Costos y Tarifas para Municipios Menores y Zonas Rurales, la cual presenta subsidios hasta del 68% para áreas rurales dispersas (CRA, 2017). Estos subsidios se financian con presupuestos municipales, aportes solidarios de estratos altos y recursos del Sistema General de Participaciones, priorizando estratos residenciales rurales 1 y 2.

Bajo este contexto de tarifas del sector rural, el precio de venta del excedente hídrico del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias de 30 COP por litro es una valoración realista que equilibra la accesibilidad comunitaria en la vereda con el valor agregado de un recurso captado y distribuido localmente, en un contexto donde el acueducto veredal enfrenta intermitencias e interrupciones, lo que genera dependencia de fuentes informales costosas.

Oferta hídrica del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

La precipitación promedio anual en el Municipio de San Pedro de los Milagros es de 2.923 mm, con lluvias que se distribuye homogéneamente a lo largo del año, esto asegura que la captación de agua lluvia sea una opción viable durante todo el año.

Figura 8

Tabla climática del tiempo

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	14.1	14.3	14.4	14.4	14.5	14.3	14.3	14.5	14.3	14	13.9	14
Temperatura mín. (°C)	10.2	10.4	10.6	11	11.1	10.4	9.9	10	10.3	10.8	11	10.6
Temperatura máx. (°C)	19.1	19.5	19.5	19.4	19.4	19.6	20	20.4	19.9	18.8	18.4	18.7
Precipitación (mm)	121	170	310	417	365	164	120	141	233	351	335	196
Humedad(%)	81%	81%	85%	88%	87%	83%	80%	79%	83%	88%	89%	86%
Días lluviosos (días)	15	16	20	19	19	15	13	13	16	20	20	16
Horas de sol (horas)	6.2	6.1	6.0	6.1	6.6	8.1	8.6	8.4	7.3	5.7	5.0	5.6

Fuente <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/colombia/antioquia/san-pedro-50310/>

- **Área de techo disponible:** 50 m²
- **Eficiencia del sistema:** se considera el 85% por pérdidas, evaporación, suciedad, entre otros.
- **Precipitación anual en San Pedro de los Milagros:** 2.923 mm

Cálculo:

- **Volumen anual** captado del sistema:
50 m² x 2.923 mm x 85% = 124.277 litros/año
- **Volumen mensual** captado del sistema:
2.923 mm / 12 meses = 243.58 mm/mes
50 m² x 243.58 mm x 85% = 10.352 litros/mes
- **Volumen diario** captado del sistema:
10.352 litros/mes / 30 días = 345.07 litros/día

Tabla 4

Resumen Oferta vs Demanda

Concepto	Diario (litros)	Mensual (litros)	Anual (litros)
Demanda × vivienda (4 personas × 75 litros/día)	300,00	9.000,00	109.500,00
Oferta acueducto veredal (Disponibilidad del 64.29%)	192,87	5.786,10	70.397,55
Déficit del acueducto (Demanda - Oferta)	107,13	3.213,90	39.102,45
Oferta del SAALL (50 m ² , 2,923 mm/año, 85% eficiencia)	345,07	10.352,15	124.227,50
Excedente del sistema (Oferta sistema - Déficit)	237,94	7.138,25	85.125,05

Basado en el análisis de la demanda hídrica de la vivienda de estudio de 300 litros/día y en general de la vereda, frente a la oferta del acueducto veredal de 192,87 litros/día por vivienda, se identifica un déficit aproximado del 36%, lo que equivale a 107,13 litros/día por vivienda. El

sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, con una oferta de 345,07 litros/día, no solo cubre completamente este déficit, sino que genera un excedente de 237,94 litros/día. Este excedente permite abastecer parcialmente el déficit de aproximadamente unas 2.22 viviendas y generar ingresos mediante la venta del recurso hídrico, promoviendo la sostenibilidad económica y la autonomía hídrica.

Mercado Objetivo

El mercado objetivo son principalmente los residentes rurales de la vereda Zafra, con una población estimada de 480 personas en la vereda, conformada por 120 viviendas con un promedio de 4 personas por hogar. Predominan familias de estratos 1 y 2, con ingresos mensuales promedio de 1 a 2 millones, dedicadas al sector agropecuario en actividades como agricultura y ganadería, que representan el 60-70% en edades entre 25 a 60 años, con alta vulnerabilidad a la escasez hídrica, especialmente mujeres y niños que gestionan el agua doméstica.

Competidores directos e indirectos

Los competidores directos del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias son el acueducto Veredal ASUAZA y el Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P. – AAS.

ASUAZA, o Acueducto Veredal Zancudito-Zafra, es una asociación comunitaria informal que suministra agua potable en varias veredas del municipio de San Pedro de los Milagros, incluyendo Zafra. Esta asociación surgió como respuesta a la falta de cobertura de acueductos municipales en zonas dispersas, captando agua de quebradas locales como La Empalizada y El Espantadero, que nacen en la Cordillera de Ovejas y confluyen al Río Aurrá. Esta fuente natural es compartida con otros acueductos veredales cercanos, como los de La Cuchilla y El Llano de Ovejas. Formalmente, ASUAZA opera bajo el modelo de asociaciones de usuarios, pero la informalidad limita la eficiencia, además tiene un enfoque en captación superficial de quebradas y distribución por gravedad o bombeo básico. (Administración Municipal San Pedro de los Milagros, s.f.).

Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P. – AAS es una empresa privada especializada en operación, administración y mantenimiento de sistemas de acueducto y

alcantarillado que surgió tras la liquidación de Acuantioquia E.S.P. El enfoque ha evolucionado de operación pública a servicios integrales (construcción, consultoría, diseño e interventoría). Opera directamente el acueducto municipal de San Pedro de los Milagros en la zona urbana y algunas zonas rurales. Su infraestructura incluye redes de tuberías reforzadas, plantas de tratamiento de concreto, tanques de almacenamiento y sistemas de cloración y opera con estándares de calidad CRA (Comisión de Regulación de Agua Potable).

