

Evaluación económica de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas rurales andinas. Caso de estudio: vereda Garbanzal (Los Santos – Santander)

Economic evaluation of rainwater harvesting systems in rural Andean areas. Case study: Garbanzal village (Los Santos - Santander).

Cristian Andrés Albarracín Ortiz

Esc. de Est. Ind. Empr., Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Email: CRISTIAN.ALBARRACIN@correo.uis.edu.co

Resumen:

La seguridad hídrica y alimentaria están en riesgo en diversas regiones del mundo, que se agravan por los fenómenos del cambio climático. Los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia (SAAL) son una alternativa para mejorar la disponibilidad de agua en zonas urbanas y rurales, lo que ha generado beneficios tanto en el bienestar como en la economía de las comunidades. No obstante, la viabilidad económica de estos sistemas sigue siendo discutible. Diferentes investigaciones sobre la viabilidad económica de los SAAL han arrojado resultados contradictorios, especialmente en áreas urbanas. Además, estos análisis no han incluido el uso del agua para actividades de sustento, lo cual puede mejorar los resultados de la evaluación financiera en las zonas rurales. En muchas zonas rurales, frecuentemente los SAAL son la única fuente de agua disponible, por lo que se debe priorizar la construcción de sistemas más tecnificados y de fácil acceso. Este estudio usa el análisis costo-beneficio (ACB) como indicador económico para determinar la viabilidad de SAAL en zonas rurales. Para esto, se evaluó la viabilidad de 3 alternativas de diseño desarrolladas para un área rural dispersa con escasez hídrica en el departamento de Santander (Colombia). Los resultados muestran que la relación ACB fue mejor para las alternativas que consideraban usos productivos (alternativas 2 y 3) en comparación con la alternativa que solo otorgaba agua para fines domésticos (alternativa 1). Esto evidencia que los SAAL que facilitan el desarrollo de actividades productivas por la mayor disponibilidad de agua tienen mejor desempeño económico. La alternativa que entregaba agua para actividades domésticas y crianza de gallinas (alternativa 3) tuvo la mejor relación (1.45), ya que en el contexto en estudio, esta actividad tiene mayor margen de ganancia y menor consumo de agua en comparación con el cultivo de maíz (alternativa 2). También se encontró que cuando la inversión inicial es subsidiada por el gobierno se dan las mejores relaciones ACB. Estos resultados muestran a los SAAL como una opción viable para poblaciones campesinas con pequeñas actividades productivas que viven en zonas con escasez hídrica. El uso de esta herramienta permite optimizar los recursos, evaluar los riesgos y beneficios y considerar diferentes escenarios y supuestos antes de su implementación. Este estudio muestra que el enfoque económico empleado en la selección de SAAL es fundamental para la toma de decisiones y podría contribuir a mejores inversiones que faciliten el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras claves

Cambio climático, Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, Análisis económico, Relación costo-beneficio, zonas rurales

Abstract:

Water and food security are at stake in many world regions due to climate change. Rainwater harvesting systems (RWHS) have led to significant improvements in water availability in urban and rural areas, generating benefits for the well-being and economy of numerous communities. However, the economic feasibility of these systems remains arguable. Different investigations on the financial viability of RWHS have yielded conflicting results, especially in urban areas. In many rural areas, RWHS are often the only available water source. In addition, using water for livelihood activities can improve financial evaluation results in rural areas. This study uses cost-benefit analysis (CBA) as an economic indicator to assess the viability of RWHS in rural areas. For this, the feasibility of 3 design alternatives developed for the Garbanzal village in Los Santos (Santander - Colombia) was evaluated. The results show that, in areas with water scarcity, such as Garbanzal, the results are promising when the economic analysis of RWHS incorporates the benefits of productive activities facilitated by greater water availability. Thus, the CBA ratio was better for the alternatives that considered productive uses (alternatives 2 and 3) than the alternative that only provided water for domestic purposes (alternative 1). The alternative that provided water for domestic activities and raising chickens (alternative 3) had the best relationship (1.45) since, in the studied context, this activity has a higher profit margin and lower water consumption compared to growing corn (alternative 2). It was also found that the best CBA ratios were obtained when the government subsidized the initial investment. These results show RWHS as a viable

option for peasant populations with small productive activities that live in arid zones. This tool allows for optimizing resources, assessing risks and benefits, and considering different scenarios and assumptions before implementation. Governments committed to meeting Sustainable Development Goals could support these investments with great potential to improve the quality of life of many communities.

Keywords:

Climate change, Cost-benefit analysis, Rainwater harvesting systems, Economic analysis, Cost-benefit analysis, rural area.

1. Introducción

El agua es el elemento más importante para el sostenimiento de la vida. En el siglo XXI, la creciente demanda de agua y los efectos climáticos adversos se presenta como uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad (FAO, 2021).

Así mismo, la escasez de agua afecta las posibilidades de desarrollo de una región, comprometiendo el progreso económico y bienestar social (Abdulla, 2020). En gran parte del mundo, los habitantes de localidades rurales se ven enfrentados a serios problemas para abastecerse de agua de buena calidad; la lejanía a centros poblados y dispersión complica el suministro por redes de acueducto, además de poca disponibilidad de aguas superficiales cercanas. Desde la perspectiva de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS.), se hace necesario buscar otras alternativas de suministro no convencionales como los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia (SAAL). Esta opción puede brindar a las comunidades acceso agua de calidad aceptable para uso doméstico y agrícola, y mediante el uso de tratamientos adicionales, podría ser apta para el consumo humano (Dallman et al., 2021).

Al implementar un SAAL, un parámetro sensible en su adopción es el de costos, ya que se requiere una inversión considerable para su montaje, y en muchas ocasiones las comunidades carecen de los recursos necesarios o no tienen acceso a créditos para financiarlos (Hatibu et al., 2006). Resulta esencial desarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisiones que ayuden a las personas a mitigar riesgos e invertir en tecnologías prometedoras para la gestión de los recursos hídricos.

Los SAAL representan un método eficaz para complementar el suministro de agua destinado a la agricultura, ganadería y actividades domésticas en zonas rurales. En consecuencia, es necesario que las personas puedan entender en términos económicos lo que pueden ganar y en qué costos incurrirían a la hora de adoptar estos sistemas (Malik et al., 2014). ¿Cómo saber si un SAAL es económicamente viable para una determinada comunidad? Y ¿merece la pena invertir en un SAAL? Una inversión es económicamente

viable cuando, en conjunto, los costos de implementación y los costos de funcionamiento son inferiores a los beneficios esperados a lo largo del tiempo (Lara & Franco, 2017). Un método de evaluación ampliamente usado en proyectos ambientales y sociales es el análisis costo-beneficio (ANLA, 2018). En el caso de SAAL, esta herramienta permite determinar si el sistema que se desea implementar es viable para la comunidad, ya que desglosa cada uno de los costos requeridos para ponerlo en marcha y los relaciona con los posibles beneficios. Cuando esta relación es mayor a 1, se dice que la implementación de este sistema dará valor agregado a la comunidad y merece la pena invertir en estos sistemas (Mwenge Kahinda et al., 2007).

La evaluación económica aplicada a los SAAL parte de análisis técnicos donde por ejemplo, se varían parámetros como el tamaño de los tanques, el área de captación, la tubería de suministro, el tipo de bombeo, tipo de materiales, demanda, usos, entre otros. Esto se hace para identificar diferentes opciones que, al ser comparadas a través del análisis económico, ofrecen diferentes relaciones costo-beneficio que ayudan a responder a la pregunta de cuál SAAL es económicamente más viable dadas las condiciones geográficas y sociales en las que se encuentren. Por ejemplo, Amos et al (2016) examinaron el potencial de ahorro de agua, la confiabilidad del suministro de agua, los beneficios financieros y la idoneidad de los subsidios gubernamentales existentes para un SAAL en una vivienda unifamiliar en diez ubicaciones diferentes en Greater Sydney, Australia. Analizar la viabilidad de las diferentes alternativas permite que los responsables de la toma de decisiones, con diferentes puntos de vista, puedan orientarse hacia la mejor elección (Dallman et al., 2021).

