

Desarrollo de un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas para la gestión de agua potable en Paimadó–Río Quito

Development of a System Dynamics-Based Simulation Model for Potable Water Management in Paimadó – Río Quito

 Cristian Deofanor Hinestroza Moreno;   Lubin Delgado Arroyo;  Rosember Ramírez Garrido¹

¹Universidad Tecnológica del Chocó Diego Luis Córdoba, Quibdó-Colombia

Correspondencia: lubin.delgadoa@utch.edu.co

Recibido: 24 Abril 2025

Aceptado: 15 Octubre 2025

Disponible: 22 Octubre 2025

Cómo citar / How to cite

C. D. Hinestroza Moreno, L. Delgado Arroyo, and R. Ramírez Garrido, "Desarrollo de un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas para la gestión de agua potable en Paimadó–Río Quito," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 64, e3470, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3470>



Resumen

El acceso equitativo al agua potable constituye uno de los desafíos más críticos en comunidades rurales de Colombia, donde las brechas sociales y ambientales limitan la sostenibilidad del recurso. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas para evaluar la gestión del acceso al agua potable en la comunidad de Paimadó, municipio de Río Quito. La metodología se fundamentó en la construcción de un modelo conceptual que integró cuatro subsistemas: oferta hídrica, demanda, calidad del agua y costos de acceso, que posteriormente se formalizaron mediante diagramas de niveles y flujos. El horizonte de simulación comprendió el periodo entre 2024 y 2040, en el cual se evaluaron tres escenarios prospectivos (optimista, moderado y pesimista), considerando variaciones en el crecimiento poblacional, la actividad minera y la infraestructura de potabilización. Los resultados mostraron que, en la simulación base, la demanda de agua aumentó de manera sostenida hasta alcanzar 1 031 690 m³/año en 2040, mientras que la oferta presentó una disminución significativa debido al impacto de la minería, lo que generó riesgos de escasez y altos costos para los hogares. En el escenario optimista, con control ambiental y fortalecimiento del sistema de acueducto, se observó cobertura suficiente y reducción del gasto familiar en agua hasta valores cercanos al 0.18 % del ingreso. El escenario moderado reflejó cierta estabilidad inicial, aunque con riesgos de déficit hacia el final del horizonte, mientras que el pesimista evidenció un déficit superior al 50 % de la demanda y un gasto familiar mayor al 33 % del ingreso. Finalmente, se concluye que la dinámica de sistemas constituye una herramienta clave para representar de manera precisa las interacciones entre oferta, demanda, calidad y costos, permitiendo proyectar escenarios y orientar estrategias de gestión que garanticen la sostenibilidad hídrica en comunidades rurales.

Palabras clave

Abastecimiento de agua potable, dinámica de sistemas, impacto de la minería aurífera, gestión de recursos hídricos, sostenibilidad hídrica.

Abstract

Equitable access to drinking water remains one of the most pressing challenges in rural communities in Colombia, where social and environmental gaps restrict the sustainability of this resource. This study aimed to develop a simulation model based on the dynamics of the system to evaluate the management of access to drinking water in the community of Paimadó, municipality of Río Quito. The methodology was based on the construction of a conceptual model that integrated four subsystems: water supply, demand, quality, and access costs, which were subsequently formalized through stock-and-flow diagrams. The simulation horizon covered the period between 2024 and 2040, in which three prospective scenarios (optimistic, moderate, and pessimistic) were evaluated considering variations in population growth, mining activity, and water treatment infrastructure. The results showed that in the baseline simulation, water demand increased steadily, reaching 1 031 690 m³/year in 2040, while supply decreased significantly due to the impact of mining, generating risks of scarcity and high household costs. In the optimistic scenario, with environmental control and strengthened aqueduct infrastructure, adequate coverage was observed along with a reduction of household water expenditure to nearly 0.18% of income. The moderate scenario reflected initial stability, although with risks of deficit toward the end of the horizon, whereas the pessimistic scenario evidenced a deficit of more than 50% of demand and household expenditure exceeding 33% of income. Finally, it is concluded that system dynamics is a key tool to accurately represent the interactions among supply, demand, quality, and costs, enabling the projection of scenarios and the design of management strategies that ensure water sustainability in rural communities.

Keywords

Water resources management, system dynamics, gold mining impact, drinking water supply, water sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable es uno de los retos más significativos a escala mundial, constituyendo un elemento esencial para la salud pública, la equidad social y el desarrollo sostenible [1], [2]. Aunque el agua es un derecho humano reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas, cerca de 844 millones de individuos a nivel global no tienen acceso a servicios seguros de suministro de agua potable. Es importante destacar que esta problemática afecta de manera desproporcionada a las comunidades rurales y dispersas en comparación con las zonas urbanas, donde los niveles de cobertura son significativamente mayores [2]-[5].

En América Latina y el Caribe, la cobertura de agua para consumo sigue siendo insuficiente, con una brecha del 13 % entre las zonas rurales y urbanas [2]. En el caso específico de Colombia, esta diferencia es aún más pronunciada, alcanzando los 46 puntos porcentuales [6], [7]. Además, en 708 municipios del país, la cobertura de acceso a agua potable no supera el 75 % de la población, lo que evidencia las desigualdades persistentes en la distribución de este recurso esencial [6].

El municipio de Río Quito, en su cabecera municipal Paimadó el sistema de acueducto abarca aproximadamente el 83.76 % de la población. Sin embargo, este sistema no garantiza la potabilidad del agua, lo que obliga a los habitantes a recurrir a fuentes alternativas como aguas lluvias, ríos, arroyos y lagos que carecen de tratamiento sanitario adecuado [8]. A ello se suma que más del 79 % de los hogares manifiestan insatisfacción con la gestión del recurso hídrico, lo que refleja deficiencias estructurales en la provisión del servicio.

En esta comunidad, el acceso al agua potable se ha visto gravemente afectado por el impacto de diversas actividades humanas, especialmente la minería aurífera y la deforestación a gran escala. Estas prácticas han reducido tanto la disponibilidad como la calidad del agua, generando consecuencias directas en la salud de la población, la economía local y las condiciones de vida en general [8]-[10].

Uno de los problemas más preocupantes es la contaminación de los cuerpos de agua con metales pesados, lo que obliga a muchas familias a recorrer largas distancias para abastecerse, llegando a invertir hasta tres horas diarias en esta tarea. En áreas rurales, más del 80 % de las fuentes de agua municipales se apoyan en pequeñas fuentes de agua, como arroyos y quebradas, que no aseguran un abastecimiento continuo ni seguro [11]-[13]. Esto ha llevado a

que más del 70 % de la población tenga que destinar parte de sus ingresos a la compra de agua potable, afectando su economía y limitando su acceso a otros servicios esenciales.

Ante este panorama, es urgente implementar estrategias de gestión eficiente que permitan mejorar la cobertura y la calidad del servicio de agua, cerrando las brechas de desigualdad y garantizando el derecho fundamental al acceso a este recurso. Asimismo, es crucial proteger los ecosistemas locales para asegurar la sostenibilidad de los recursos acuáticos a largo plazo y su accesibilidad para las futuras generaciones [14]-[17].

La investigación científica juega un papel determinante en la identificación de soluciones para estos problemas, proporcionando información clave para el desarrollo de políticas públicas más efectivas y el fortalecimiento de la gestión del agua. Integrar metodologías innovadoras en la administración de este recurso es fundamental para lograr un uso más eficiente y sostenible.

En este contexto, la dinámica de sistemas se ha convertido en una herramienta valiosa, ya que permite modelar y analizar escenarios complejos para entender mejor las interacciones entre distintas variables que influyen en la disponibilidad y calidad del agua [18], [19]. A nivel internacional, esta metodología ha sido utilizada en múltiples estudios para proyectar escenarios futuros y diseñar estrategias sostenibles. En el caso de China, se ha aplicado para evaluar el impacto del crecimiento poblacional y el cambio climático en la demanda de agua, mientras que en Nigeria ha servido para estimar los costos asociados al transporte y suministro [20], [21]. En Suiza, su uso ha permitido analizar factores que afectan la gestión del agua en la cuenca Usseød, identificando estrategias de optimización [22].

En América Latina, esta metodología también ha sido implementada en diversas investigaciones. En México, se ha utilizado para estudiar la relación entre la gestión del agua, la población y las instituciones en el estado de Tabasco [23]. En Colombia, un estudio en la microcuenca de la quebrada Piedras Blancas, en Antioquia, aplicó este enfoque para examinar variables como la precipitación, la evapotranspiración y el balance hídrico [24]. Estos casos evidencian la utilidad de la dinámica de sistemas para analizar y abordar problemas hídricos en diferentes contextos, convirtiéndose en una referencia para la presente investigación.

A pesar de los avances en la modelación de sistemas hídricos, Paimadó aún no cuenta con herramientas de simulación que permitan integrar los múltiples factores que afectan su sistema de abastecimiento de agua. La expansión de la minería, el aumento de los costos para acceder al recurso y la falta de infraestructura continúan dificultando su disponibilidad.

Se puede describir el sistema de abastecimiento de agua en Paimadó como una red de subsistemas que dependen unos de otros y que, en su totalidad, establecen la accesibilidad, calidad y disponibilidad del recurso. El modelo conceptual inicial, antes de que se implementen las estrategias de gestión, incluye cuatro subsistemas fundamentales como calidad del agua, costos de acceso, demanda de agua y oferta hídrica [25], [26]. La infraestructura de captación y almacenamiento, así como la disponibilidad natural, condicionan la oferta hídrica debido a la demanda que está sujeta a aspectos como el crecimiento poblacional, el número de viviendas y los usos productivos [25]-[27]. La calidad de agua se ve afectada por la presencia de sedimentos y metales pesados [28], [29]. Los costos de acceso incluyen tanto los monetarios, como el tiempo y el esfuerzo para recolectarla [21].