Los competidores indirectos son los vendedores informales de agua por medio de Cisternas o Botellones, que operan desde hace décadas en las zonas rurales, que surgieron por déficits en los acueductos, donde transportan agua en cisternas o botellones de fuentes superficiales o municipales, vendiendo a granel a bajo costo. Sin embargo, esta alternativa presenta diferentes debilidades como por ejemplo riesgos sanitarios y ambientales

Estudio Técnico

Localización y tamaño óptimo

El método de localización es del factor preferencial no cuantificable debido a que actualmente está construida la vivienda en la vereda zafra de este municipio de Antioquia y enfrenta la problemática mencionada. Adicional, se encuentra ubicada en una región con un alto potencial de recolección de agua de lluvia debido a las precipitaciones constantes, el clima y la disponibilidad de agua.

Figura 9

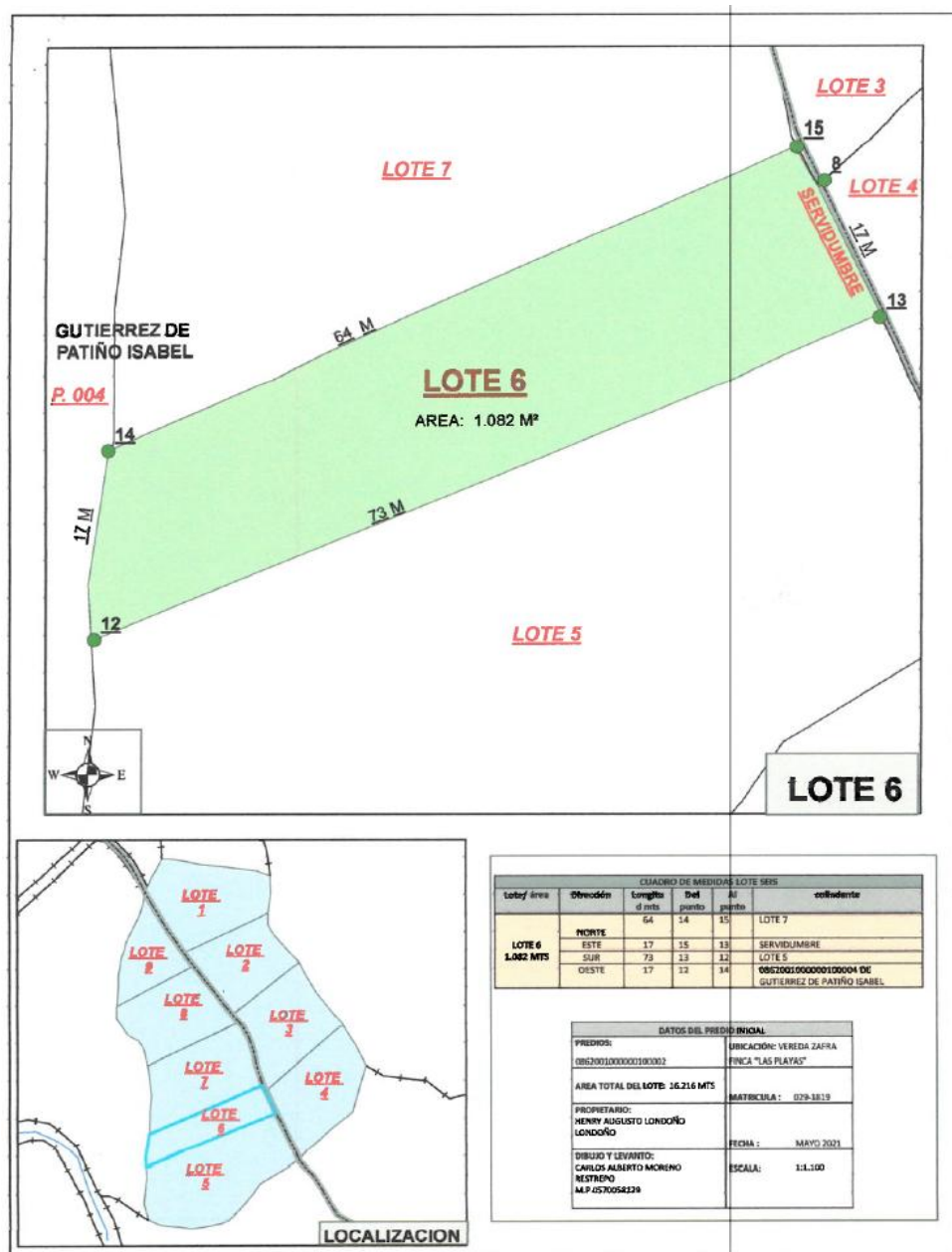
Mapa localización vivienda rural en la vereda Zafra



Fuente Google Earth Pro

En la siguiente figura se detallan los diferentes lotes y en consecuencia las viviendas rurales de la parcelación, la vivienda del estudio está ubicada en el lote 6 del lote de mayor extensión.

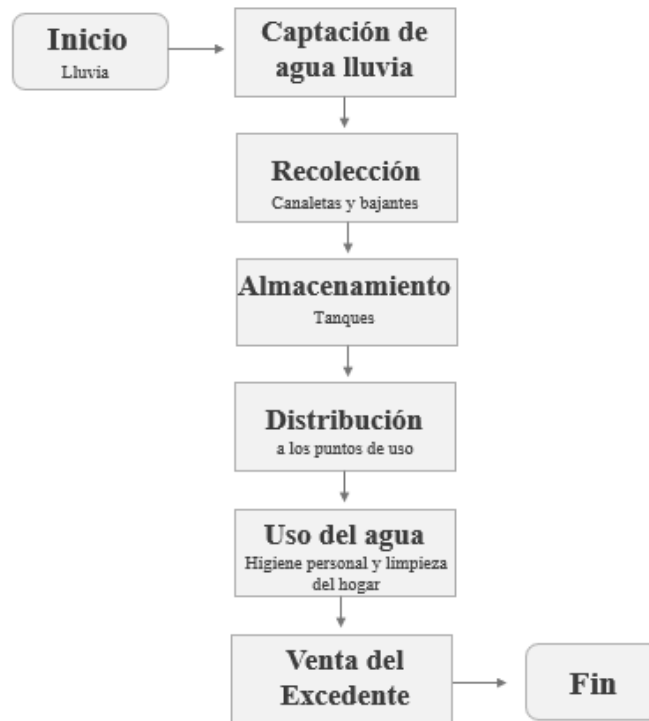
Figura 10
Localización del predio



Fuente Escritura pública

Este diagrama de proceso en bloques proporciona una visión clara de cómo fluye el agua a través del sistema de aprovechamiento, desde la captación en el techo hasta el almacenamiento, distribución y venta del excedente. El sistema está diseñado para ser eficiente en la captación y distribución de agua, y asegurar la gestión adecuada de los excedentes.