Los estudios que han abordado el análisis económico de los SAAL, tanto en áreas rurales como urbanas, han utilizado indicadores económicos como valor presente neto (VAN), retorno de la inversión (ROI), relación costo-beneficio (ACB) y período de recuperación (PR) (Morales-Pinzón et al (2012), tasa interna de retorno (TIR) (Mwenge Kahinda et al (2007)). En particular, el Análisis de Costo-Beneficio (ACB), es una

herramienta para la toma de decisiones ampliamente aceptada y de uso frecuente (Hajani & Rahman, 2014).

La aplicación del ACB al estudio de los SAAL no es generalizada y, por tanto, las implicaciones financieras y económicas del uso de estos sistemas se discuten menos (Jing et al., 2017a) o ignoran todos los beneficios que puede ofrecer un SAAL (Amos et al (2018)). Por otro lado, la cantidad limitada de estudios que se centran en los aspectos económicos a menudo ha arrojado resultados contradictorios (Zingiro et al., 2014). Varios estudios (Dallman et al., 2016a; Jing et al., 2017b; Rahman et al., 2012) han concluido que los SAAL no son económicamente viables. Estas conclusiones son resultado de las suposiciones financieras y parámetros con los que se modelan los estudios. Por ejemplo, los resultados pueden variar en función del tipo y tamaño del tanque de almacenamiento seleccionado, de la existencia de otras fuentes de agua y del precio que se paga por el acceso a ellas (Amos et al., 2016). Otras variables que pueden afectar la viabilidad son la exclusión de algunos beneficios indirectos, las suposiciones sobre las tasas de descuento, inflación y las expectativas de vida del sistema.

Amos et al (2018) afirman que, si las aguas subterráneas no se cobran, y los precios del agua no se incrementan cada año, los SAAL no son viables desde el punto de vista financiero. Morales-Pinzón et al., (2012) concluyeron que, los SAAL no son rentables en la mayoría de los casos en zonas urbanas en España debido a las bajas tarifas del agua, también encontraron que las principales variables que afectan el análisis ACB son el precio del agua corriente, la tasa de descuento y la tasa de inflación.

En áreas rurales, la mayoría de los estudios arrojan relaciones costo beneficio por encima de 1 (Durodola et al., 2020; Malik et al., 2014; Zingiro et al., 2014). La eficacia de la gestión del agua de lluvia depende de una serie de factores como las inversiones de los agricultores, el acceso a créditos con tasas especiales, la obtención de subsidio por parte del gobierno, la fiabilidad y la distribución de las precipitaciones, la gestión del agua, las características del suelo y los tipos de cultivos. Los resultados destacan la necesidad de innovación y reducción de capital y costos continuos asociados con los sistemas, en lugar de depender de aumentar el precio del agua para aumentar su viabilidad económica (Durodola et al., 2020).

En Colombia, se han realizado investigaciones sobre viabilidad económica de los SAAL mayoritariamente en zonas urbanas. (Estupiñan y Zapata, 2010; Gómez & Molina, 2016; Oviedo-Ocaña et al., 2018; Rincón y

Mendoza, 2016). La evaluación económica de los SAAL, especialmente en zonas rurales es aún incipiente. Aunque existen algunos estudios sobre el tema, estos son escasos y en algunas ocasiones sus resultados son contradictorios. Esto representa una limitación significativa en la comprensión la efectividad y rentabilidad de las inversiones en estos sistemas.

Este trabajo aborda el análisis económico de los SAAL. Para esto, se aplica el análisis costo-beneficio a tres alternativas de diseño de SAAL propuestos para las condiciones existentes en la vereda Garbanzal del municipio de los Santos en Santander. Esta herramienta ayuda a optimizar la asignación de recursos al identificar las alternativas más rentables y eficientes en términos económicos, permite evaluar los riesgos y beneficios y considerar diferentes escenarios y supuestos. Además, serviría para que las comunidades buscaran apoyo para la obtención de subsidios por parte del gobierno.

2. Materiales y Métodos

2.1 Descripción del área de estudio

La vereda Garbanzal (Los Santos, Santander) (ver Figura 1) se caracteriza porque sus tierras son en su mayoría agrestes y rocosas, de erosión crítica, y con presencia de bosque seco subandino. La aridez de la zona genera limitaciones en el acceso al agua debido a la falta de precipitaciones continuas y de fuentes hídricas en abundancia (Florez, 2019). Para enfrentar esta dificultad, los habitantes usan fuentes de suministro alternativas como el agua lluvia, que ha permitido diversificar actividades agropecuarias y tener agua para actividades cotidianas (Briceño & Chaparro, 2022).

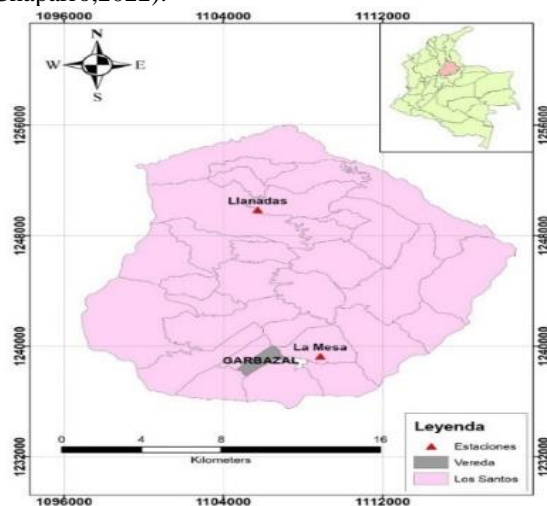


Figura 1 Localización geográfica vereda garbanzal Tomado de Briceño & Chaparro (2022)

La pertinencia de Garbanzal para el presente estudio se debe a sus características geográficas, ya que es una región árida, con escasez de agua, donde las personas han recurrido a SAAL, lo que permite aprender sobre los sistemas instalados. Además, se contó con la voluntad de la comunidad para acompañar el proyecto y suministrar información.

2.2 Alternativas de diseño

Estas opciones se construyeron a partir del análisis de la información recopilada en encuestas y visitas al área de estudio donde se identificaron fortalezas y deficiencias en los sistemas existentes y se propusieron mejoras. En el diseño de las alternativas se incluyeron actividades productivas de pequeña

escala típicas en la zona, como la cría de gallinas y cultivo de maíz, considerando varios escenarios de uso del agua y sus beneficios.

Prieto (2023) formuló tres alternativas de SAAL para contexto de Garbanzal. La alternativa 1 fue diseñada para cubrir únicamente las necesidades domésticas de un hogar. Además de las necesidades domésticas, las alternativas 2 y 3 satisfacen necesidades productivas de pequeña escala (Figura 2). La Figura 3 detalla los componentes utilizados en cada una de las tres alternativas

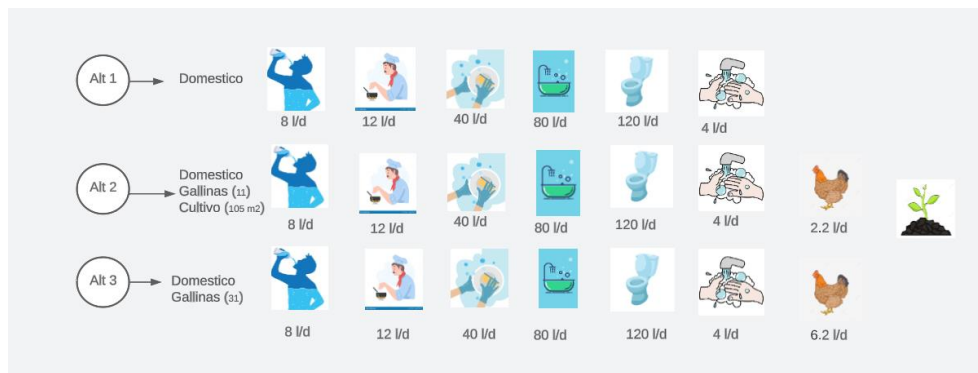


Figura 2 Demanda de agua en actividades domésticas y productivas en el día de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal

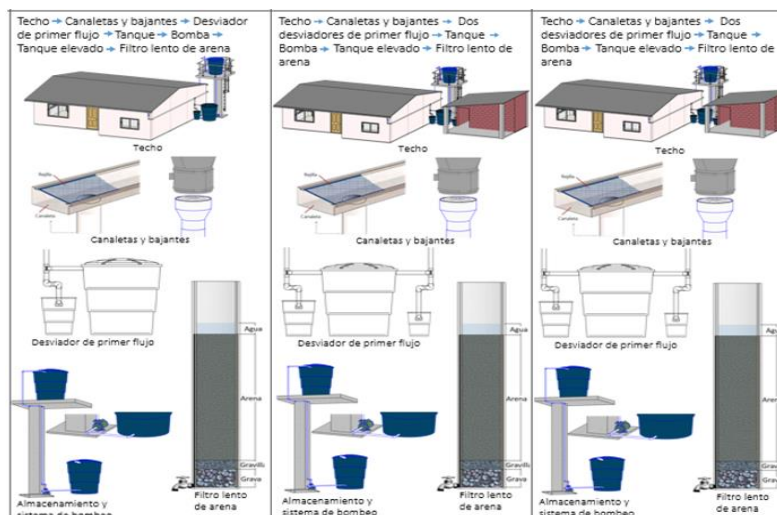


Figura 3 Componentes principales de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal.