Estos subsistemas son afectados por variables externas e internas. Por ejemplo, las fluctuaciones en la actividad minera, la temperatura, las políticas públicas y los patrones de precipitación constituyen factores externos, mientras que el volumen de agua de lluvia recolectada, la satisfacción del cliente, las pérdidas en la red de acueducto y el consumo per cápita se clasifican como elementos internos [30], [31]. Las interacciones entre estas variables crean ciclos de retroalimentación, ya sean positivos, donde la demanda se eleva y los costos de acceso aumentan debido al crecimiento poblacional, y ciclos negativos, que muestran acciones conservadoras que disminuyen la presión sobre la oferta, lo que estabiliza el sistema [31]-[33]. Según investigaciones recientes, estos ciclos son cruciales para dar prioridad a las intervenciones que mejoren la accesibilidad y la sostenibilidad del recurso [32], [33].

En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas que permita evaluar el acceso al agua potable en la comunidad, proyectar posibles escenarios futuros y ofrecer una herramienta integral que facilite la toma de decisiones para mejorar la gestión de este recurso. La implementación de este modelo permitirá comprender las dinámicas del sistema hídrico local y formular estrategias para mejorar la sostenibilidad y equidad en la gestión del recurso en Paimadó.

2. METODOLOGÍA

2.1 Ubicación y demografía de la zona de investigación

La zona de investigación está situada en Paimadó, cabecera municipal de Río Quito, Chocó, en la región del Pacífico colombiano (ver Figura 1). Se ubica en la parte baja de la subcuenca del río Quito, en el límite izquierdo del río Atrato, con $5^{\circ}25'00''$ de latitud norte, $76^{\circ}40'00''$ de longitud oeste y una altitud media de 45 metros sobre el nivel del mar.

Al norte se encuentra Quibdó, al sur se encuentran el Cantón del San Pablo y Certeguí, al este se encuentra Atrato (Yuto) y al oeste está el Alto Baudó. Paimadó se encuentra a más de tres horas de Quibdó y se puede acceder navegando por el río Quito o mediante un tramo vial de 8.5 km que conecta con la carretera Unión Panamericana Las Ánimas-Nuquí [8], [34], [35].

Según TerriData (Sistema de Estadísticas Territoriales), en 2024 el municipio de Río Quito cuenta con aproximadamente 9,158 habitantes, de los cuales 4,803 (52.40 %) son mujeres y 4,355 (47.60 %) hombres. Su cabecera municipal, Paimadó, tiene una población de 2,335 habitantes.

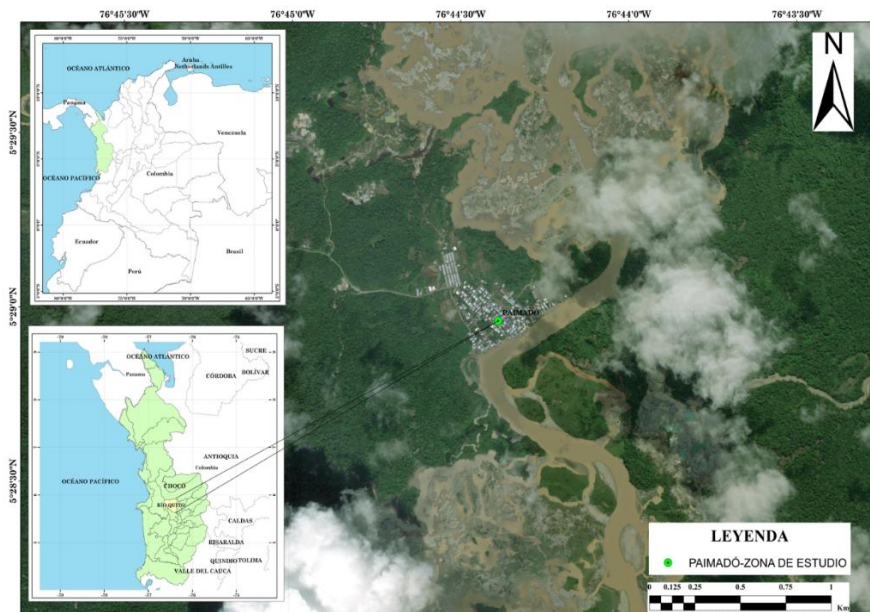


Figura 1. Ubicación geográfica de Paimadó – Río Quito, Chocó. Fuente: elaboración propia.

2.2 Descripción metodológica

Para desarrollar este estudio, se ha diseñado una metodología estructurada en varias fases sucesivas, con el objetivo de analizar la gestión integral de los recursos acuáticos en la cabecera municipal de Paimadó – Río Quito. Cada fase responde a una necesidad específica dentro del proceso de modelación y análisis del sistema hídrico.

Fase 1: Se lleva a cabo una recopilación y exploración de información relevante, con el propósito de establecer una base de datos sólida para la modelación del sistema.

Fase 2: Se identifican y describen los principales componentes del sistema, estableciendo las interacciones entre ellos mediante relaciones causales que explican su funcionamiento.

Fase 3: Se desarrolla el modelo de gestión del agua potable aplicando la metodología de dinámica de sistemas, lo que permite representar la estructura del problema y sus factores determinantes.

Fase 4: Se implementa y valida el modelo a través de la simulación de escenarios reales, con el fin de evaluar las hipótesis planteadas y analizar la viabilidad de las soluciones propuestas.

2.2.1 Determinación de componentes, vínculos y retroalimentación sobre el manejo del agua

La gestión de los recursos hídricos en Paimadó está influenciado por diversos factores ambientales, sociales y económicos, los cuales determinan su disponibilidad y calidad. Para comprender estas dinámicas, el modelo identifica siete ciclos de refuerzo (R1-R7) y dos ciclos de balance (B1, B2), que se ilustran en la Figura 2.

Los ciclos de refuerzo intervienen en la regulación de oferta agua, demanda de agua, así como en el impacto de actividades como la minería y la aplicación de políticas ambientales. En contraste, los ciclos de balance cumplen un papel fundamental en la estabilidad del sistema, asegurando una distribución más equitativa y sostenible del recurso. Este enfoque metodológico permite visualizar las interacciones dentro del sistema hídrico de Paimadó, facilitando la formulación de estrategias para mejorar su gestión y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

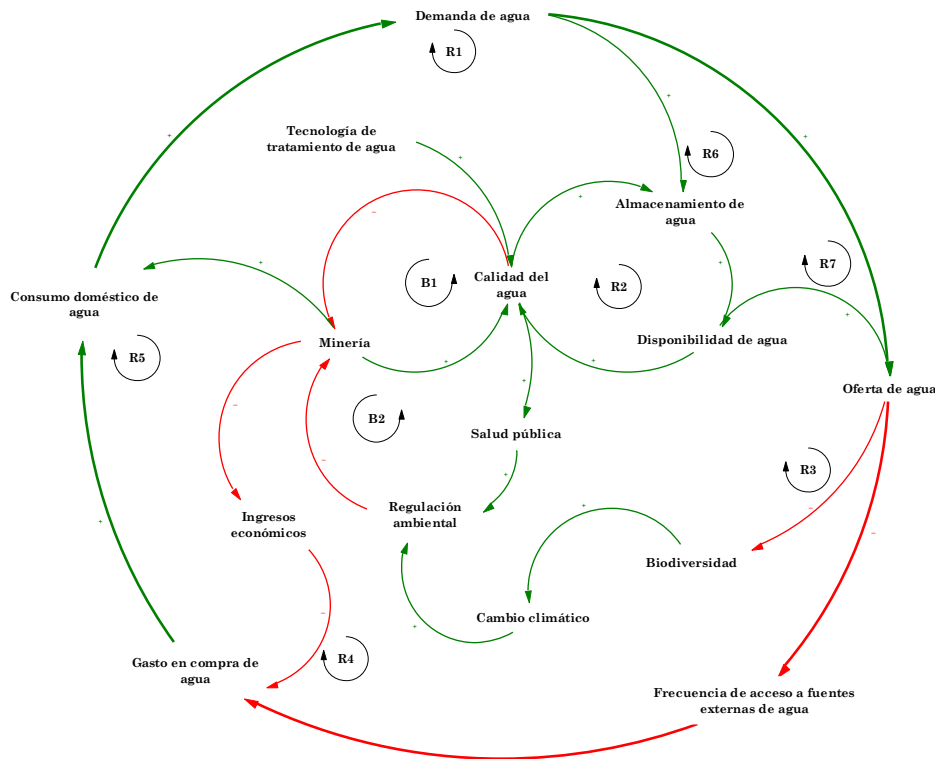


Figura 2. Representación de la hipótesis dinámica para la gestión del agua en Paimadó – Río Quito. Fuente: elaboración propia.

El sistema de gestión del agua en Paimadó es complejo y está influenciado por múltiples factores ambientales, sociales y económicos que interactúan entre sí. Estos factores determinan la disponibilidad y calidad del agua, lo que a su vez impacta el bienestar de la comunidad. Los ciclos identificados en el modelo evidencian la importancia de regular la oferta del recurso, fortalecer las políticas ambientales y garantizar su calidad, todo ello con el objetivo de minimizar los efectos adversos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad.

2.2.2 Ciclos de retroalimentación de refuerzo

Los ciclos de refuerzo en la gestión del agua juegan un papel clave, ya que amplifican los cambios dentro del sistema. Dependiendo de las condiciones, estos efectos pueden ser beneficiosos o perjudiciales, acelerando mejoras en la disponibilidad del recurso o agravando su escasez. Estos ciclos funcionan a través de un mecanismo de retroalimentación, donde una acción inicial desencadena una serie de cambios que, al repetirse, refuerzan su impacto [36], [37], [38]. Por ejemplo, si se mejora la calidad del agua mediante un mejor tratamiento, esto aumenta su disponibilidad y accesibilidad, lo que incentiva su uso adecuado y fortalece la sostenibilidad del sistema. En contraste, si la actividad minera sigue expandiéndose sin control, los cuerpos de agua se contaminan, incrementando los costos de acceso al recurso y generando una mayor presión económica en la población.