Figura 11
Diagrama de procesos en bloques



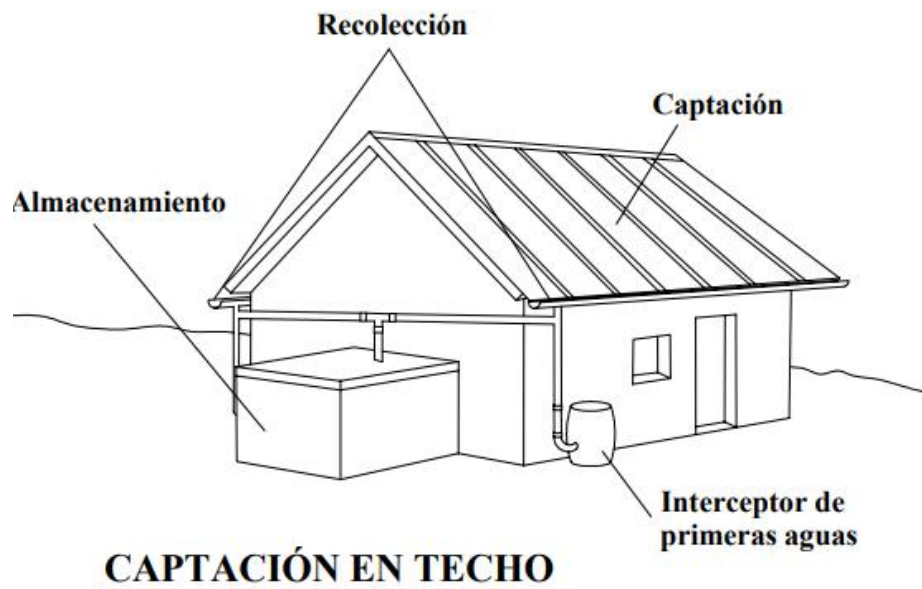
Fuente Elaboración propia con fuentes de información secundaria

Descripción del Sistema

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias es una solución diseñada para captar, almacenar y distribuir el agua lluvia proveniente de las precipitaciones, este sistema tiene como objetivo ofrecer una fuente alternativa y sostenible del agua, principalmente para el uso doméstico.

Figura 12

Sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en techo



Nota. Fuente <https://sswm.info/>

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias se compone de varios elementos fundamentales que se integran para lograr la captación, recolección y conducción, interceptor y almacenamiento, para luego cumplir con la distribución del recurso hídrico:

Captación: La captación está conformada por el techo de la finca, que cuenta con una pendiente y superficie adecuada que facilita el escurrimiento del agua de lluvia hacia el sistema de recolección.

Recolección y Conducción: Está conformado por las canaletas que van adosadas en los bordes más bajos del techo, en donde el agua tiende a acumularse antes de caer al suelo.

Interceptor: Conocido también como dispositivo de descarga de las primeras aguas provenientes del lavado del techo y que contiene todos los materiales que en él se encuentren en el momento del inicio de la lluvia. Este dispositivo impide que el material indeseable ingrese al tanque de almacenamiento y de este modo minimizar la contaminación del agua almacenada. En el diseño del dispositivo se tiene en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo, que se estima en 1 litro por m² de techo.

Almacenamiento: Esta destinada a almacenar el volumen de agua de lluvia necesaria para el uso diario, en especial durante el período de lluvia. La unidad de almacenamiento debe ser duradera y cumplir con algunas especificaciones funcionales como: tanque impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración, con tapa para impedir el ingreso de polvo, insectos y de la luz solar, disponer de una escotilla con tapa sanitaria lo suficientemente grande como para que permita el ingreso de una persona para la limpieza y reparaciones necesarias.

Distribución: Es la etapa final del sistema y está encargada de llevar el agua almacenada desde el tanque hasta los puntos de uso dentro de la vivienda. El diseño debe garantizar un flujo eficiente, seguro y adecuado para los fines domésticos previstos. La distribución tendrá una tubería principal de salida del tanque de almacenamiento, de allí se despliega los trayectos por medio de ramales para diferentes puntos de consumo, por ejemplo, para cocina, baños, patio, entre otros.

Ingeniería del proyecto

La ingeniería del proyecto de aprovechamiento de aguas lluvias contempla el diseño y dimensionamiento del sistema autónomo para la captación, recolección, interceptor, almacenamiento y distribución del agua lluvia en la vivienda de estudio garantizando el acceso continuo al recurso hídrico.