Tomado de Prieto (2023)

2.3 Costos de ciclo vida.

A continuación, se describe el proceso para analizar cada uno de los costos considerados para las alternativas propuestas.

2.3.1 Costo de inversión inicial

Se analizaron los costos de inversión inicial como adecuación del lugar, materiales, construcción del sistema, métodos de purificación del agua, mecanismos de suministro, necesidades de mano de obra y maquinaria. Se cotizó cada uno de los componentes del sistema en almacenes de cadena de la región. Se excluyó el costo del tejado ya que se consideró el existente en las viviendas.

A partir de las medidas de diseño y el costo promedio por unidad, se calculó el costo total de los materiales. La mano de obra y maquinaria solo se tuvo en cuenta para las actividades que requerían de un experto como la construcción de la columna y base en el tanque elevado. Estos costos se calcularon según recomendaciones de Gobernación de Boyacá (2023). Se asumió que las actividades que no requerían mano de obra experta eran realizadas por los propietarios del sistema.

2.3.2 Costos de operación

Los costos de operación asociados al suministro y purificación del agua dentro de los hogares se calcularon acorde al requerimiento de energía para el funcionamiento de la bomba y el consumo de gas para la desinfección del agua. Para la bomba, el consumo de electricidad se calculó teniendo en cuenta las características técnicas y la tarifa por KWH proporcionada por la empresa prestadora del servicio, para un consumo promedio de 15 minutos al día. El consumo de gas fue el asociado a la desinfección de 20 litros de agua diarios y se calculó teniendo en cuenta el valor de la tarifa de la empresa prestadora de servicio de la región. Se asumió que todas las actividades eran realizadas por los propietarios, por lo cual no se generaron costos de mano de obra por operación del sistema.

2.3.3 Costos de mantenimiento

Se estimó la compra de utensilios e insumos para la limpieza de cada uno de los componentes del SAAL. Además, se definió la periodicidad de reparación o cambio de los componentes, de acuerdo con su ciclo de vida.

2.3.4 Costo de las actividades productivas

A partir de la información obtenida de las encuestas en la zona, en relación con las prácticas locales, se identificó que la crianza de gallinas y el cultivo de

maíz eran actividades comunes entre los pobladores. Por lo tanto, se analizaron los costos de alimentación, cuidado y vivienda para las gallinas. Se establecieron ciclos productivos de 6 meses para facilitar la comercialización de carne y huevos. Se tuvo en cuenta que, al comienzo del proceso, se adquieren pollitas de 2 meses con valor promedio de mercado de 15,000 pesos. El tipo de alimento y las cantidades suministradas se establecieron con base en las recomendaciones de la literatura. Se consideraron los costos de un gallinero, así como los costos de control de enfermedades (medicamentos) (Tellez, 2011).

En cuanto al maíz, se decidió plantear un cultivo completamente orgánico, es decir, no se incluyeron costos asociados al control de plagas y enfermedades, ni gastos de adquisición de semillas, ya que es común que las familias dispongan de sus propias semillas o las obtengan de sus vecinos. Debido a la limitada extensión del terreno (105 m²), se asumió que los agricultores no requerirían mano de obra adicional ni maquinaria para llevar a cabo las labores agrícolas.

2.4 Análisis de los beneficios de los sistemas

El análisis de los beneficios consideró dos escenarios: i) sin un SAAL no sería posible llevar a cabo las actividades productivas seleccionadas en las alternativas debido a la escasa disponibilidad de agua en la zona suministrada por las otras fuentes existentes; y ii) sí sería posible realizar las actividades utilizando otras fuentes de suministro de agua. Estos dos escenarios se analizaron para evaluar su influencia en el resultado del ACB. En el análisis de los beneficios se tuvieron en cuenta los costos evitados en la tarifa para consumo de agua doméstico de los sistemas centralizados existentes en la vereda (a partir de agua superficial y a partir de agua subterránea) y los beneficios procedentes de las actividades productivas, ya que estos son los más mencionados por la literatura, y los más factibles de cuantificar (Amos et al., 2018).

En el primer escenario se consideraron todos los beneficios derivados de las actividades productivas además del valor ahorrado en el pago de tarifas por el uso de agua en actividades domésticas. En el segundo escenario, el beneficio analizado fue únicamente el costo evitado en las tarifas tanto para consumo doméstico como en las actividades productivas.

La metodología utilizada para calcular el beneficio del agua ahorrada fue la de costes evitados o inducidos, que analiza los bienes ambientales relacionados con bienes privados o con presencia en el mercado (UPC, 2017). Para esto, se determinó la tarifa por metro

cúbico (m³), la cual se construyó tomando como referencia los valores que las personas encuestadas pagan por las diferentes fuentes de agua a las que tienen acceso, información que se recopiló en una de las encuestas mencionadas anteriormente. Los beneficios de las actividades productivas se calcularon tomando como referencia lo encontrado en cartillas, documentos de literatura especializada e información contenida en las encuestas.

La cantidad de agua que el sistema puede aprovechar durante su ciclo de vida, dada sus características de diseño, se calculó con la proyección de la precipitación diaria. Se utilizó el promedio de las precipitaciones de los últimos 11 años, suministrado por la estación meteorológica de la Mesa de los Santos.

2.5 Determinación de la relación costo-beneficio de los sistemas

A continuación, se describe la elección de parámetros importantes en la construcción de la relación costo-beneficio

2.5.1 Tasa de descuento, inflación y período de vida del proyecto.

La tasa de inflación se usó para proyectar los flujos de caja de los beneficios y costos de operación, mantenimiento y de actividades productivas. Esta tasa se definió a partir de datos históricos mensuales de inflación (1993 – mayo 2023) y se usó el método de media móvil, que consiste en tomar el promedio de la inflación anual de los últimos 8 años, además de considerar el valor actual de la inflación y las expectativas proporcionadas por los bancos para el cierre del presente año y el próximo. La vida del proyecto se definió tomando como referencia la literatura en el área y recomendaciones de la normatividad. La tasa de descuento se seleccionó a partir de recomendaciones de literatura, expertos y la normatividad vigente en proyectos ambientales.

A los datos históricos de la inflación de los últimos 30 años se les realizó una prueba de ajuste de distribución de probabilidad utilizando el software MINITAB, para identificar cual describía mejor el comportamiento de los datos, y así definir el rango de sensibilidad de la tasa de inflación con un determinado intervalo de confianza.

Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de inflación y la tasa de descuento donde se evidenció el comportamiento de la relación costo-beneficio ante la variación de estas tasas.

2.5.2 Fuentes de financiación de la inversión

Para enriquecer el análisis se evaluaron tres escenarios de financiación del sistema:

- Capital propio: El propietario invierte un capital ahorrado.
- Crédito: El propietario accede a un crédito a una tasa de 15.65% Efectivo Anual, a un plazo de 3 años.
- Subsidio por un ente de gobierno: El estado subsidia el costo total de inversión inicial.