En la Figura 3, se presentan los bucles de refuerzo identificados (R1 a R7), los cuales reflejan la relación entre la oferta de agua, la demanda de agua, la calidad del recurso, las tecnologías de tratamiento, la biodiversidad y los factores económicos y ambientales. Comprender estas interacciones es clave para diseñar estrategias efectivas que permitan intervenir en puntos críticos del sistema y mejorar la gestión del agua en la comunidad de manera sostenible.

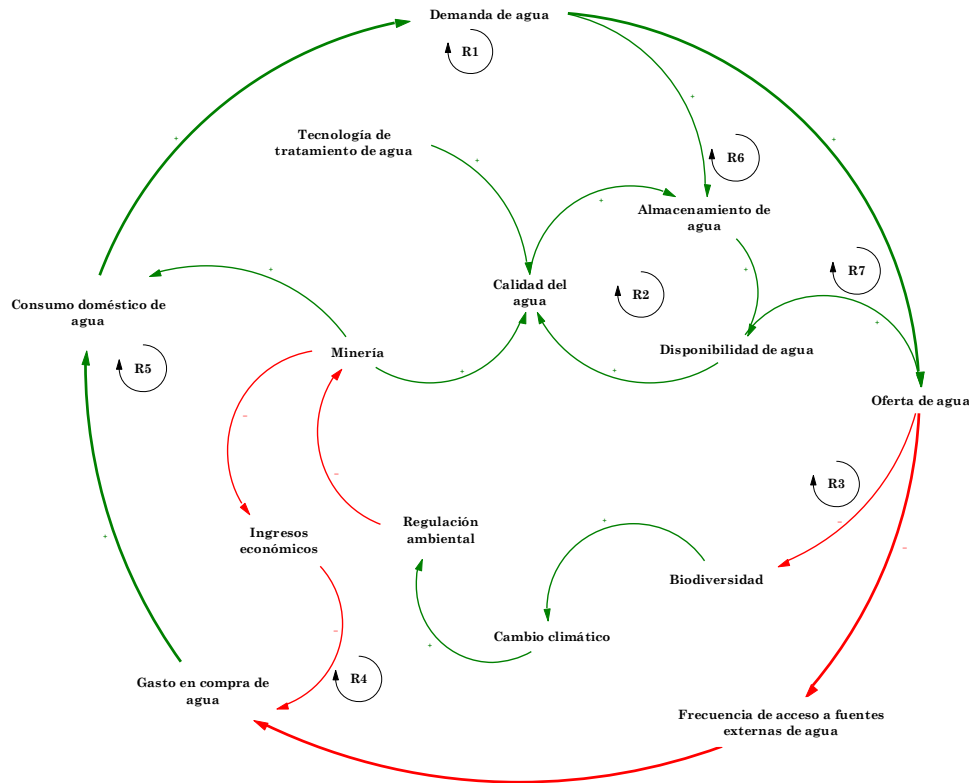


Figura 3. Ciclos de refuerzo (R1-R7) en la gestión del agua. Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Demanda, oferta y consumo doméstico de agua (R1, R6, R7)

Esta sección abarca los ciclos de refuerzo que influyen en la demanda, la oferta y el consumo de agua en los hogares. A través de estos ciclos, se puede observar cómo el crecimiento poblacional y la necesidad de acceso al agua generan efectos que impactan el sistema de manera continua.

El ciclo R1 (demanda y oferta interconectadas) muestra que, a medida que la demanda de agua aumenta, es necesario expandir la oferta para satisfacer las demandas de la comunidad. Esto permite reducir la dependencia de fuentes externas y, al mismo tiempo, disminuir los costos asociados a la compra de agua. Con un menor gasto en la adquisición del recurso, los hogares pueden acceder a un mayor consumo, lo que a su vez refuerza la demanda inicial y mantiene el ciclo en movimiento.

Por otro lado, el ciclo R6 (almacenamiento como regulador) señala que cuando la demanda de agua crece, también se fomenta la capacidad de almacenamiento. Un mayor almacenamiento mejora la disponibilidad del recurso y fortalece la oferta, asegurando un suministro más estable para la comunidad y contribuyendo a una gestión más eficiente del agua a largo plazo. Así mismo, el refuerzo R7 (eficiencia en el consumo doméstico), ilustra una mayor accesibilidad y disminución de gastos que promueve un incremento en el uso de agua en el hogar donde destaca la importancia de infraestructuras eficientes y accesibles para maximizar los beneficios del ciclo

2.2.4 Biodiversidad, regulaciones ambientales y calidad del agua (R2, R3, R4, R5)

El conjunto de estos ciclos resalta el efecto ambiental y el estado del recurso hídrico en el sistema, donde el refuerzo R2 (calidad y almacenamiento como garantía de disponibilidad) juegan un papel central. Este refuerzo indica que la mejora en las condiciones del agua permite que los hogares puedan almacenar más agua aumentando la disponibilidad de agua, este ciclo tiene una relación directa entre la calidad del recurso y la resiliencia de las comunidades frente a la escasez.

Los refuerzos R3, R4 y R5 (Impactos de la oferta en la biodiversidad), están interconectados entre sí, el ciclo R3, significa que un crecimiento en la oferta de agua reduce la biodiversidad debido a la presión sobre los ecosistemas, esto intensifica el cambio climático aumentando la necesidad de que haya regulaciones ambientales, las regulaciones disminuyen la minería, mejorando la calidad del agua y, a su vez, la oferta. Por otra parte, el refuerzo R4, en un escenario similar, la disminución de la minería afecta los ingresos de la población, limitando su capacidad de compra de agua, promoviendo un consumo doméstico con más frecuencia, lo que incrementa nuevamente la demanda. De manera complementaria, el refuerzo R5, representa un mayor control sobre la minería generando condiciones para un aumento del consumo doméstico, lo que refuerza la demanda y la necesidad de mantener una oferta constante.

2.2.5 Ciclos de balances B1 y B2

En el modelo dinámico de la gestión del agua en Paimadó – Río Quito, los ciclos de balance representan mecanismos de autorregulación que estabilizan el sistema. A diferencia de los ciclos de refuerzo, cuyo efecto es amplificar los cambios, los ciclos de balance intentan mantener un equilibrio frente a las perturbaciones externas, como las actividades mineras, o frente a cambios internos, como la implementación de tecnologías para el tratamiento de agua o la mejora en la salud pública [36], [37], [39].

Como se ilustra en la Figura 4, los dos ciclos de balance identificados (B1 y B2) se enfocan en la conexión entre la minería, las condiciones del agua, la salud pública y las normativas medioambientales, evidenciando cómo estos elementos colaboran para atenuar los efectos adversos y estabilizar el sistema.

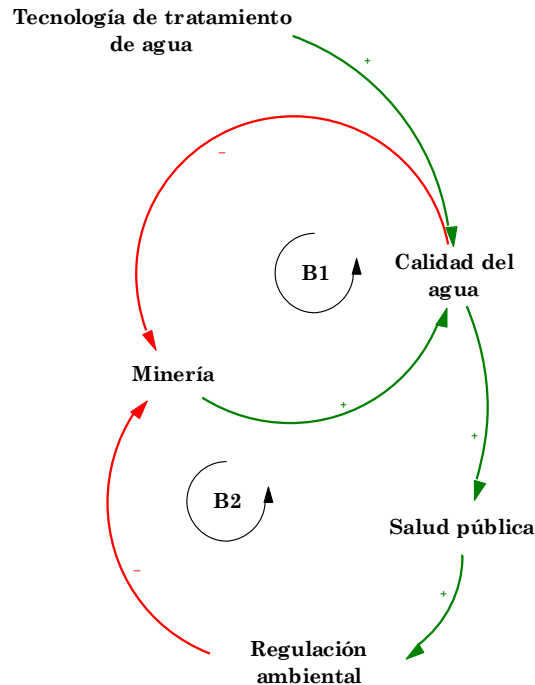


Figura 4. Ciclos de balance (B1 y B2): autorregulación del sistema hídrico. Fuente: elaboración propia.

El ciclo de balance B1 (Regulación de la minería a través de la calidad del agua), muestra cómo una disminución de las actividades mineras mejora la calidad del agua, lo que su vez, una mayor calidad del agua incentiva la adopción de tecnologías de tratamiento, que contribuyen a preservar o mejorar aún más la calidad del recurso hídrico. Sin embargo, esta mejora en la calidad del agua también genera presión para que se reduzcan aún más las actividades mineras, cerrando el ciclo en un proceso autorregulado. Además, el ciclo B2 (impacto de la minería en la salud pública y las regulaciones ambientales), se centra en cómo una menor minería mejora la calidad del agua, lo que resulta en una mejora de la salud pública, a medida que la salud mejora toma una mayor trascendencia de implementar regulaciones ambientales que aseguren que las actividades mineras se mantengan bajo control, estas regulaciones contribuyen a limitar aún más la minería, estabilizando el sistema.

Los dos ciclos están vinculados y se enriquecen mutuamente, dado que el B1 trata directamente el efecto de las actividades mineras en las condiciones del agua a través de la implementación de tecnologías, mientras que el B2 incorpora el elemento humano y social, al vincular el estado del agua con la salud pública.

Los bucles de retroalimentación interna (B1 y R2) como se observa en la Figura 5, representan dinámicas complementarias y, a la vez, conflictivas en la gestión del agua, resaltando los desafíos de mantener un equilibrio sostenible entre calidad, disponibilidad y demanda del recurso hídrico. El ciclo (B1) es un sistema de balance centrado en las condiciones del recurso, donde se ve perjudicada por las actividades de minería, debido a la contaminación que generan. No obstante, las tecnologías de tratamiento hídrico funcionan como un mecanismo de compensación, contribuyendo a reducir los impactos adversos. Por otra parte, el bucle (R2), refuerza la disponibilidad de agua para satisfacer la demanda. La calidad del agua actúa como un punto crítico, ya que afecta directamente la capacidad de almacenamiento y, por ende, la disponibilidad general del recurso.