Tabla 5
Ficha técnica

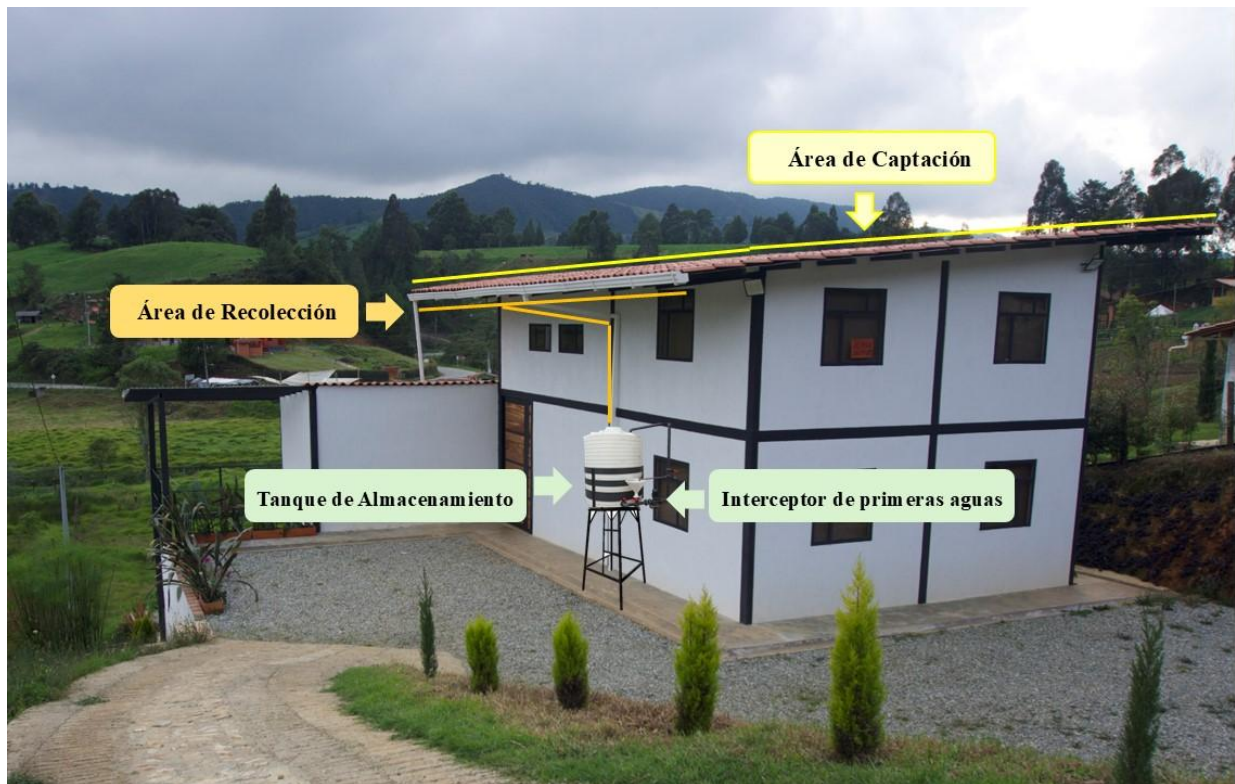
SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS		
Descripción del producto	Sistema autónomo diseñado para recolectar, almacenar y distribuir agua lluvia en viviendas rurales.	
Código CIU	CIU 3600 – Captación, tratamiento y distribución de agua.	
Componentes del Sistema	Superficie captadora	Techo de 50 m ² (teja de barro)
	Canaletas	PVC 6" – resistentes a rayos UV y corrosión
	Bajantes	PVC 2"-3" con codos y uniones herméticas
	Filtro de hojas	Malla metálica inoxidable
	Desviador de primeras lluvias	Capacidad para desviar 15-20 litros iniciales
	Tanque de almacenamiento	4.000 litros, polietileno con tapa hermética
	Filtro de sedimentos	Multietapa (arena, grava, carbón activado)
	Sistema de distribución	PVC ½" - 1", por gravedad
	Grifos/Válvulas	Plástico reforzado o bronce
Requisitos Técnicos	*Instalación elevada del tanque (Estructura metálica) *Espacio libre para mantenimiento de filtros y canaletas *Salida de rebose con drenaje natural *Sistema cerrado para evitar contaminación	
Mantenimiento Recomendado	*Limpieza mensual de canaletas y filtro de hojas *Verificación y lavado del filtro de sedimentos cada 2 meses *Desinfección del tanque cada 6 meses	
Vida útil estimada	*Tanque: 15-20 años *Tuberías y filtros: 5-10 años *Sistema general: hasta 25 años con mantenimiento adecuado	