2.5.3 Relación costo-beneficio

Con los costos y beneficios cuantificados se determinó la relación costo-beneficio. Para esto se comparó el Valor Presente de los beneficios proyectados con el Valor Presente de los costos, incluyendo la inversión (Morales-Pinzón et al., 2015). Los valores presentes se calcularon multiplicando los flujos de efectivo (FC) por la tasa de descuento, que es una función de la tasa de interés (i) y el año en que se produjo el flujo de caja (t), como se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$VP \text{ costos} = \sum_{t=0}^T \left(\frac{\text{Costos}}{(1+i)^t} \right)$$

Ecuación 1 Valor presente de los costos

Nota. Adaptado de Morales-Pinzón et al (2015)

$$VP \text{ beneficios} = \sum_{t=0}^T \left(\frac{\text{Beneficios}}{(1+i)^t} \right)$$

Ecuación 2 Valor presente de los beneficios

Nota. Adaptado de Morales-Pinzón et al (2015)

La relación costo beneficio es la sumatoria de todos los beneficios descontados a lo largo del periodo de tiempo propuesto sobre la sumatoria de todos los costos descontados (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

$$RCB = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

Ecuación 3 Relación costo beneficio

Nota. Adaptado de (Morales-Pinzón et al., 2015)

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de los costos

A continuación, se presentan los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de las tres alternativas de SAAL propuestas. Además, se incluyen los costos de las actividades productivas.

3.1.1 Costos inversión inicial

La Tabla 1 muestra el resumen de los costos de inversión inicial para cada una de las alternativas.

Tipo de costo	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Costo de materiales	\$ 3'983,723.76	\$ 4'358,489.58	\$ 4'358,489.58
Costo de mano de obra	\$ 709,040.36	\$ 709,040.36	\$ 709,040.36
Costo maquinaria y equipo	\$ 269,619.41	\$ 269,619.41	\$ 269,619.41
Total	\$ 4'962,383.52	\$ 5'337,149.34	\$ 5'337,149.34

Tabla 1 Resumen costos de inversión inicial de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Para cada una de las opciones, aproximadamente el 80% de la inversión inicial se destina a la compra de materiales, mientras que 14% se asigna a mano de obra y 6% a maquinaria y equipo. Varios estudios concluyen que uno de los mayores desafíos al implementar un SAAL es encontrar los recursos económicos para los materiales, ya que, en países en desarrollo, las necesidades de mano de obra están casi siempre a cargo del propietario (Hatibu et al., 2006; Islam et al., 2011; Malik et al., 2014).

La adecuación del tanque de almacenamiento elevado incurrió en el mayor costo de materiales (aproximadamente el 30% de la inversión). Estudios como Durodola et al. (2020) no recomiendan este sistema en zonas con bajo nivel económico, ya que se incrementan los costos de inversión, especialmente por compra de la bomba y las estructuras en cemento.

Las canaletas, debido a la cantidad necesaria y su precio por unidad, representaron el 25%, convirtiéndose en el segundo elemento más costoso. La compra de dos tanques de almacenamiento y dos desviadores de primera descarga también tuvo gran impacto en los costos (20% de la inversión). En varios estudios se nota la preocupación por reducir los costos. Por tanto, en algunos diseños se sacrifica la comodidad

Tipo	Periodicidad	Valor Alt 1	Valor Alt 2	Valor Alt 3
Compra Equipo de limpieza	1 vez en su ciclo de vida	21,300	21,300	21,300
Mantenimiento - Limpieza	2 veces al año	4,714.7	4,999.6	4,999.6
Reconstrucción desviador	1 vez a mitad de ciclo de vida	127,590.4	162,234.1	162,234.1
Reconstrucción filtro	Cada 2 años	9,575.3	10,380.3	10,380.3
Reparación canaletas	1 vez a mitad de ciclo de vida	524,320.5	655,400.6	655,400.6
Reparación tejado	Cada 10 años	141,666.9	177,083.6	177,083.6
Revisión bomba	Anual	25,980	25,980	25,980
Revisión de tuberías y conexiones	Cada 5 años	39,811.9	40,051.9	40,051.9
Total (25 años)		2'155,742.8	2'417,405	2'417,405

Tabla 2 Resumen actividades de mantenimiento de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal.

para reducir los costos (ej. prescindir de redes de suministro dentro del hogar, bombas y utilizar materiales reciclados) (Hatibu et al., 2006; Islam et al., 2011; Ngigi, 2005^a). Muchas variables afectan el costo total en los SAAL, por ejemplo, la cantidad de agua requerida, disponibilidad de materiales y mano de obra, tareas de mantenimiento, acceso a subsidios o créditos entre otras (Aladenola & Adebayo, 2010).

3.1.2 Costos de operación

Se estableció el costo promedio de funcionamiento de la bomba para las tres alternativas de 2000 pesos mensuales para el primer año (costo de bombear el agua diariamente al tanque elevado durante 15 minutos). Así mismo, para hervir la cantidad de agua potable establecida (20 litros diarios), se requieren 650 pesos mensuales el primer año en las tres alternativas.

3.1.3 Costos de mantenimiento

En la Tabla 2 se presenta un resumen de todas las tareas de mantenimiento en las que se puede incurrir con un SAAL con su respectiva frecuencia, de acuerdo Gobernación de Boyacá (2023), y la estimación de los costos asociados a estas tareas en cada alternativa propuesta para el caso de estudio de Garbanzal.

Los costos de operación y mantenimiento suelen ser bajos en comparación con la inversión inicial. Jin et al (2023) consideraron los costos de operación/mantenimiento como el 2% de la inversión inicial. Amos et al (2018) afirman que el mantenimiento de la bomba y el tanque puede aumentar significativamente estos costos y propusieron las bombas manuales como alternativa de ahorro.

3.1.4 Costos de las actividades productivas

A continuación, se plantean los costos de las actividades productivas de pequeña escala para las alternativas de SAAL.

Costo promedio ciclo productivo (6 meses)

Detalle	Alt 1	Alt 2 (11 gallinas)	Alt3 31 (Gallinas)
Compra animales	0	\$165,000	\$465,000
Costo de alimentación	0	\$ 647,142	\$ 2'049,502
Otros costos	0	\$25,000	\$50,000
Total	0	837,142	2'564,502

Tabla 3 Costos de producción gallinas para el segundo ciclo productivo de 6 meses de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Para el cultivo de maíz, la mano de obra familiar, el fácil acceso a las semillas, junto con la elección de prácticas de cultivo orgánico implicó que no se consideraran costos asociados a este.

3.2 Beneficios de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) en Garbanzal

A continuación, se presentan los beneficios estimados para cada una de las alternativas propuestas. Estos beneficios, incluyen para el escenario 1 los costos evitados por uso del sistema de aguas lluvias para fines domésticos en todas las alternativas y beneficios asociados a los ingresos derivados de las actividades productivas de pequeña escala (Alt 2 y3). En el escenario 2 se calculan los costos evitados por las actividades domésticas y actividades productivas.

3.2.1 Costos evitados por el uso del sistema de abastecimiento de aguas lluvias para fines domésticos

Para un núcleo familiar compuesto por 4 personas, se estimó un consumo promedio diario de 71 muestran el cálculo de los costos evitados para las actividades domésticas en las tres alternativas, para ambos escenarios, ya que se obtuvieron los mismos costos evitados para el consumo de agua doméstico.

La Tabla 3 presenta un resumen de los costos de la crianza de gallinas. Se consideró que, al finalizar los ciclos productivos en las alternativas 2 y 3, algunas gallinas eran vendidas y otras se conservaban para asegurar la continuidad de la producción de huevos hasta el siguiente ciclo. Los costos de alimentación de las gallinas que siguen produciendo huevos se suman a los costos del próximo ciclo productivo. En promedio, el 20% de los costos está destinado a la adquisición de las pollitas, el 70% a la alimentación requerida y el resto se asigna a otras actividades.

litros/persona de agua para actividades domésticas (Philco, 2021; Requejo, 2019), discriminado por requerimiento de calidad potable y no potable. De acuerdo con los resultados de la encuesta de hogares, se consideró que, las fuentes alternativas al agua lluvia disponibles en la comunidad que podían satisfacer esos usos eran el agua embotellada y el agua subterránea para cubrir la necesidad de agua potable, y el acueducto comunitario para el uso no potable. Con la cantidad de agua prevista para los diferentes usos y el costo promedio que pagan los habitantes por acceder a las fuentes seleccionadas, se determinó la tarifa con la que se calculan los costos evitados domésticos.