Los bucles B1 y R2 ilustra un modelo dinámico que toma en cuenta tanto la preservación de la calidad del agua como la gestión eficaz de su disponibilidad, con el objetivo de satisfacer las demandas en aumento de la comunidad y reducir los efectos negativos de las prácticas mineras.

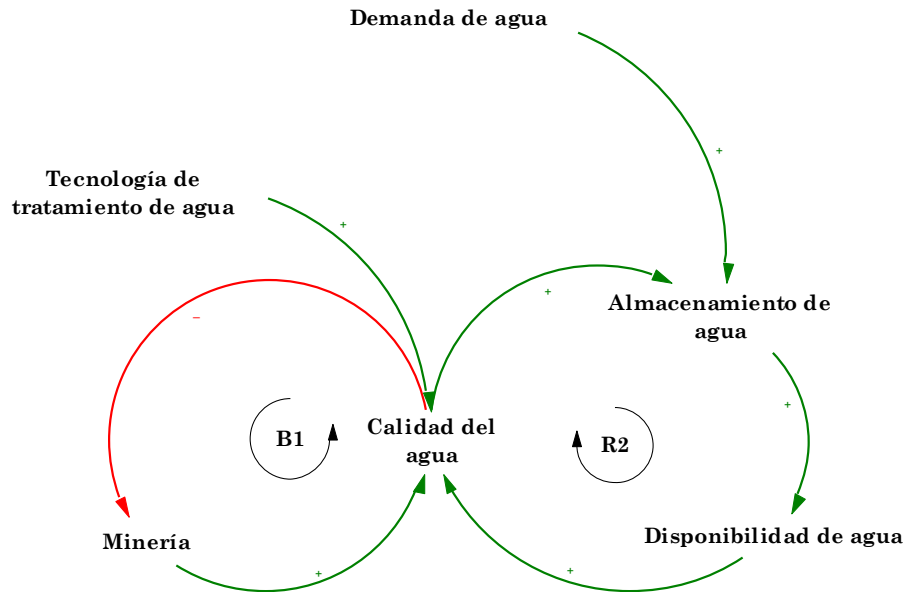


Figura 5. Diagrama de los submodelos B1 y R2, interacción entre la regulación de la calidad del agua y su disponibilidad. Fuente: elaboración propia.

2.3 Construcción de escenarios cuantitativos fundamentados en dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una herramienta utilizada para modelar y simular el comportamiento e interacciones de un sistema a lo largo del tiempo. Se desarrolló en los años 60 por Jay Forrester en la escuela de negocios del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). El modelo de Forrester se representa matemáticamente mediante una ecuación diferencial (1) [19], [26], [40].

$$\frac{dx}{dt} = F(x(t), t; \mu) \tag{1}$$

Donde $\frac{dx}{dt}$, representa la variación de una magnitud en relación con el tiempo de la magnitud F , $x(t)$, variable dependiente, t , variable independiente del tiempo y μ , parámetros que definen el sistema. Desde la perspectiva de transferencias y estados, esta relación se expresa en (2), [26].

$$\frac{d(\text{Nivel})}{dt} = \text{Flujo de entrada}(t) - \text{Flujo de salida}(t) \tag{2}$$

La Figura 6, muestra el esquema de niveles y flujos, basado en la metodología de Forrester, representa las dinámicas de población, demanda y oferta de agua en Paimadó, Río Quito. Los modelos se desarrollaron en Vensim PLE, reflejando las interacciones entre variables principales, auxiliares y constantes del sistema, y destacando los factores que influyen en la dinámica regional. Las constantes del modelo se estimaron con datos reales del área de estudio y normativas vigentes. la Tabla 1 muestra algunos valores iniciales de las variables en la condición base.

Tabla 1. Parámetros iniciales del modelo de gestión del agua en Paimadó. Fuente: elaboración propia.

Cabecera municipal Paimadó - Río Quito		
Parámetros	Valor y Unidad	Fuentes
Población	2335 (habitantes)	Río Quito 2023 [8]
Tasa de natalidad	2.00 % - 2.50 %	Río Quito 2023 [8]
Tasa de mortalidad	0.60 % - 0.70 %	Río Quito 2023 [8]
Tasa de inmigración	0.50 %	Río Quito 2023 [8]
Tasa de emigración	1.50 %	Río Quito 2023 [8]
Uso residencial	100 -200 (L/persona/día)	RAS 0330 de 2017 [41]
Centros de salud	50 - 100 (L/paciente/día)	RAS 0330 de 2017 [41]
Escuelas	15 - 50 (L/estudiante/día)	RAS 0330 de 2017 [41]
Restaurantes y hoteles	20 - 50 (L/cliente/día)	RAS 0330 de 2017 [41]
Precipitación anual	7073 (mm)	IDEAM [42]
Altura sobre el nivel del mar	55 (H.M.S.N.M)	Río Quito 2023 [8]
Área de captación	265263 (m ²)	Software AutoCAD
HPS	0-24 (Horas)	Encuesta aplicada

El nivel de población incluye los flujos de incremento (INC), influenciados por la inmigración y la tasa de nacimientos, y de decrecimiento (DEC), determinados por la emigración y la tasa de mortalidad. El número de viviendas se obtiene de la población, un factor esencial para determinar la cantidad de agua.

Como segundo nivel, la demanda de agua está en función del uso del agua, el cual se subdivide en tres componentes, uso residencial, comercial e institucional, este último abarca variables auxiliares como las necesidades de agua en escuelas, centros de salud, instituciones municipales, hoteles y restaurantes, las subdivisiones están influenciadas por el tamaño de la población y cantidad de viviendas, lo que finalmente determina la demanda total de agua, como se ilustra en la Figura 6b.

El tercer nivel, la oferta de agua, se compone de tres fuentes principales, agua lluvia, fuentes hídricas y el sistema de acueducto. Las variables auxiliares incluyen la capacidad de almacenamiento de los tanques, el caudal de las fuentes hídricas y los parámetros técnicos del acueducto, como la dotación neta y las horas de prestación del servicio (HPS). Igualmente, se incluye un flujo de decrecimiento (DEC 2), que se manifiesta por las consecuencias de la minería en la calidad y cantidad de agua accesible, como se ilustra en la Figura 6b.

La relación entre la disponibilidad y el consumo de agua permite el cálculo de la cantidad de recurso insuficiente, proporcionando información crucial para la toma de decisiones en la gestión y administración del agua en el marco de las actividades humanas y los desafíos medioambientales.

También se diseñó un módulo como se puede ver en la Figura 7A, para modelar el porcentaje promedio de gasto que las viviendas destinan a la adquisición de agua, que está compuesto por dos elementos principales, los ingresos económicos y los costos del agua. Los ingresos económicos dependen de variables constantes como el número de viviendas que hay en la comunidad y los ingresos promedios totales que puedan tener cada integrante del hogar, debido a la diversidad de actividades que puedan desarrollarse. Por otra parte, los costos de agua están determinados por dos componentes auxiliares, los gastos de transporte y el esfuerzo requerido para obtenerla. En comunidades donde los hogares deben desplazarse hasta las fuentes de agua, estos costos incluyen tanto el tiempo como los recursos utilizados en medios de transporte como lanchas, canoas y mototaxis, entre otros. Así mismo, se encuentra vinculado el tiempo invertido en la recolección de agua, este costo refleja el esfuerzo humano requerido para suplir la demanda hídrica en ausencia de un sistema formal de distribución que les permita tener esa confianza en consumir agua.