Fuente Elaboración propia con fuentes de información secundaria

Distribución física del sistema

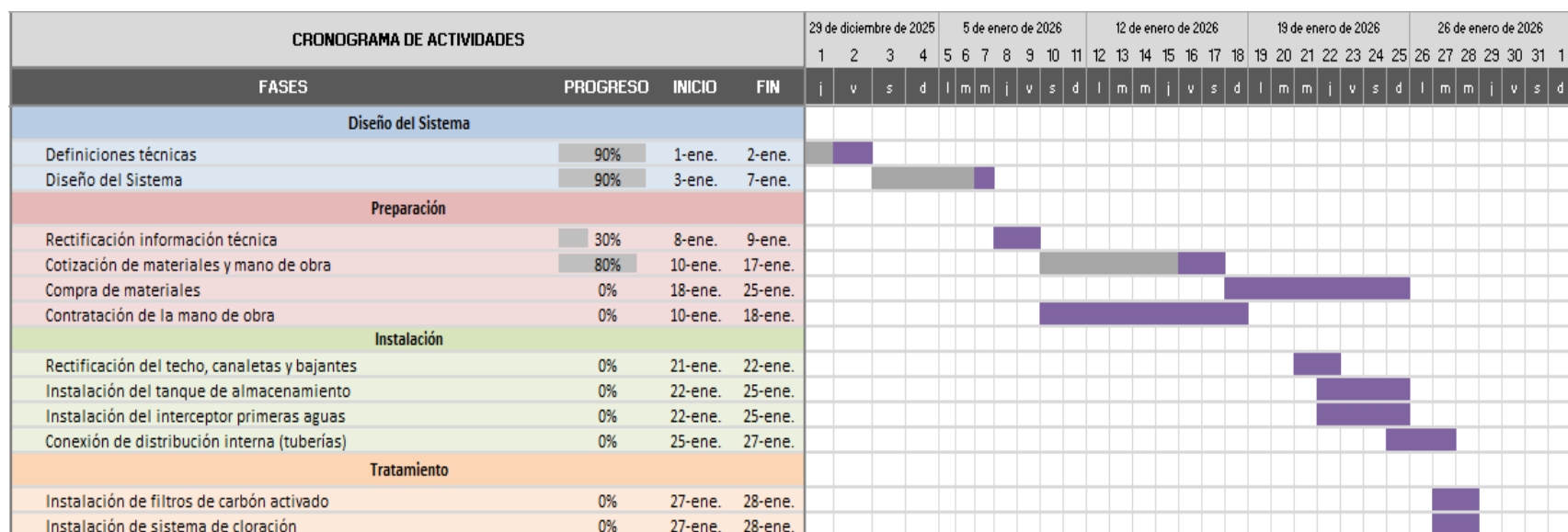
Figura 13

Distribución física del sistema



Fuente Elaboración propia

Plan de ejecución de actividades



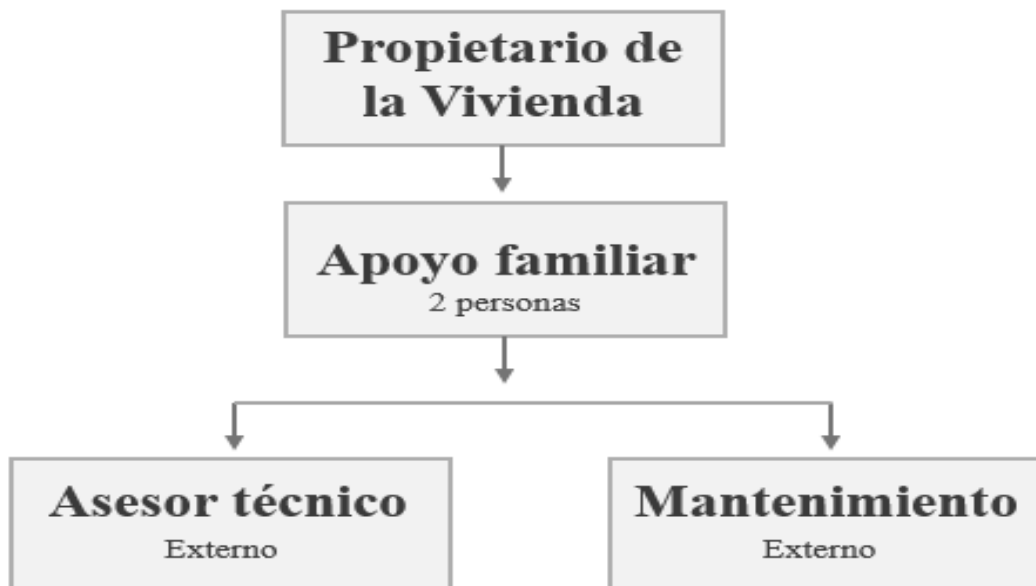
Estudio Organizacional y Legal

El recurso humano requerido para la operación y mantenimiento está conformado por:

- El propietario de la vivienda, quien lidera la supervisión del correcto funcionamiento del sistema.
- Como apoyo interno, se tienen dos miembros de la familia que colaboran con tareas básicas como limpieza de canaletas, filtros y control del uso eficiente del agua.
- De manera externa, se contempla, en la fase de implementación, la contratación de un asesor técnico responsable del diseño, supervisión de la instalación y capacitación sobre la operación y el mantenimiento.

Adicionalmente, se requiere un servicio de mantenimiento especializado para limpieza profunda del tanque, revisión de válvulas y sustitución de filtros, realizando dos mantenimientos preventivos al año.

Figura 15
Organigrama



Fuente Elaboración propia

Marco normativo

Tabla 6
Disposiciones legales

Nivel Normativo	Disposición Legal	Descripción	Organismo / Fuente
1. Constitución Política de Colombia (1991)	Artículo 79: Derecho a un ambiente sano	El Estado garantiza la protección del ambiente, el acceso al agua potable y la preservación de los recursos naturales.	Constitución Política de Colombia/Congreso de la República
1. Constitución Política de Colombia (1991)	Artículo 365: El agua como bien público	El agua es un recurso de interés público, bajo la propiedad del Estado y debe ser administrado de forma responsable.	Constitución Política de Colombia/Congreso de la República
2. Tratados Internacionales	Agenda 2030 de la ONU - Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6)	Garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua para todos.	Naciones Unidas/Agenda 2030
3. Leyes Ordinarias	Ley 373 de 1997: Ley de Eficiencia del Uso del Agua	Regula el uso racional y eficiente del agua, fomenta la captación de agua lluvia y promueve programas de sensibilización.	Ley 373 de 1997/Congreso de la República
3. Leyes Ordinarias	Ley 99 de 1993: Ley Orgánica de Protección del Medio Ambiente	Establece los principios para la protección del medio ambiente, la gestión de los recursos naturales y la creación de las corporaciones autónomas regionales (CAR).	Ley 99 de 1993/Congreso de la República
3. Leyes Ordinarias	Ley 1450 de 2011 (Plan Nacional de Desarrollo)	Define la política pública nacional en materia de infraestructura hídrica, incluyendo el acceso y gestión sostenible del agua en el ámbito rural.	Ley 1450 de 2011/Congreso de la República
4. Decretos Reglamentarios	Resolución 1207 de 2014 - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Establece los lineamientos técnicos para la instalación de sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia en viviendas y edificaciones.	Resolución 1207 de 2014/Ministerio de Vivienda
4. Decretos Reglamentarios	Decreto 1594 de 1984	Establece los parámetros técnicos para la calidad del agua potable, regulando el tratamiento y almacenamiento del agua.	Decreto 1594 de 1984/Presidencia de la República
5. Normas Técnicas	Norma Técnica Colombiana NTC 1500 - Diseño e instalación de sistemas de captación de agua lluvia.	Establece los lineamientos técnicos para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de captación de agua lluvia en edificaciones.	ICONTEC/www.icontec.org.co
5. Normas Técnicas	ICA – Índice de Calidad del Agua	Evaluación integrada de la calidad del agua con fines de uso	IDEAM/www.ideam.gov.co

Evaluación Financiera

La inversión inicial del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias contiene los costos asociados a la inversión de materiales, instalación y asesoría técnica. Este costo incluye los componentes fundamentales para garantizar el funcionamiento del sistema, captación y conducción mediante accesorios y uniones, tratamiento básico con filtro de hojas y desviador de primera lluvia, almacenamiento en un tanque y la distribución básica compuesta por tuberías, llaves, accesorios y grifos, adicionalmente, se considera la estructura metálica para el tanque, los costos de instalación que incluyen mano de obra y materiales menores, asesoría inicial para diseño y preparación y el transporte y logística. En total, la inversión requerida para la implementación del sistema asciende a \$ 3.000.000, los cuales serán con recursos propios.