La cantidad de agua suministrada por el sistema varía mes a mes debido a la cantidad de precipitaciones que caen durante el año en la región. Teniendo en cuenta la tarifa mensual y el número de m³ que el sistema pudo satisfacer para consumo doméstico al mes, se calcularon los beneficios de agua ahorrada para el primer año. La Tabla 4

En las alternativas 2 y 3 el agua se usa tanto para fines domésticos como productivos, por lo tanto, el agua disponible se distribuye entre estos usos y eso hace que el costo evitado varíe entre las alternativas.

Uso	Cantidad (l/hab*día)	Calidad requerida	Fuente	Demanda anual (m ³ /año)	Costo evitado (\$/año)		
					Alt 1	Alt 2	Alt 3
Beber	2	Potable	Agua embotellada y subterránea	2.9	7,007.2	3,659.3	6,726.8
Cocinar	3	Potable	Agua subterránea	4.3	10,510.8	5,489.1	10,090.2
Ducha y manos	20	Potable	Agua subterránea	29.2	35,036.1	18,296.8	33,634.1
Lavar loza	10	No potable	Acueducto comunitario	14.6	70,072.2	36,593.7	67,268.2
Descarga de inodoros	30	No potable	Acueducto comunitario	43.8	105,108.3	54,890.6	100,902.3
Aseo general	2	No potable	Acueducto comunitario	2.9	7,007.2	3,659.3	6,726.8
Lavado de ropa	4	No potable	Acueducto comunitario	5.8	14,014.4	7,318.7	13,453.6
Total					248,756.3	129,907.9	238,802.1

Tabla 4 Costos evitados para las actividades domesticas de las tres alternativas y escenarios de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal

3.2.2 Costos evitados por el uso del Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) para las actividades productivas

Para el escenario 2, se analizaron los beneficios de las actividades productivas en función del costo evitado por el pago en la factura de la fuente seleccionada para estas actividades. Las gallinas requieren agua de buena calidad. Por lo tanto, se consideró como fuente de suministro el agua subterránea (10,000 \$/m³-mes). En

cuanto al cultivo, en promedio, éste demanda un volumen de 29.9 m³ en las dos cosechas que se realizan en el año (abril y septiembre). Dado que esta cantidad, puede ser suplida por el acueducto comunitario, no se incurrió en costos, ya que actualmente los usuarios no pagan por el servicio de esta fuente. La Tabla 5 muestra el costo evitado en el consumo de gallinas y cultivo en las tres alternativas.

Actividad	Cantidad (l/gallinas*día)	Fuente	Costo de la fuente (\$/m ³)-mes	Demanda anual (m ³ /año)			Costo evitado (\$/año)		
				Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Cría de gallinas	0.2	Agua subterránea	10,000	0	0.83	2.23	0	8,030.1	22,629.9
	Variable durante el ciclo del cultivo	Acueducto comunitario	0	0	29.9	0	0	0	0
Total				0	30.73	2.23	0	8,030.1	22,629.9

Tabla 5 Costos evitados para las actividades productivas de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal en el escenario 2

Se observa que los costos evitados en las actividades productivas son bajos ya que son pocas las gallinas que

se tienen en ambas alternativas y su requerimiento de agua diario es también bajo. Con respecto al cultivo, la

comunidad mencionó que obtenían agua para sus cultivos del acueducto comunitario sin tener que pagar por ella, el inconveniente es que el servicio no es constante.

3.2.3 Beneficios asociados a las actividades productivas

En este apartado se consideraron los beneficios asociados a las actividades productivas y que son calculados para el escenario 1.

Para las gallinas se consideraron los beneficios por la producción de huevo y venta de carne. En promedio, una gallina criolla pone 20 huevos al mes, y empieza su producción a partir de los seis meses. Se tomaron en cuenta imprevistos como enfermedades, pérdida de animales y otros contratiempos, aplicando un descuento del 5%. La Tabla 6 presenta el beneficio anual estimado para las tres alternativas en términos de producción de huevos y carne.

<i>Beneficios actividades productivas para 1 año</i>									
<i>Gallinas</i>	Alt 1			Alt 2			Alt 3		
<i>Detalle</i>	Cantida d	Precio(\$)	Total	Cantidad	Precio Uni	Total	Cantida d	Precio	Total
<i>Huevos</i>	0	0	0	920 huevos	\$ 800	\$ 1'398,000	3,240	\$ 800	\$ 4'924,800
<i>Carne</i>	0	0	0	27.5 kg	\$ 20,000	\$ 1'045,000	77.5	\$ 20,000	\$ 2'945,000
				Total		\$ 2'443,000	Total		\$ 7'869,800
<i>Cultivo</i>	0	0	0	66 kg	\$ 2,600	\$ 171,600	0	0	0
				Total, beneficios		\$ 2'614,858	Total, beneficios		\$ 7'869,800

Tabla 6 Beneficio anual estimado en términos de producción de huevo y carne y mazorcas para el escenario 1 de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

En cuanto al maíz, en la encuesta, los campesinos indicaron tener rendimientos de la siembra de maíz amarillo tradicional de 0.67 ton/hectárea. Este rendimiento es inferior al promedio nacional para los años 2010-2020, 1.83 ton/hectárea (Minagricultura, 2021). Este menor rendimiento se debe a que no se aplican fertilizantes ni riego. Los cálculos realizados por Prieto (2023) indican que, con la implementación del SAAL se puede asegurar el cumplimiento de 88% de toda la demanda de agua necesaria durante el cultivo. Esta mayor disponibilidad de agua para el cultivo, según FENALCE (2022), supondría un incremento de producción del 72%. Esto implicaría un rendimiento de 3.14 ton/hectárea. Así, en la alternativa 2 se obtiene un beneficio final de 33 kilogramos por cada cosecha para los 105 m² de maíz sembrados. De acuerdo con los precios de venta de la mazorca para abril de 2023 (Corabastos,2023), 2600 pesos por

Kilogramo. La Tabla 7 sintetiza todos los beneficios para los dos escenarios y las tres alternativas.

Los resultados muestran que, cuando se elige una actividad agropecuaria de alto valor en el mercado, con pocos requerimientos de agua, se pueden obtener los mejores beneficios, tal es el caso de la alternativa 2 y 3 para el escenario 1 que tienen producción de huevo y carne y donde con poca agua se pueden obtener buenas ganancias. La cuantificación de estos beneficios es importante pues evidencia la necesidad de un enfoque multisectorial, basado en un mejor uso del agua y la aplicación de tecnologías y buenas prácticas en las actividades productivas, para lograr un impacto significativo en el aumento de los beneficios y la reducción de la pobreza en zonas rurales (Dallman et al., 2021; Durodola et al., 2020; Malik et al., 2014).

Beneficios totales para 1 año

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	
<i>Escenario 1</i>	Costos evitados domésticos	\$ 248,756.3	\$ 129,907.9	\$ 238,802.1
	Beneficios actividades productivas	0	\$ 2'614,858	\$ 7'869,800
	Total	\$ 248,756.3	\$ 2'744,765.9	\$ 8'108,602.1
<i>Escenario 2</i>	Costos evitados domésticos	\$ 248,756.3	\$ 129,907.9	\$ 238,802.1
	Costos evitados actividades productivas	\$ 0	\$ 8,030.1	\$ 22,629.9
	Total	\$ 248,756.3	\$ 137,938	\$ 261,432

Tabla 7 Beneficios totales para un año de las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestos para Garbanzal - escenarios 1 y 2

3.3 Relación costo beneficio de los Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias (SAAL) propuestos en Garbanzal

A continuación, se presentan los resultados del ACB para cada una de las tres alternativas evaluadas. Estos resultados fueron obtenidos considerando un periodo de evaluación del proyecto de 25 años, siguiendo las recomendaciones de la literatura (Ngigi, 2005; Sturm et al., 2009a), donde se estipula, tomar como referencia la vida útil del componente principal, en este caso el tanque de almacenamiento. Para la tasa de inflación, se descartó el uso de la media como indicador principal, teniendo en cuenta la notable variabilidad en los datos en los últimos 30 años. En su lugar, se seleccionó una tasa promedio proyectada de inflación para el horizonte temporal del proyecto de 6.5%. Esta estimación tiene en cuenta la información histórica y las perspectivas futuras con el objetivo de obtener una medida más precisa y confiable de la inflación esperada (Banrep,2023).