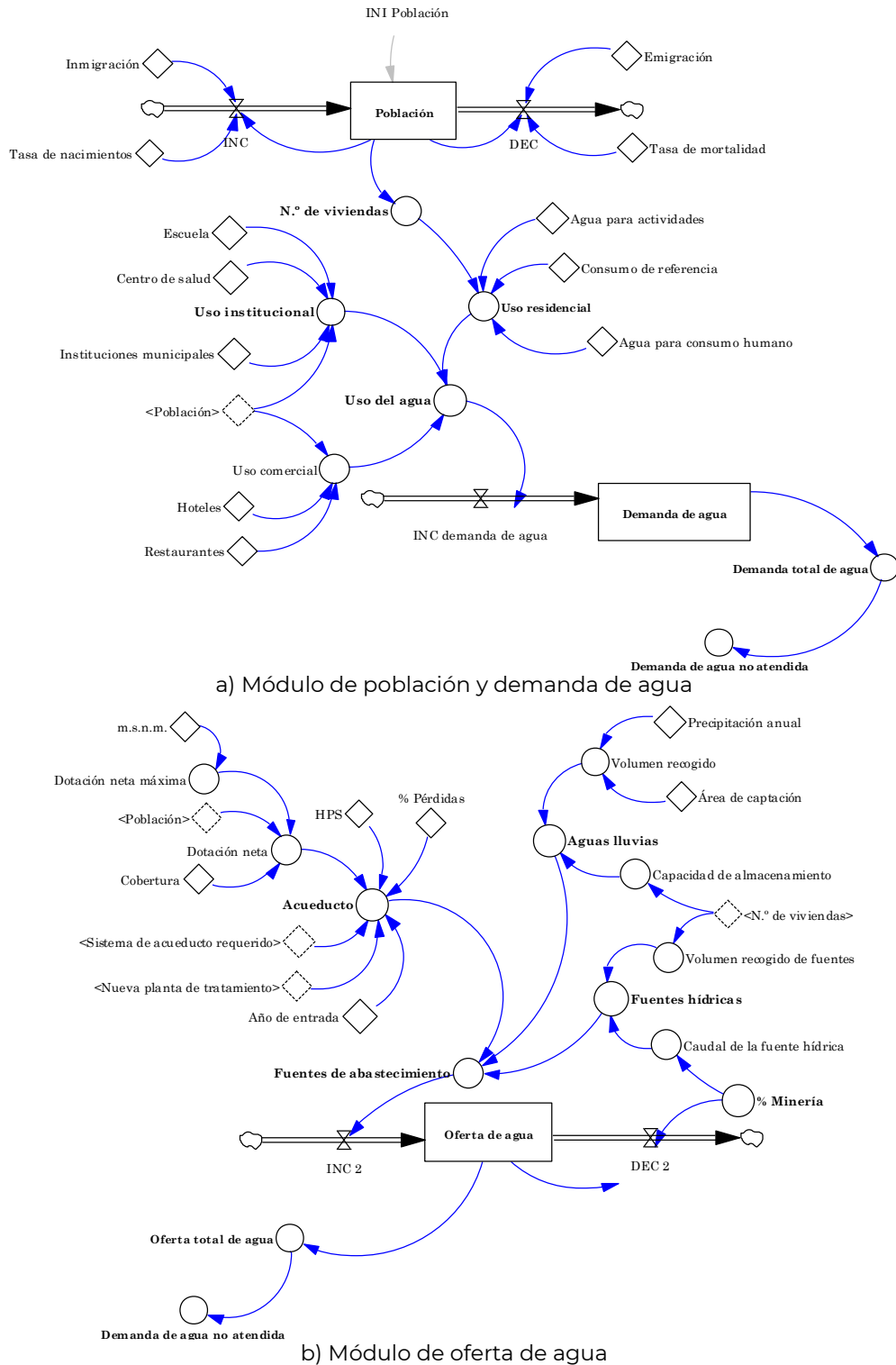


Figura 6. Diagrama de niveles y flujos del sistema de agua, basado en la metodología de Forrester.
Fuente: elaboración propia.

Otro componente clave es el módulo que modela el sistema de acueducto requerido como se observa en la Figura 7B, para satisfacer la demanda de agua, considerando los caudales necesarios y su capacidad para suplir las necesidades de los hogares.

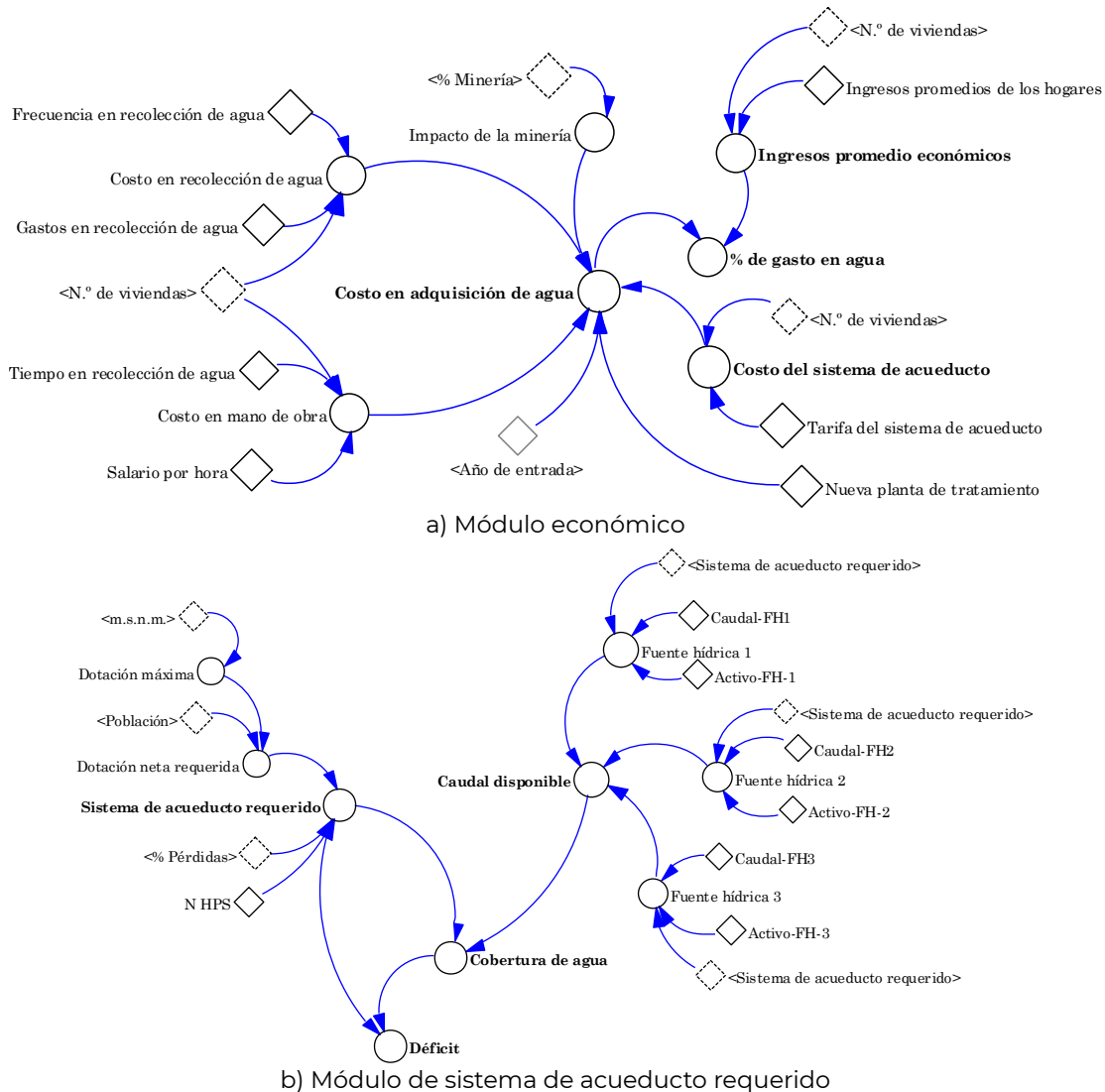


Figura 7. Diagrama de flujos y niveles de Forrester: módulo económico y sistema de acueducto requerido. Fuente: elaboración propia.

El abastecimiento de agua requerido está influenciado por la dotación neta máxima y la población beneficiaria, se incluyen un factor de pérdidas, que considera la eficiencia del sistema y las limitaciones operativas (pérdidas por fugas), las variables como la altura respecto al nivel del mar y la cantidad de horas de servicios también influyen en el cálculo de la dotación requerida.

La variable principal de caudal disponible integra los aportes de diferentes fuentes hídricas, evaluando la capacidad de cada una para suplir la demanda, cabe señalar que las fuentes se activan en función del sistema de acueducto requerido, y cada una cuenta con parámetros específicos de caudal. Además, se incluye un nivel de déficit hídrico, que refleja la diferencia entre la demanda y la disponibilidad de caudal, sirviendo como un indicador de la necesidad de mejoras en la infraestructura o en la gestión del recurso.

Ambos módulos están estrechamente vinculados al impacto de la minería, una variable clave que actúa tanto en los costos como en la calidad y disponibilidad del agua, es decir un aumento en la actividad minera eleva los costos de acceso al agua, incrementando los gastos de transporte, mano de obra, al mismo tiempo se disminuye la capacidad apta de las fuentes hídricas para satisfacer la demanda.

2.3.1 Horizontes y escenarios

El modelo, alimentado con datos reales obtenidos en campo, fue validado mediante un enfoque combinado que integró validación estructural, de comportamiento y participativa. En esta última participaron expertos en gestión hídrica, actores clave de la comunidad y en espacios académicos internacionales, lo que permitió revisar la coherencia del modelo, ajustar parámetros y confirmar la consistencia de los resultados simulados con las condiciones reales de Paimadó. La simulación propuesta abarca un horizonte de 16 años, desde 2024 hasta 2040, con una modelación base que representa la situación actual de la comunidad. A partir de esta validación se formularon tres escenarios prospectivos; optimista, moderado y pesimista, que integran variaciones en la demanda de agua, la intensidad de la actividad minera y la capacidad de la infraestructura de tratamiento. Estas variaciones se implementaron en la formulación matemática del modelo, permitiendo representar dinámicas no lineales, bucles de retroalimentación y dependencias temporales características de la dinámica de sistemas.

En el escenario optimista, la demanda de agua aumenta en un 25 %, mientras que las actividades mineras se reducen al 15 % en la región. Además, se implementa una nueva planta de tratamiento en 2028, permitiendo cubrir el 100 % de la población con un servicio continuo de ocho horas diarias.

El escenario moderado contempla un incremento del 10 % en la demanda de agua y una expansión de las actividades mineras hasta un 30 %. En este caso, se instala una nueva planta de tratamiento en 2035, aunque su capacidad solo permite abastecer a la población durante cuatro horas diarias.

Finalmente, en el escenario pesimista, no se registra crecimiento en la demanda de agua, pero la actividad minera se incrementa en un 65 %. Bajo estas condiciones, no se introducen tecnologías innovadoras para el tratamiento del agua y el sistema de acueducto sigue funcionando con una cobertura limitada, proporcionando solo tres horas diarias de servicio al 83.60 % de la población.