Tabla 7
Inversión inicial

INVERSIÓN INICIAL (AÑO 0):	
Captación y Conducción: Accesorios y uniones	200.000
Tratamiento Básico: Filtro de hojas simple y Desviador primera lluvia	250.000
Almacenamiento: Tanque polietileno 2,000 L	900.000
Distribución Básica: Tubería, Llaves y accesorios y Grifos distribución	350.000
Estructura para tanque: Base de estructura metálica	300.000
Instalación: Mano de obra y materiales menores	400.000
Transporte/logística: Fletes	100.000
Asesoría inicial: Diseño y preparación	500.000
TOTAL INVERSIÓN INICIAL	3.000.000

Fuente Elaboración propia

La siguiente tabla presenta la proyección financiera del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias para un horizonte de cinco años, considerando ingresos por venta del recurso, los costos que incluyen los costos fijos y variable de operación y mantenimiento, gastos administrativos y de comercialización. Se incluyen los supuestos de incremento anual en precios, costos y gastos, así como el factor de degradación por cambio climático.

Tabla 8
Proyección ingresos, costos y gastos

PROYECCIÓN INGRESOS, COSTOS Y GASTOS					
Conceptos	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos	2.553.750	2.673.112	2.798.054	2.928.835	3.065.728
Costos	1.100.000	1.127.600	1.155.909	1.184.945	1.214.728
Gastos administrativos	500.000	514.000	528.392	543.187	558.396
Gastos de comercialización	255.375	267.311	279.805	292.883	306.573
Gastos financieros	-	-	-	-	-

Información operativa proyectada:	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Captación anual esperada: Litros	85.125	84.699	84.276	83.854	83.435
Precio de venta: \$ 30 Litro	30	32	33	35	37
Incremento anual del precio:	5,2%				
Factor de degradación por cambio climático:	0,5%				
Costos variables de operación:	400.000	408.000	416.160	424.483	432.973
Incremento anual de costos variables:	2,0%				
Costos fijos de operación y mantenimiento:	700.000	719.600	739.749	760.462	781.755
Incremento anual de costos fijos:	2,8%				
Gastos administrativos:	500.000	514.000	528.392	543.187	558.396
Incremento anual de gastos administrativos:	2,8%				
Gastos de comercialización: sobre los ingresos	255.375	267.311	279.805	292.883	306.573
Gastos de comercialización: sobre los ingresos	10,0%				

Fuente Elaboración propia

La siguiente tabla muestra el flujo de caja proyectado durante cinco años, considerando la inversión inicial en el año 0 y la utilidad operacional generada en cada periodo. El flujo corresponde a los ingresos anuales menos los costos operativos, gastos administrativos y de comercialización.

Tabla 9
Flujo de caja proyectado

FLUJO DE CAJA PROYECTADO						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial	3.000.000					
Utilidad Operacional		698.375	764.201	833.947	907.819	986.032
Flujo de Caja Libre	-3.000.000	698.375	764.201	833.947	907.819	986.032

Fuente Elaboración propia

La siguiente tabla de evaluación financiera muestra los resultados de los indicadores del Valor Presente Neto (VAN), La Tasa Interna de retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

Tabla 10
Evaluación financiera

EVALUACIÓN FINANCIERA	
TIR (Tasa Interna de Retorno)	12%
VAN (Valor Actual Neto)	125.315
PRI (Período Recuperación):	4,8

Fuente Elaboración propia

La evaluación financiera del Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvias, con una inversión inicial de \$ 3.000.000 financiada con recursos propios, demuestra una alta viabilidad económica y estratégica al generar un Valor Actual Neto (VAN) de \$125.315 a una tasa de descuento del 10%, lo que indica que el sistema crea un valor presente neto por encima del costo de oportunidad del capital, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 12% lo que refleja una buena rentabilidad, adicional el Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de 4,8 años, evidencia una recuperación dentro del periodo de proyección, en el 32% de la vida útil estimada del sistema de 15 años.

Estos resultados demuestran que el sistema no solo resuelve el déficit hídrico, la autonomía y resiliencia climática, sino que constituye una solución técnica, económica, social y ambientalmente sostenible, alineada con el ODS 6, el Plan de Desarrollo Territorial 2024-2027 de San Pedro de los Milagros y las políticas nacionales de gestión hídrica rural, con potencial replicable como modelo de autogestión comunitaria en Antioquia.

Evaluación Económica

La evaluación económica se fundamenta en la estimación de los costos asociados a la inversión inicial y costos de operación y mantenimiento, así como en la cuantificación de los beneficios directos que genera para la vivienda. Este análisis permite comparar los costos totales y los beneficios esperados, aplicando métodos reconocidos como el Precio de Mercado para la estimación de costos y el Costo Evitado y Valor de Mercado para la valoración de beneficios. A continuación, se presentan las tablas que detallan la estructura de costos y beneficios, base para el cálculo de indicadores como la Relación Beneficio/Costo.