En cuanto a la tasa de descuento, aún no hay consenso en la teoría económica sobre qué enfoque utilizar para determinar la tasa que mejor se adapte a las decisiones de los agentes económicos (Lara & Franco, 2017). Por lo tanto, se consideraron los dos enfoques más relevantes para evaluar un proyecto: i) perspectiva financiera; y ii) perspectiva económico-social. La óptica privada prioriza los aspectos financieros, en donde se busca maximizar la rentabilidad del inversionista (Deora & Nanore, 2019). La evaluación social se focaliza en los efectos económicos, entendidos éstos como aquellos que afectan la distribución de recursos y la generación de riqueza de la sociedad, sin importar si generan un flujo de fondos o quiénes generan o reciben esos fondos (Jose & Miranda, n.d.).

Para el presente trabajo, la construcción del SAAL en una vivienda se considera como una iniciativa centrada en satisfacer una necesidad social básica: el acceso al agua. Aunque los sistemas son construidos por los propietarios (privados), su propósito no radica en obtener beneficios económicos, sino en satisfacer dicha necesidad en un contexto donde el acceso a otras fuentes de abastecimiento es limitado. Por lo tanto, se considera inviable utilizar métodos de evaluación financiera, como el costo promedio ponderado de capital por sus siglas en inglés (CAPM) para determinar la tasa de descuento. En su lugar, se optó por utilizar un enfoque que reflejara de manera más precisa el objetivo del proyecto.

Se examinaron detalladamente las tasas de descuento utilizadas en los artículos científicos sobre el tema, identificando el contexto en el que se aplicaban y los criterios que tuvieron en cuenta para usarlos. Se observó que, en general, las tasas de descuento son más bajas en los países desarrollados, donde rondan entre el 3 y 4 % (Amos et al., 2016; Melville-Shreeve et al., 2014; Rahman et al., 2012), mientras que, en los países en desarrollo pueden ser hasta del 12%, como lo encontrado en algunos países africanos (Amos et al., 2018; Islam et al., 2010; Ngigi, 2005a; Schürkmann et al., 2014). La elección de las tasas de descuento en estos estudios involucra parámetros económicos como el índice Precios del Consumidor (IPC), la inflación, investigaciones de programas ambientales, comisiones nacionales de desarrollo, tasas de interés del mercado entre otras.

En el caso de Colombia, la revisión mostró gran variedad en las tasas de descuento empleadas. La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2022) reporta que, en las últimas décadas se ha utilizado una tasa del 12%. Sin embargo, teniendo en cuenta que las condiciones económicas del país han cambiado, un estudio reciente del Departamento

Nacional de Planeación (DNP,2022) recomienda, para la evaluación socioeconómica de proyectos ambientales y de recursos naturales, con horizontes entre 6 y 25 años, usar una tasa de descuento del 6.4%.

3.3.1 Relación costo- beneficio para el escenario 1

En el escenario 1, se quiere conocer el impacto de analizar en conjunto los SAAL con las actividades

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
ACB	0.81	1.32	1.45
VAN	\$ -1'379,599.24	\$ 15'810,702.01	\$ 59'023,703.60
TIR	---	21.87%	47.90%

Tabla 8 Relación costo-beneficio y otros indicadores economicos para el escenario 1 en las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Los resultados obtenidos en la alternativa 1 son consistentes con los hallazgos de otros estudios realizados en áreas urbanas (Alim et al., 2020; Dallman et al., 2016b; Hajani & Rahman, 2014; Kim et al., 2016), donde se ha cuantificado únicamente el costo evitado en las tarifas de agua. En estos estudios, las relaciones obtenidas suelen ser inferiores a 1, ya que las bajas tarifas de los acueductos no permiten que se amorticen rápidamente los costos. Aunque en esta investigación se utilizó una tarifa que representa el valor real que paga la comunidad por las otras fuentes y que es casi el doble que las tarifas de los municipios cercanos, se obtienen beneficios mensuales cercanos a los 20 mil pesos. Con una relación ACB de 0.81 y (VAN) de -\$1,379,599.24, se concluye que la alternativa 1 no es económicamente viable durante el período de análisis del proyecto, necesitando más años para amortizar la inversión inicial y cubrir los costos de operación y mantenimiento.

Las alternativas que consideran los beneficios de las actividades productivas mostraron relaciones ACB superiores a 1. En el caso de la alternativa 2, se obtuvo una relación ACB de 1.32 y VAN de \$15,810,702.01. En esta alternativa, tener gallinas para consumo propio

asociadas, incluido el costo evitado para el consumo doméstico. La Tabla 8 muestra la relación ACB encontrada para las tres alternativas en el escenario 1. Además, se incluyen otros indicadores económicos como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) que permiten un análisis más detallado de las alternativas.

resultó en ahorros significativos para la familia al reducir la compra de huevos y carne. En cuanto al cultivo, su impacto en la relación costo-beneficio fue menor debido a la cantidad limitada de maíz que se puede cosechar en las dimensiones del terreno propuestas y su bajo valor de mercado.

La alternativa 3 mostró la mejor relación ACB, con un valor de 1.45, y un VAN cercano a los 60 millones. Estos resultados sugieren que actividades como la venta de huevos y carne, con alto valor en el mercado, tienen un impacto positivo significativo en la economía de campesinos que se dedican a actividades de subsistencia.

3.3.2 Relación costo- beneficio para el escenario 2

En contraparte con el escenario 1, el escenario 2 busca identificar la viabilidad de los sistemas tomando en cuenta únicamente el costo evitado en uso doméstico y en las actividades productivas. La

Tabla 9 muestra que los resultados no fueron alentador

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
ACB	0.81	0.41	0.78
VAN	\$ -1'379,599.24	\$- 4'703,414.39	-\$ 1'755,903.58
TIR	---	---	----

Tabla 9 Relación costo beneficio para el escenario 2 en las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

Las tres alternativas mostraron relaciones costo-beneficio por debajo de uno, siendo la alternativa 2 la que obtuvo la relación más baja, con un valor de 0.41. Dado que este supuesto implica la disponibilidad de fuentes de agua alternativas para satisfacer las necesidades, no se tuvieron en cuenta los beneficios generados por las actividades productivas, sino los costos evitados por no comprar agua.

La alternativa 1 logró una relación de 0.81, mientras que la alternativa 3 obtuvo una relación menor de 0.78. La razón detrás de las relaciones más bajas en las alternativas productivas se debe en gran medida a que una parte significativa del agua se destina a estas actividades, lo que reduce la disponibilidad de agua para los usos domésticos. Si se estableciera un costo por el consumo de agua proveniente del acueducto comunitario, se podrían mejorar las relaciones costo-beneficio, aunque es probable que se requiera aumentar el periodo de vida del proyecto para que alcancen a amortizarse cada uno de los costos involucrados.

El análisis de los 2 escenarios destaca el impacto que tiene la elección de criterios en el análisis económico. Los supuestos seleccionados por cada investigador pueden llevar a resultados divergentes, lo cual explica en gran medida las discrepancias que a menudo se encuentran en los resultados de la literatura (Gines de Rus, 2020).