Estos escenarios permiten evaluar el impacto de diferentes dinámicas socioeconómicas y ambientales sobre la gestión del agua potable, facilitando la formulación de estrategias para mejorar la sostenibilidad del recurso en la región.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la dinámica de sistemas permitió modelar e interpretar las relaciones complejas entre la oferta y demanda de agua potable, así como las variables socioeconómicas que condicionan el acceso al recurso en la comunidad de Paimadó. La simulación base (2024–2040) proyecta un crecimiento sostenido en la demanda de agua, que pasa de 60,965 m³/año en 2024 a 1,031,690 m³/año en 2040 (Figura 8a), impulsado por el aumento poblacional y el incremento de necesidades hídricas. Este comportamiento concuerda con estudios previos en contextos rurales, donde se ha evidenciado que el crecimiento demográfico, combinado con una infraestructura deficiente, intensifica la presión sobre los sistemas de abastecimiento [24], [23]. Estos resultados subrayan la importancia de implementar estrategias sostenibles que garanticen el acceso al agua en el mediano y largo plazo. Un caso representativo de ello lo aportan [43], quienes evidencian que la educación comunitaria en ahorro de agua puede reducir hasta un 60 % el consumo doméstico, destacando que intervenir sobre los hábitos de uso es tan crucial como ampliar la oferta.

Paralelamente, la oferta de agua muestra una disminución drástica en el mismo periodo, al pasar de 1,493,360 millones de m³/año a 52,544 millones de m³/año (Figura 8). Esta reducción obedece principalmente al impacto negativo de la minería, que afecta tanto la calidad como la disponibilidad del recurso hídrico, tal como lo evidencian estudios locales [11] realizados en la cuenca del río Quito.

Aunque en el corto plazo no se observan déficits, dado que la oferta supera ampliamente la demanda (Figura 8c–8d), una proporción significativa del recurso disponible no es apta para el consumo humano debido a limitaciones en los procesos de tratamiento y distribución. Esta paradoja ha sido documentada en otros contextos rurales, donde la abundancia ambiental de agua no garantiza necesariamente el acceso efectivo por parte de la población. Diversos estudios han evidenciado que, en escenarios sin cobertura universal de agua segura, gran parte del recurso hídrico puede permanecer subutilizado o desperdiciado, mientras persiste una escasez efectiva a nivel comunitario [44]. Esta situación subraya la necesidad de optimizar el aprovechamiento de la oferta existente, mediante estrategias como el fortalecimiento de sistemas de almacenamiento y la mejora en los procesos de potabilización, con el fin de convertir la disponibilidad ambiental en una disponibilidad efectiva y accesible para la población. En relación con la simulación base, el modelo propuesto reflejó con mayor constancia las dinámicas propias del sistema de abastecimiento en Paimadó, al incorporar de manera explícita las interdependencias entre la disponibilidad de agua, la demanda, la calidad y los costos asociados a su acceso. Este planteamiento permitió identificar con mayor detalle las variaciones potenciales en dichas variables frente a distintos escenarios formulados a partir de condiciones realistas. Al contrastar las proyecciones del modelo con los datos levantados en campo, se observó una coincidencia sustancial en las tendencias y magnitudes, lo que respaldó su pertinencia como herramienta para orientar decisiones estratégicas en la gestión del recurso hídrico.

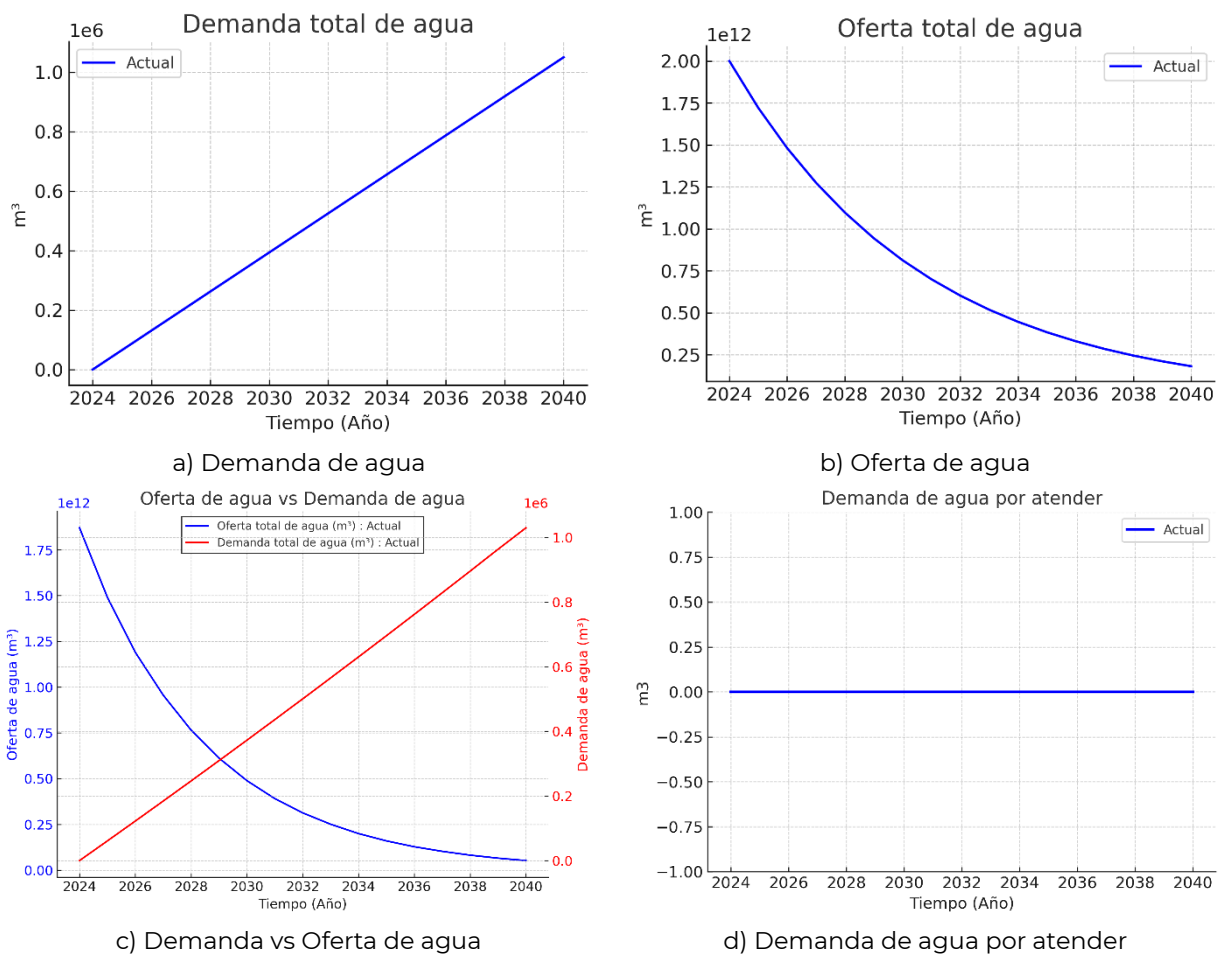


Figura 8. Simulación base: Demanda, oferta de agua y demanda por atender.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al sistema de acueducto local, como se observa en la Figura 9a, los resultados indican que actualmente este suministra alrededor de 39,111 m³/año, logrando una cobertura del 83.60 % de la población con un servicio intermitente de promedio 3 horas diarias. Si bien esta cobertura es significativa, la comunidad en general manifiesta inconformidad con el servicio, ya que consideran que el agua suministrada es de mala calidad y en algunos casos no llega con la potencia requerida en algunos hogares por deficiencia en la red de distribución. Esto obliga a las familias a recurrir a fuentes alternativas (pozos, ríos o compra de agua), lo que incrementa los costos y riesgos asociados al acceso al agua. Además, en comunidades rurales sin acceso continuo al agua potable se han reportado costos de adquisición que superan el 30 % del ingreso familiar, reflejando una pesada carga económica y social [24].