Tabla 11
Análisis Beneficio - Costo

BENEFICIOS				
Beneficios	Descripción	Método	Total	
Ahorro en compra de agua potable	De la Demanda de 109.500 litros/año, el déficit anual es 39.102 litros, se considera sustituir el 20% de este déficit por botellones de agua de 5 litros, de esta manera atender la indisponibilidad del servicio del acueducto veredal. * Precio Botella plástica de 5 litros: 2.990, es decir 598 por litro	Costo Evitado Mide directamente el valor económico que se evita al no depender de fuentes externas de agua, como compra de agua potable transportada.	Costo de la compra de agua anual: 39.102 x \$598	4.676.599
Venta del excedente del agua lluvia captada	De la Demanda de 109.500 litros/año, vs la Oferta de 70.397 litros/año, se presenta un déficit el cual se suple con el SAALL, y aun así se presenta un excedente de 85.125 litros/año, lo cual se vendería el excedente a otras viviendas para el uso doméstico.	Valor de Mercado El recurso hídrico tiene un precio observable en el mercado.	Venta de agua: 85.125 x \$30	2.553.750
Conservación del recurso hídrico	Reducción del agotamiento de fuentes hídricas naturales (ríos, quebradas, pozos) al sustituir la extracción del recurso por la captación en el sistema, preservando los ecosistemas locales.	Valoración Económica Ambiental Valor monetario al beneficio ecológico por conservar fuentes hídricas.	Costo de la tasa por uso del agua anual: 124.227 x \$1.5	186.340
TOTAL				7.416.689

COSTOS				
Costos	Descripción	Método	Total	
Inversión inicial del Sistema	Canaletas, bajantes, tanque, sistema de distribución.	Precio de Mercado Es el método más directo y preciso, ya que utiliza precios de materiales y mano de obra disponibles en el mercado local para el sistema.	Total Inversión:	3.000.000
Costos de Operación y Mantenimiento	Limpieza, reparaciones, reposiciones.	Precio de Mercado Es el método más directo y preciso, ya que utiliza precios de mano de obra disponibles en el mercado local para la operación y el mantenimiento.	Total O y M:	1.476.613
TOTAL				4.476.613

Fuente Elaboración propia

$$\text{Relación Beneficio/Costo} = 7.416.689 / 4.476.613 = \mathbf{1,66}$$

La relación Beneficio/Costo obtenida es de 1,66, resultado de dividir los beneficios totales proyectados de \$ 7.416.689 entre los costos totales de \$ 4.476.613. Este indicador, superior a 1 confirma que los beneficios económicos derivados del ahorro en la compra de agua potable y la venta del excedente superan significativamente los costos de inversión, operación y mantenimiento, siendo una alternativa económicamente viable.

Evaluación Social y Ambiental

La evaluación social y ambiental del SAALL complementa la evaluación económica que arroja una Relación Beneficio/Costo de 1,66 y permite analizar los impactos que genera en el entorno social y ambiental. Este análisis considera tanto los impactos positivos como negativos. Además, establece estrategias de manejo ambiental y social que aseguran la sostenibilidad del sistema y la contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Impactos positivos

- Aumento en la disponibilidad del recurso hídrico: El sistema garantiza un suministro constante, reduciendo la dependencia de fuentes externas frente a la intermitencia del acueducto veredal y mejorando la resiliencia ante eventos climáticos extremos.
- Reducción del agotamiento de fuentes hídricas: Disminuye la presión sobre quebradas y nacimientos, contribuyendo a la conservación de ecosistemas locales.
- Mejora en la calidad de vida: Acceso seguro y continuo al agua para el uso doméstico.
- Fortalecimiento comunitario: Promueve la autogestión y la cooperación social en torno al recurso hídrico.

Impactos negativos

- Riesgo sanitario: Si el agua lluvia no recibe tratamiento adecuado, puede contener microorganismos y contaminantes que afecten la salud.
- Acumulación de agua: Tanques mal gestionados pueden convertirse en criaderos de vectores (mosquitos), aumentando riesgos epidemiológicos.

Plan de manejo ambiental y social

Ambiental:

- Instalación de filtros y desviadores de primeras lluvias para garantizar la calidad del agua.
- Limpieza periódica de canaletas, tanques y sistemas de conducción.
- Monitoreo semestral de parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua.

Social:

- Capacitación comunitaria en operación y mantenimiento del sistema.
- Campañas de sensibilización sobre uso eficiente del agua y prácticas de higiene.
- Inclusión de mujeres y jóvenes en la gestión del sistema para fortalecer el tejido social.

La contribución del sistema a la sostenibilidad se manifiesta de manera integral y multidimensional, alineándose con los principios de la economía circular, la resiliencia climática y el desarrollo rural sostenible, en el contexto donde el acueducto veredal ASUAZA solo garantiza una parte de la demanda hídrica.

Económicamente, el sistema genera autonomía financiera al eliminar la dependencia de fuentes externas y crear ingresos recurrentes mediante la venta del excedente, con una relación Beneficio/Costo de 1,66 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29%, lo que permite recuperar la inversión de \$3.000.000 en solo 3,4 años, fortaleciendo la capacidad económica de la vivienda y reduciendo la vulnerabilidad hídrica estructural.

Socialmente, promueve la equidad y el empoderamiento al garantizar acceso continuo a agua potable para el uso doméstico y fomentando la cohesión comunitaria mediante la comercialización solidaria del excedente a viviendas vecinas, generando un fondo rotatorio para el mantenimiento.

Ambientalmente, actúa como una solución basada en la naturaleza que captura pasivamente el agua lluvia proveniente de la precipitación, reduciendo la presión sobre ríos, quebradas y acuíferos, preservando caudales ecológicos y biodiversidad acuática, evitando emisiones por transporte de carro tanques y mitigando riesgos climáticos mediante un diseño resiliente del sistema.

Conclusiones

El sistema de aprovechamiento de aguas lluvias garantiza el autoabastecimiento hídrico de la vivienda, eliminando la dependencia del acueducto veredal y asegurando la disponibilidad continua del recurso para el uso doméstico. Este sistema permite cubrir el déficit existente y generar excedentes, fortaleciendo la autonomía hídrica y la resiliencia frente a la variabilidad climática.