3.3.3 Análisis de la relación costo beneficio bajo diferentes fuentes de financiación de la inversión inicial

Además de los escenarios previamente descritos, se evaluaron tres propuestas para financiar la inversión inicial del sistema, analizando su impacto en la relación costo-beneficio para el escenario 1, la cual arrojó los mejores indicadores económicos: i) la totalidad del sistema es financiado por recursos de los propietarios; ii) el sistema se financia a través de un crédito; y iii) el gobierno subsidiara la inversión inicial. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Financiación	Alt 1		Alt2		Alt 3	
Capital propio	ACB: 0.8108	VAN: -\$ 1'379,599.24	ACB: 1.32	VAN: \$ 15'810,702.01	ACB: 1.45	VAN: \$ 59'023,703.60
Crédito	ACB: 0.6750	VAN: -\$ 2'845,960.89	ACB: 1.28	VAN: \$ 14'233,598.78	ACB: 1.43	VAN: \$ 57'446,600.36
Subsidiada	ACB: 2.54	VAN: \$ 3'582,784.28	ACB: 1.49	VAN: \$ 21'147,851.35	ACB: 1.51	VAN: \$ 64'360,852.94

Tabla 10 Resultados económicos de las diferentes fuentes de financiamiento para el escenario 1 para las tres alternativas de Sistemas de Aprovechamiento de Aguas Lluvias propuestas para Garbanzal

En zonas de alto estrés hídrico, como Garbanzal, es necesario promover la instalación de sistemas SAAL (Jin et al., 2023). Los resultados de la Tabla 14 muestran que, las entidades gubernamentales desempeñan un papel fundamental al respaldar y promover la implementación de estos sistemas, pues su participación puede marcar la diferencia en la expansión y adopción. En el estudio se observó que, las mejores relaciones costo-beneficio se obtuvieron cuando se aplicó un subsidio a la inversión inicial. Este enfoque tuvo un impacto significativo en los resultados, como se evidencia en el caso de la alternativa 1, donde la relación costo-beneficio pasó de 0.81 a 2.54. Esto demuestra la importancia y el impacto positivo que tiene el subsidio en la viabilidad económica de los proyectos evaluados, resultados

coincidentes con varios estudios en el área (Alim et al., 2020; Jin et al., 2023; Ngigi, 2005b).

En el escenario de financiamiento a través de crédito, la duración de los créditos establecida en 3 años resulta en una reducción de las relaciones costo-beneficio. No obstante, las alternativas con actividades productivas siguen siendo viables.

El valor de implementar un SAAL varía considerablemente dependiendo del contexto. En una ciudad o zonas rurales donde aún no existen restricciones de agua, el impacto de estos sistemas puede no ser tan evidente como en una comunidad rural que carece de opciones para abastecerse adecuadamente. En áreas, donde el suministro de agua

puede ser más accesible y abundante, la implementación de SAAL puede ser vista como una medida preventiva o de mejora a largo plazo. Con el escenario 2 se buscaba evaluar esta situación donde el adoptante aún puede elegir entre varias opciones de suministro. Por lo tanto, en este caso, se consideraron únicamente los costos ahorrados, y casi siempre se obtuvieron relaciones ACB poco alentadoras. El escenario 1 se presenta, enmarcado en un contexto de mayor carencia, donde el tener agua adicional, se ve como una oportunidad para diversificar sus actividades.

La viabilidad de los SAAL es altamente influenciada por el nivel de las precipitaciones en el lugar de implementación. Cuanto mayor sea la cantidad de lluvia, más agua podrá captarse y utilizarse de manera más eficiente en las distintas actividades que lo requieran, aumentando considerablemente los beneficios (Rahman et al., 2012).

3.3.4 Costo de oportunidad

Se analizó la influencia de otra tasa de descuento que refleje el costo de oportunidad que tiene el propietario al elegir entre realizar el sistema o ingresar su dinero a un certificado de depósito a término (CDT 360 días), cuya tasa seleccionada fue de 8.74 EA. El análisis se hizo para el escenario 1, ya que este arrojó las mejores relaciones costo-beneficio. Se comprobó la viabilidad de las tres alternativas al trabajar con esta tasa de descuento, evidenciando que, al ser mayor la tasa de descuento la relación decreció en cada una de estas, pero aun con este incremento en la tasa las alternativas con actividades productivas siguieron siendo favorables.

3.3.5 Análisis de sensibilidad

Se encontró que, ninguna distribución paramétrica de uso en el software Minitab era adecuada debido a la alta variabilidad experimentada por la inflación en el período analizado. Por lo tanto, se utilizó un rango de sensibilidad de 3.5 a 9%, en concordancia con lo encontrado en otras investigaciones (Amos et al., 2016; Jin et al., 2023). El intervalo de sensibilidad con el que se trabajó para la tasa de descuento fue de 3.5 a 9.5% según recomendaciones del DNP (2022).

En concordancia con la literatura (Birol et al., 2006; Hajani & Rahman, 2014b; Jin et al., 2023), se encontró que, a medida que la tasa de descuento disminuye, la

relación costo-beneficio tiende a aumentar. En el caso de la alternativa 1, se identificó un punto de inflexión aproximadamente alrededor del 4% de tasa de descuento, a partir del cual la implementación del sistema deja de ser factible. A medida que la tasa de descuento aumenta, la viabilidad de la alternativa disminuye, llegando a una relación costo-beneficio de 0.63 para una tasa de descuento del 9.5%. En cuanto a las otras dos alternativas, debido al impacto positivo de las actividades productivas, lograron mantener relaciones costo-beneficio positivas en todo el rango propuesto.

Al analizar conjuntamente el comportamiento de la inflación y la tasa de descuento en función a la relación ACB, se observó una tendencia en la cual se encontraron relaciones más significativas cuando la tasa de descuento era menor y la inflación mayor tal como lo encontrado en otros estudios (Jin et al., 2023; Liang & Van Dijk, 2011). La Figura 4 muestra que, a mayor tasa de inflación y menor tasa de descuento se encuentran las mejores relaciones. En el ACB hay que tener precaución al determinar la inflación y las tasas de descuento. Otorgar una tasa de descuento alta puede conducir a menor valoración de los activos ambientales y pérdida de la equidad intergeneracional. Por otro lado, la tendencia conservadora de aplicar bajas tasas de descuento a proyectos a largo plazo refleja incertidumbre sobre el futuro (Jing et al., 2017a).

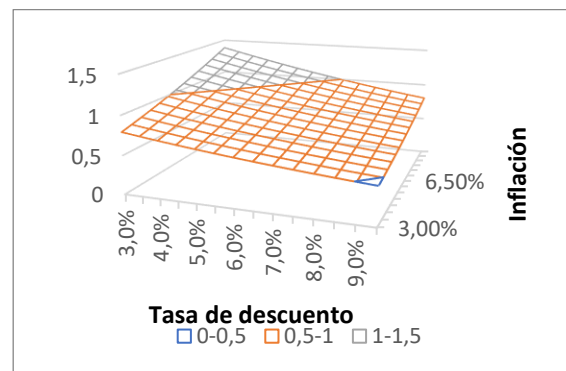


Figura 4 Comportamiento de la relación costo-beneficio en función de la tasa de descuento y la inflación para la alternativa 1

Conclusiones.

La vereda Garbanzal en Santander ha adoptado el uso generalizado de Sistemas de Aprovechamiento de Agua de Lluvia (SAAL) como principal fuente de abastecimiento de agua para fines domésticos y productivos. Estos sistemas han sido implementados empíricamente por los habitantes, por lo que son susceptibles de mejora, desde el punto de vista técnico. Por lo tanto, considerando el contexto y las necesidades de agua para fines domésticos y productivos, se propusieron tres alternativas de sistemas mejorados para la vereda, con su respectiva evaluación económica.

La evaluación económica, a través del análisis costo-beneficio, abordó dos escenarios de análisis para identificar el impacto de los supuestos en los resultados, escenario 1 con mayor estrés hídrico y escenario 2 con disponibilidad de otras fuentes para suplir las necesidades.

En el escenario 1, los beneficios considerados fueron el costo evitado por la tarifa para consumo doméstico, y los beneficios de las actividades productivas fruto de una mayor disponibilidad de agua otorgada por el SAAL. Las alternativas que permitan el desarrollo de actividades productivas obtuvieron relaciones costo beneficio por encima de 1, debido a la cuantificación de ganancias adicionales que el SAAL aportó a la economía familiar.

En el escenario 2, donde se consideró que había acceso al agua a través de diversas fuentes, el beneficio analizado fue el costo evitado en la tarifa tanto para consumo doméstico como para las actividades productivas. En este caso, los SAAL fueron no viables económicamente debido a las bajas tarifas pagadas para acceder a las otras fuentes. Esto ocasiona que la inversión inicial junto con los costos continuos asociados a los SAAL no se amorticen rápidamente.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar no solo los beneficios directos del consumo doméstico, sino también los beneficios indirectos y económicos de las

actividades productivas impulsadas por una mayor disponibilidad de agua. En este caso, bajo las características de diseño propuestas en las alternativas, el comportamiento de las precipitaciones de la región y la elección de parámetros económicos, los resultados respaldan la viabilidad económica de SAAL en zonas afectadas por sequías y estrés hídrico, ya que demuestran que los beneficios superan los costos asociados, pero se destaca, desde el punto de vista económico, la importancia de que el agua disponible para fines productivos sea usada, preferiblemente, en actividades de alto valor comercial.