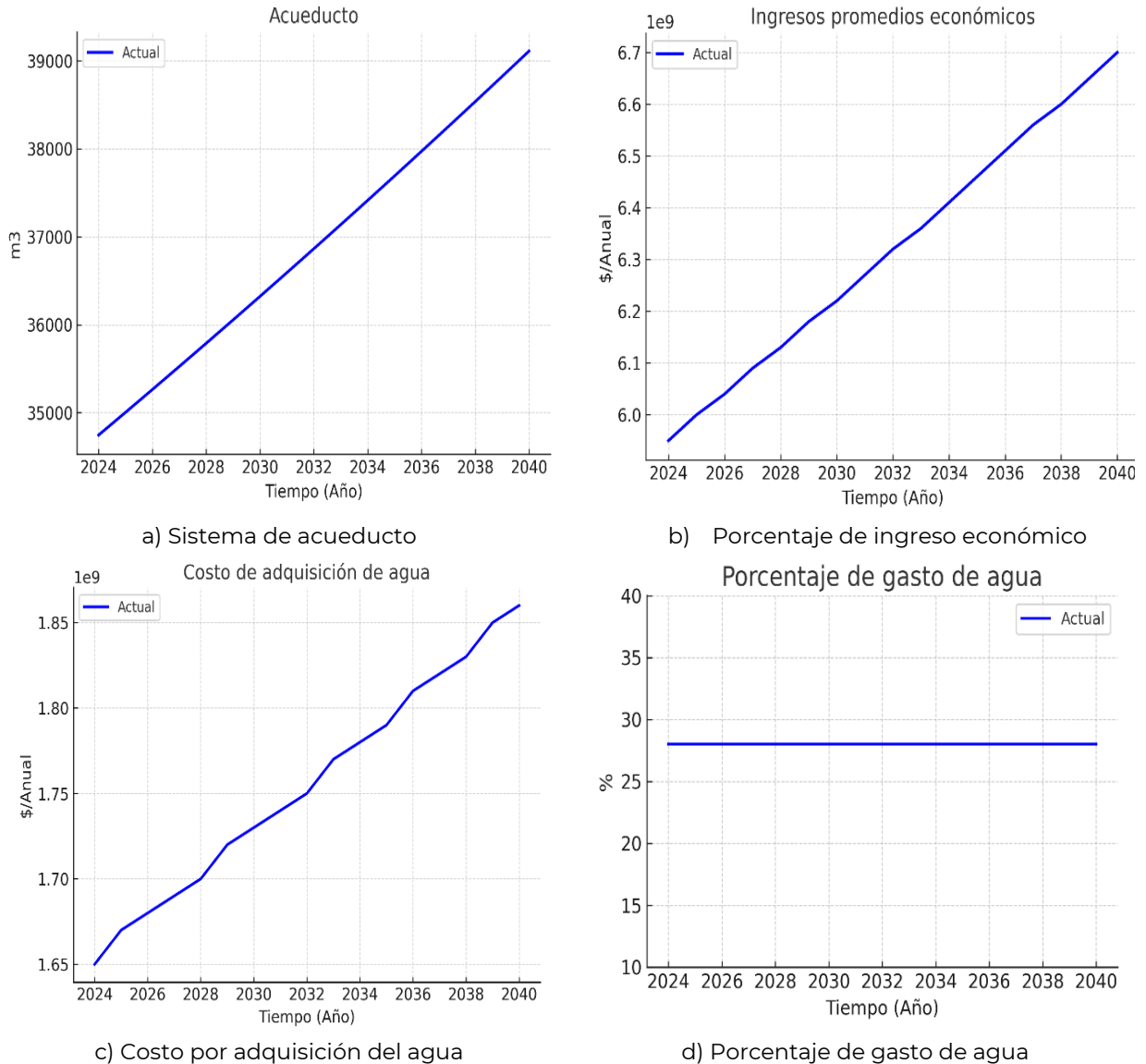


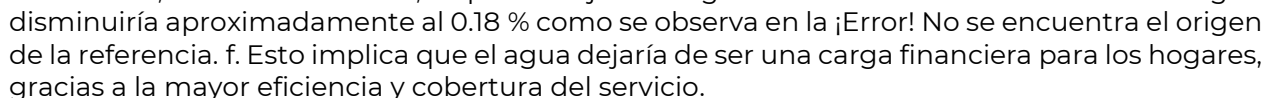
Figura 9. Simulación base: Sistema de acueducto, ingresos promedio, costos de adquisición de agua y porcentaje de gasto en agua. Fuente: elaboración propia.

En Paimadó, nuestro modelo económico estima que, en las condiciones actuales (2024), los hogares destinan en promedio 27.76 % de sus ingresos a la obtención de agua, como se observa en la Figura 9d. Este porcentaje proviene de gastos directos como la compra a proveedores informales o el acarreo y del costo de oportunidad de tiempo destinado a la recolección de agua. Aunque los ingresos familiares totales muestran una tendencia al alza de aproximadamente \$5,954 millones COP en 2024 a \$6,702 millones COP en 2040, como se observa en la Figura 9b, los costos totales de adquisición de agua también aumentan aproximadamente \$1,653 millones COP a \$1,860 millones COP, como se observa en la Figura 9c. El incremento de los costos es más lento que el de los ingresos, lo que señala un leve avance en la accesibilidad con el paso del tiempo, sin embargo, el porcentaje del gasto en agua sigue siendo elevado y problemático desde el punto de vista de equidad social.

Este resultado concuerda con [21], donde se evidenció que, a través de simulación dinámica, la mejora de los sistemas de tratamiento y distribución puede disminuir de manera significativa los costos unitarios del agua para las comunidades rurales. En otras palabras, invertir en infraestructura de agua no solo aumenta la cobertura, sino que también disminuye la carga económica sobre las viviendas, mejorando la sostenibilidad social del servicio.

Para determinar la evolución futura del sistema bajo distintas condiciones, se definieron tres escenarios prospectivos (optimista, moderado y pesimista) conforme a las especificaciones del apartado metodológico 2.3.1, variando las tasas de crecimiento de la demanda de agua, la intensidad de la actividad minera y el mejoramiento de la infraestructura de potabilización.

La Figura 10 resume el comportamiento de las principales variables hasta 2040 en cada escenario como se observa en las Figuras 10a–10f.

En el escenario optimista, que incluye las mejoras más significativas como, un control riguroso de la minería y puesta en marcha temprana de una nueva planta de tratamiento con servicio ampliado, los resultados son claramente favorables. La oferta de agua se mantiene altamente estable a largo plazo, alcanzando aproximadamente 138,607 millones de m³/año en 2040 como se observa en la Figura 10b, lo que es más que suficiente para cubrir la demanda proyectada como se observa en la Figura 10a. Consecuentemente, la demanda por atender permanece en cero durante todo el horizonte estudiado como se observa en la Figura 10c. Este panorama demuestra que, con intervenciones robustas, el sistema de agua podría sostener el crecimiento de la demanda sin llegar a la escasez. Un avance significativo es la notable mejora económica, en este escenario, el porcentaje del ingreso en las viviendas destinado al agua disminuiría aproximadamente al 0.18 % como se observa en la . Esto implica que el agua dejaría de ser una carga financiera para los hogares, gracias a la mayor eficiencia y cobertura del servicio.

Estudios comparativos respaldan esta proyección optimista. En [45] se evidenció, en un caso colombiano que la reingeniería del sistema de abastecimiento incluyendo la reubicación de reservorios y mejoras en bombeo puede simultáneamente reducir costos energéticos y garantizar el suministro en comunidades de difícil acceso. De igual forma, en [44], demostró que una mejor gestión de la infraestructura de almacenamiento, como el encadenamiento de tanques en cuencas, permite aprovechar hasta el 100 % del agua necesaria para cubrir la demanda doméstica, evitando pérdidas por evaporación o derrames. Nuestro escenario optimista coincide con esas evidencias ya que, al integrar regulación ambiental e infraestructura adecuada, el recurso hídrico sería suficiente y accesible para toda la comunidad de manera sostenible.

El escenario moderado, con acciones intermedias dada por el control parcial de la minería y ampliación del sistema de acueducto más tardía y limitada, presenta un panorama menos holgado. Inicialmente, durante buena parte del periodo de simulación, la oferta de agua continúa siendo suficiente para cubrir totalmente la demanda, es decir la demandada por atender cerca de cero. No obstante, para el año 2040, se proyecta una oferta anual de aproximadamente 6,204 millones de m³, un porcentaje considerablemente bajo comparado con el escenario optimista como se observa en la Figura 10 (comparar 10b y 10c).

A pesar de que esa cantidad aún supera la demanda anual para el año 2040, la tendencia descendente señala una disminución significativa del margen de seguridad del agua. En otras palabras, el sistema empieza a sentir estrés y se percibe la posibilidad de escasez si las circunstancias desfavorables persisten más allá de 2040. De hecho, en comparación con investigaciones realizadas en otras cuencas, se ha indicado que cuando la provisión de agua cae por debajo del 40 % de la demanda, los sistemas de agua suelen colapsar funcionalmente [46], [20]. Por otro lado, en [47] se sugiere utilizar índices de escasez de agua como indicadores tempranos de alerta para la planificación, dado que la disponibilidad per cápita puede mostrar signos de disminución que, de no invertirse, comprometerían el equilibrio futuro entre oferta y demanda.

Por otro lado, las mejoras del escenario moderado en términos sociales y económicos logran reducir significativamente el gasto de agua para los hogares, también un 0.18 % aproximado del ingreso promedio de las viviendas, similar al optimista, gracias a la introducción de la nueva planta de tratamiento hacia 2035 y la ligera ampliación de la cobertura como se observa en la Figura 10 (comparar 10d y 10f). Esto concuerda con la idea de que incluso intervenciones tardías pueden disminuir la carga económica en los hogares si aumentan la eficiencia del suministro [21]. De igual forma, al no alcanzar una cobertura plena ni un control ambiental sólido, persisten riesgos de inequidad en el acceso y vulnerabilidad de la fuente a mediano plazo.

El escenario pesimista, caracterizado por la ausencia de nuevas intervenciones y un deterioro considerable de la minería, proyecta resultados críticos para 2040. La oferta de agua disminuye hasta aproximadamente $457,600 \text{ m}^3/\text{año}$, un valor reducido en relación con la demanda esperada. En consecuencia, surge un déficit de agua pronunciado, ya que la demanda insatisfecha anual rondaría los $574,000 \text{ m}^3$ al final del horizonte como se observa en la Figura 10 (Comparar 10a, 10b y 10c). En este escenario, prácticamente el 55 % de la demanda no podría ser atendida con las fuentes disponibles, confirmando un estado de escasez de agua extrema, lo que coincide con las advertencias de algunos estudios sobre la insostenibilidad de situaciones de inacción. En este sentido, estudios como [48], mostraron que, si no se controlan los bucles de realimentación positivos, como el crecimiento poblacional o la degradación progresiva de fuentes, el sistema de agua puede entrar en dinámicas de retroalimentación descontrolada que llevan a la escasez severa. De igual forma, en nuestro escenario pesimista la falta de regulación convierte la interacción entre oferta y demanda en un círculo perjudicial, es decir la minería intensa degrada la fuente de agua, lo que a su vez deja a más hogares sin servicio formal y obliga a extraer aún más agua de fuentes vulnerables o de baja calidad, profundizando la crisis.

Las consecuencias socioeconómicas de este panorama serían graves. Si la cobertura del acueducto se mantiene estancada en el 83.60 % de la población y con un servicio limitado, una porción importante de los hogares dependería enteramente de soluciones precarias. Además, el modelo proyecta que para el año 2040, el gasto de los hogares en agua llegaría a un promedio aproximado de 33.31 % de sus ingresos, un nivel considerablemente elevado que sobrepasa ampliamente el límite de asequibilidad aceptable como se observa en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Comparar 10e y 10f). En términos prácticos, esto implicaría que los hogares destinarían un tercio de su poder adquisitivo únicamente en la adquisición de agua, poniendo en riesgo otros elementos fundamentales de su bienestar.