El sistema permite no solo cubrir completamente el déficit, sino también generar un excedente hídrico, lo que representa una oportunidad estratégica para abastecer parcialmente otras viviendas y generar ingresos mediante la venta del recurso, demostrando que es técnica, financiera, económica, social y ambientalmente viable.

El sistema además contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental, al reducir costos asociados al abastecimiento externo y disminuir la presión sobre fuentes naturales, consolidándose como una solución integral y replicable en zonas rurales con condiciones similares.

La relación Beneficio/Costo del 1,62 confirma que los beneficios económicos superan los costos de inversión, operación y mantenimiento. Este resultado, sumado a los indicadores de Valor Presente Neto positivo, la Tasa Interna de Retorno del 12% y el Periodo de Recuperación de la Inversión de 4,8 años, demuestra que el sistema no solo resuelve el déficit hídrico y mejora la autonomía hídrica, sino que también constituye una alternativa sostenible y rentable.

El sistema genera impactos positivos de manera significativa, mejorando la disponibilidad del recurso hídrico, ambientalmente favorece la conservación del agua y la adaptación al cambio climático. Adicional, reduce la presión sobre fuentes naturales y fortalece la resiliencia comunitaria frente a la variabilidad climática. Socialmente, contribuye a la calidad de vida y promueve la autogestión comunitaria.

Recomendaciones

Se recomienda replicar el estudio de factibilidad en veredas y municipios con mayor déficit hídrico y que presenten índices críticos de escasez de agua, priorizando áreas rurales con baja cobertura de acueducto y alta vulnerabilidad social, esto permitirá determinar la aplicabilidad del sistema en contextos más exigentes y ampliar el impacto.

Se sugiere articular el proyecto con políticas públicas y programas de financiación, como por ejemplo en el Plan de Desarrollo Territorial de los municipios y en programas nacionales, para acceder a subsidios y recursos que faciliten la implementación.

Se recomienda que el agua recolectada solo sea para el uso doméstico y no para el consumo humano, debido a las características físicoquímicas y microbiológicas del agua lluvia, de esta manera prevenir riesgos sanitarios.

Se recomienda incluir escenarios de variabilidad y cambio climático en la proyección de la oferta hídrica, considerando sequías prolongadas y lluvias extremas, de tal manera que permita ajustar la capacidad del sistema y definir medidas preventivas para garantizar la resiliencia, sostenibilidad y continuidad operativa frente a eventos climáticos adversos.

Referencias

- Agua.org.mx. (2017). *Distribución del agua en el mundo*. <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Alcaldía Municipal de San Pedro de los Milagros. (s.f.). *Información del municipio*. <https://www.sanpedrodelosmilagros-antioquia.gov.co/publicaciones/63/informacion-del-municipio/>
- Arboleda, M. (2016). *Diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de los Lagos, Buenaventura* [Informe técnico]. Universidad del Pacífico.
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). (2017). *Revista CRA N°16*. <https://www.cra.gov.co/prensa/revistas-regulacion/revista-ndeg-16>
- CONPES. (2020). *Política de gestión integral del recurso hídrico para la adaptación al cambio climático*. Consejo Nacional de Política Económica y Social.
- Departamento Nacional de Planeación. (2022–2026). *Plan Nacional de Desarrollo*. Gobierno de Colombia.
- Esri Colombia. (s.f.). *Departamento de Antioquia – StoryMaps*. <https://geoapps.esri.co/DepartamentoDeAntioquia/StoryMaps/index.html>
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua lluvia*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Función Pública. (1974). *Decreto 2811 de 1974: Código Nacional de Recursos Naturales*. Congreso de la República.
- Función Pública. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Congreso de la República.
- Función Pública. (1993). *Ley 99 de 1993: Política general para la gestión de los recursos naturales renovables*. Congreso de la República.
- Función Pública. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Compilación normativa ambiental*. Congreso de la República.
- Gobernación de Antioquia. (s.f.). *San Pedro de los Milagros*. Corregimientos de Antioquia. <https://corregimientos.antioquia.gov.co/san-pedro-de-los-milagros/>
- Gobernación de Antioquia. (s.f.). *Subregión Norte del departamento de Antioquia*. <https://antioquia.gov.co/norte>
- Guzmán, L. (2018). *Recolección y aprovechamiento de aguas pluviales mediante sistemas de recolección* [Monografía]. Instituto Distrital para la Recreación y el Deporte (IDRD).
- ICONTEC. (s.f.). *Norma Técnica Colombiana NTC 1500: Diseño e instalación de sistemas de captación de agua lluvia*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- IDEAM. (2019). *Glosario de términos hidrológicos*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co/>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Lineamientos para el uso de aguas lluvias y manejo de sedimentos*. Gobierno de Colombia.
- Minvivienda. (2020). *Informe sobre la cobertura y calidad del servicio de agua potable en zonas rurales*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Minvivienda. (2021). *Plan Nacional de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico rural*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Minsalud. (2022). *Decreto 1575 de 2007 y Resolución 2115 de 2007: Calidad del agua potable*. Ministerio de Salud y Protección Social.
- Naciones Unidas. (2010). *El derecho humano al agua y al saneamiento*. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). (2015). *Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Naciones Unidas.
- OMS. (2023). *Directrices sobre la calidad del agua potable*. Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2025). *Informe sobre acceso al agua y saneamiento*. Naciones Unidas.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). *Declaración sobre la importancia del aprovechamiento de aguas lluvias para mejorar el acceso al agua en áreas rurales*. Naciones Unidas.
- Plan de Desarrollo Territorial 2024–2027. (2024). *Plan de desarrollo del municipio de San Pedro de los Milagros*. Alcaldía Municipal.
- Ramírez, J. (2021). *Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá* [Trabajo de grado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Superservicios. (2023). *Informe nacional de coberturas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Coberturas-AAA-2023.pdf>
- USGS. (2022). *The water cycle*. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/>
- World Bank Group. (2022). *Un cambio de rumbo: Informe sobre la disponibilidad de agua en Colombia*. Banco Mundial.