Se corroboró el impacto de los supuestos y la elección de parámetros importantes en el ACB como la tasa de descuento, la vida útil del proyecto y la inflación. El análisis de sensibilidad mostró que las tasas de descuento más bajas y tasas de inflación más altas generan mejores relaciones costo beneficio. No obstante, es imprescindible realizar la correcta elección de estas tasas, acorde con los objetivos del proyecto. No existe una metodología claramente definida para elegir estos parámetros, lo que a menudo implica subjetividad del investigador. Esta subjetividad puede conducir a relaciones costo-beneficio contradictorias.

Al capitalizar los sistemas con crédito, se incurre en costos de financiamiento que pueden afectar la viabilidad del sistema, dependiendo de la tasa de interés pactada. Los sistemas en donde se subsidia la inversión inicial mejoran significativamente las relaciones costo beneficio debido a que los costos de mantenimiento y operación tienden a ser bajos. Esto podría ser una estrategia efectiva para mejorar la calidad de vida de muchas personas en ambientes rurales áridos.

En el contexto del caso de estudio, el escenario con mejor relación costo beneficio fue el sistema con inversión inicial subsidiada por el gobierno, con uso de agua para actividades domésticas y productivas de alto valor (alternativa 3), en donde se tienen gallinas que demandan poca agua y generan mejor rentabilidad en comparación con el cultivo de maíz.

Referencias

- Abdulla, F. (2020). Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446–456. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648530>
- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129–2137. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>
- Alim, M. A. M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M. M. M., & Shirin, S. (2020). Feasibility analysis of a small-scale rainwater harvesting system for drinking water production at Werrington, New South Wales, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122437>
- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2016). Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A Review of the Global Situation with a Special Focus on Australia and Kenya. In *Water (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w8040149>
- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2018). Economic analysis of rainwater harvesting systems comparing developing and developed countries: A case study of Australia and Kenya. *Journal of Cleaner Production*, 172, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.114>
- ANLA. (2018). *Guía para la inclusión del Análisis Costo Beneficio en la matriz multicriterio para selección de la alternativa en el Diagnostico Ambiental de Alternativas*.
- Briceño, C., & Chaparro, D. (2022). *ANÁLISIS DE LA ACEPTACIÓN SOCIAL DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN LA ZONA RURAL DE LOS SANTOS, SANTANDER (1)*.
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2016a). The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems. *Water Resources Management*, 30(12), 4415–4428. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1429-0>
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2016b). The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems. *Water Resources Management*, 30(12), 4415–4428. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1429-0>
- Dallman, S., Chaudhry, A. M., Muleta, M. K., & Lee, J. (2021). Is Rainwater Harvesting Worthwhile? A Benefit-Cost Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001361](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001361)
- Deora, S., & Nanore, G. (2019). Socio economic impacts of Doha Model water harvesting structures in Jalna, Maharashtra. *Agricultural Water Management*, 221, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.007>
- DNP. (2022). *Justificación técnica - Tasa social de descuento*.
- Durodola, O. S., Bwambale, J., & Nabunya, V. (2020). Using every drop: Rainwater harvesting for food security in Mbale, Uganda. *Water Practice and Technology*, 15(2), 295–310. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.019>
- Estupiñan y Zapata. (2010). *Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*.

- FAO. (2021). Making climate-sensitive investments in agriculture. In *Making climate-sensitive investments in agriculture*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1067en>
- Florez. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE LA COBERTURA Y ABASTECIMIENTO DEL SERVICIO PÚBLICO DE AGUA*.
- Gómez, & Molina. (2016). *IABILIDAD FINANCIERA Y BENEFICIOS AMBIENTALES DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA NO CONVENCIONALES EN LA ZONA URBANA DE PEREIRA*.
- Hajani, E., & Rahman, A. (2014). Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water (Switzerland)*, 6(4), 945–960. <https://doi.org/10.3390/w6040945>
- Hatibu, N., Mutabazi, K., Senkondo, E. M., & Msangi, A. S. K. (2006). Economics of rainwater harvesting for crop enterprises in semi-arid areas of East Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1-3 SPEC. ISS.), 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.005>
- Islam, M. M., Chou, F. N. F., & Kabir, M. R. (2011). Feasibility and acceptability study of rainwater use to the acute water shortage areas in Dhaka City, Bangladesh. *Natural Hazards*, 56(1), 93–111. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9551-4>
- Islam, M. M., Chou, F. N.-F., & Kabir, M. R. (2010). Acceptability of the rainwater harvesting system to the slum dwellers of Dhaka City. *Water Science and Technology*, 61(6), 1515–1523. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.049>
- Jin, Y., Lee, S., Kang, T., Park, J., & Kim, Y. (2023). Capacity Optimization of Rainwater Harvesting Systems Based on a Cost–Benefit Analysis: A Financial Support Program Review and Parametric Sensitivity Analysis. *Water (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010186>
- Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017a). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 126(March), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>
- Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017b). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>
- Jose, J., & Miranda, M. (n.d.). *GESTION DE PROYECTOS IDENTIFICACION-FORMULACION EVALUACIÓN FINANCIERA-ECONÓMICA-SOCIAL-AMBIENTAL*.
- Kim, H. W., Li, M.-H., Kim, H., & Lee, H. K. (2016). Cost-benefit analysis and equitable cost allocation for a residential rainwater harvesting system in the city of Austin, Texas. *International Journal of Water Resources Development*, 32(5), 749–764. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1073142>
- Lara, I., & Franco, O. (2017). Analisis del costo-beneficio una herramienta de gestion. *Contribuciones a La Economía*, 2017–02.
- Liang, X., & Van Dijk, M. P. M. P. M. P. (2011). Economic and financial analysis on rainwater harvesting for agricultural irrigation in the rural areas of Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.009>
- Malik, R. P. S., Giordano, M., & Sharma, V. (2014). Examining farm-level perceptions, costs, and benefits of small water harvesting structures in Dewas, Madhya Pradesh.

- Agricultural Water Management*, 131, 204–211.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.002>
- Melville-Shreeve, P., Ward, S., & Butler, D. (2014). A preliminary sustainability assessment of innovative rainwater harvesting for residential properties in the UK. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 30(2), 135–142.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7985.2014.02.001>
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2012). Financial feasibility and environmental analysis of potential rainwater harvesting systems: A case study in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 69(2012), 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.014>
- Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2015). Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.021>
- Mwenge Kahinda, J. marc, Taigbenu, A. E., & Boroto, J. R. (2007). Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 1050–1057. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.007>
- Ngigi, S. N. (2005a). Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. *Agricultural Water Management*, 73(1), 21–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.021>
- Ngigi, S. N. (2005b). Hydro-economic evaluation of rainwater harvesting and management technologies: Farmers' investment options and risks in semi-arid Laikipia district of Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(11-16 SPEC. ISS.), 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.020>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M. L., & Zaraza-Peña, J. M. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Philco. (2021). *UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL TESIS PRESENTADO POR.*
- Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. A. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.002>
- Requejo. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL.*
- Rincón y Mendoza. (2016). *Evaluación de la viabilidad social, técnica y económica de la implementación de un sistema de recolección, tratamiento y aprovechamiento de aguas de lluvia y aguas grises en un proyecto de vivienda de interés social.*
- Rivera y Zaraza. (2016). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Schürkmann, A. K., Biewald, A., & Rolinski, S. (2014). A Global Approach to Estimating the Benefit-Cost Ratio of Water Supply Measures in the Agricultural Sector. In *The Global Water System in the Anthropocene* (pp. 73–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07548-8_6
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia.

Physics and Chemistry of the Earth, 34(13–16), 776–785.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.07.004>

- Zaraza y Peña. (2018). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19200–19216. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8710-5>
- Zingiro, A., Okello, J. J. J. J. J. J. J. J., & Guthiga, P. M. P. M. P. M. (2014). Assessment of adoption and impact of rainwater harvesting technologies on rural farm household income: the case of rainwater harvesting ponds in Rwanda. *Environment, Development and Sustainability*, 16(6), 1281–1298. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9527-8>