Cabe destacar que este porcentaje tan elevado refleja costos directos e indirectos como los precios altos debido a la escasez, mayor necesidad de comprar agua de fuentes externas, gastos médicos por enfermedades de agua no segura, entre otros. Según [49], ante situaciones de escasez resulta crucial incluir en el precio del agua los costos de oportunidad y de riesgo para el futuro, pues el consumo actual excesivo genera un costo alto a la disponibilidad futura. En Paimadó, la situación sin intervenciones ilustra precisamente lo contrario, la falta de internalización de los costos de la sobreexplotación lleva a una utilización inadecuada del recurso, que finalmente provoca un severo perjuicio social y económico. Por otra parte, la falta

de agua adecuada no solo impactaría en la salud y el bienestar, sino que también podría originar disputas por el recurso y agravar la pobreza en agua de la comunidad.

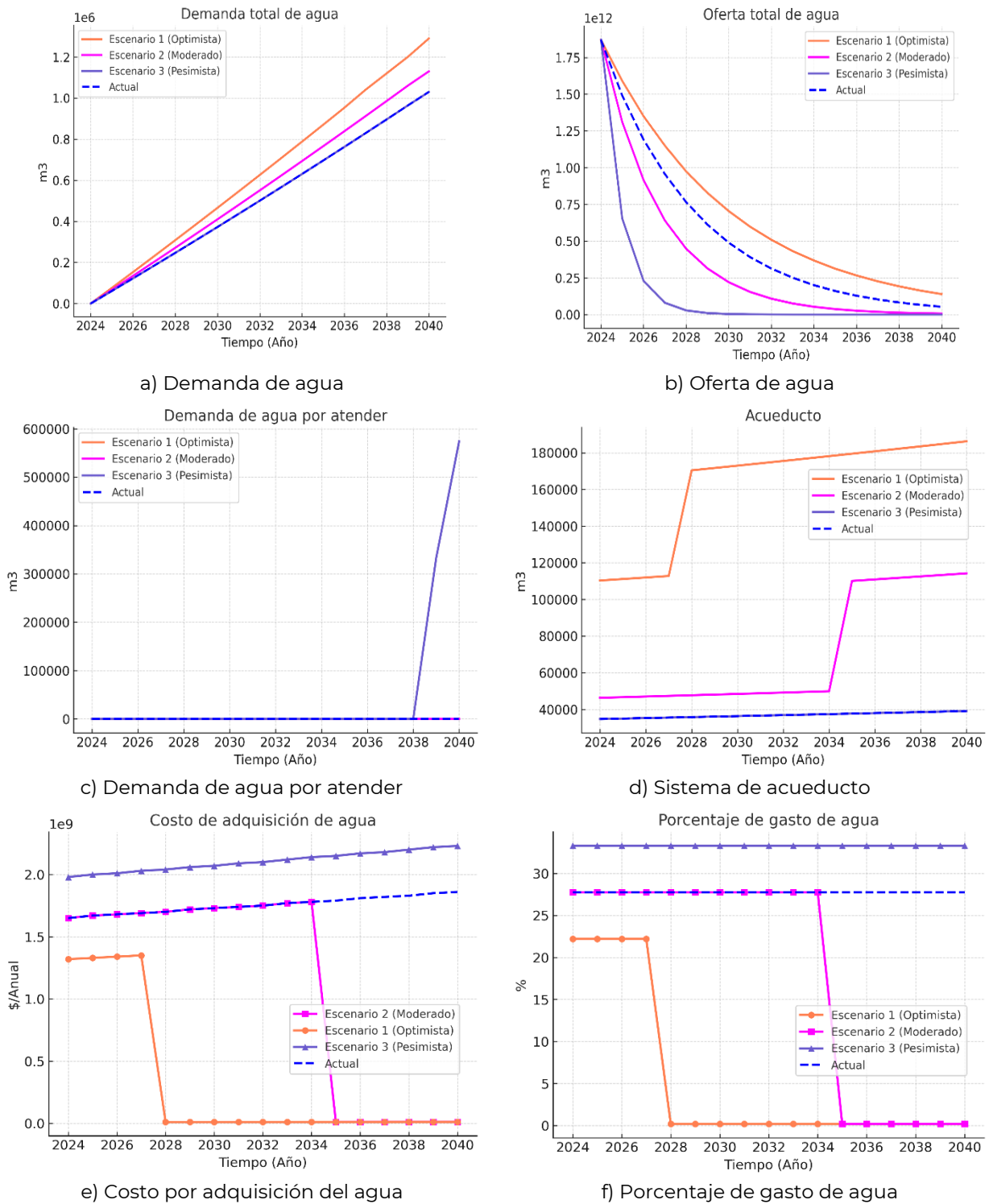


Figura 10. Simulación de escenarios: Prueba de comportamiento de las variables del modelo.
 Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una relación directa entre las dinámicas simuladas y las acciones de gestión priorizadas para el sistema de agua en Paimadó. La modelación evidenció que medidas como el fortalecimiento de la infraestructura de potabilización, la regulación de la actividad minera y la optimización de la distribución no solo mejoraron la cobertura y la calidad del recurso, sino que también redujeron de forma significativa los costos de acceso para los hogares. Esta correspondencia entre los cambios implementados en los escenarios y las mejoras proyectadas en las variables clave confirmó que las estrategias propuestas respondían de manera efectiva a las necesidades identificadas en el territorio, ofreciendo un marco de actuación sólido para garantizar la sostenibilidad hídrica a largo plazo.

Por otra parte, el presente estudio tiene ciertas limitaciones propias de los modelos basados en dinámica de sistemas. En primer lugar, la calidad y disponibilidad de los datos locales utilizados podrían presentar incertidumbres o errores puntuales, especialmente relacionados con la actividad minera y el consumo real de agua en ciertos sectores poblacionales. En segundo lugar, las simulaciones incorporan supuestos simplificados que, aunque facilitan la interpretación clara de las principales dinámicas del sistema, podrían no reflejar plenamente la complejidad real ni la variabilidad futura de todas las condiciones. Finalmente, el horizonte temporal definido (2024-2040), aunque permite evaluar con claridad tendencias generales, podría ampliarse en futuros estudios para considerar efectos adicionales como eventos extremos o cambios inesperados en variables clave, tales como la población o las condiciones climáticas.

A pesar de estas limitaciones, los resultados proporcionan una base sólida para orientar decisiones estratégicas sobre la gestión del agua potable en la comunidad de Paimadó. En concreto, este trabajo evidencia que la adopción temprana y coordinada de medidas integrales, incluyendo regulaciones ambientales estrictas sobre la minería, inversiones en infraestructura para potabilización y distribución, así como políticas públicas destinadas a reducir costos para los hogares puede garantizar la sostenibilidad hídrica local a largo plazo. El contraste de los distintos escenarios analizados subraya la importancia crucial de acciones preventivas, destacando que las decisiones actuales tendrán un impacto decisivo en la seguridad hídrica futura y, en consecuencia, en la calidad de vida de la población local. Por último, el modelo presentado no solo ofrece aportes científicos y técnicos relevantes para la región estudiada, sino también propone una metodología que puede adaptarse a contextos similares, particularmente en comunidades rurales que enfrentan desafíos complejos en el abastecimiento de agua potable.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación muestran que, bajo la trayectoria actual, la comunidad de Paimadó enfrenta una creciente presión sobre la demanda de agua potable, que podría superar la capacidad del sistema hacia el 2040. Aunque la oferta hídrica en términos absolutos es alta, factores como la minería y la falta de infraestructura limitan su aprovechamiento, lo que genera desigualdad en el acceso y altos costos para los hogares. El modelo permite evidenciar que el gasto en agua, que actualmente representa cerca del 27 % del ingreso familiar, podría incrementarse hasta superar el 30 % en escenarios pesimistas, situando a los hogares en condiciones de vulnerabilidad económica.

El análisis comparativo de escenarios confirma que la introducción temprana de medidas de control a la minería y la inversión en infraestructura de potabilización y distribución garantizan la sostenibilidad del sistema a largo plazo. En el escenario optimista, la cobertura plena y la mejora en la calidad del agua reducen el gasto en agua a niveles mínimos (0.18 % del ingreso), mientras que en el escenario pesimista la ausencia de intervención genera déficits superiores al 50 % de la demanda. Estos hallazgos reafirman la importancia de actuar

oportunamente para evitar que el sistema entre en dinámicas de retroalimentación negativas difíciles de revertir.

En términos metodológicos, la aplicación de dinámica de sistemas demostró ser una herramienta eficaz para comprender la interacción entre variables hídricas, sociales y económicas, permitiendo construir proyecciones realistas y evaluar con claridad los efectos de distintas decisiones de gestión. Esta aproximación no solo resulta útil para la comunidad de Paimadó, sino que también puede adaptarse a otros territorios rurales con problemáticas similares, aportando evidencia para el diseño de políticas públicas más sostenibles y equitativas en el acceso al agua potable.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores de este artículo agradecemos al programa de Maestría en Ingeniería de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Tecnológica del Chocó por el apoyo ofrecido en el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] G. Fernández-Vargas, "La gobernanza del agua como marco integrador para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Latinoamérica," *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Cientif.*, vol. 23, no. 2, Oct. 2020. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1561>
- [2] Unesco, "Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás," Unesdoc Biblioteca Digital, 2019. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- [3] L. D. Sánchez Torres, and É. Quiroga Rubiano, "Sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de agua para la zona rural," *Revinge.*, vol. 1, no. 49, pp. 52-61, Jan. 2020. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.7>
- [4] L. A. Camacho Botero, "The paradox of the availability of poor water quality in the Colombian rural sector," *Revinge.*, vol. 1, no. 49, pp. 38-51, Jan. 2020. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.6>
- [5] J. O. Moreno Méndez, "Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia," *Revinge.*, vol. 1, no. 49, pp. 28-37, Jan. 2020. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.5>
- [6] C. J. Mahecha Jaramillo, "Gestión pública frente al suministro de agua en la zona rural de San Antonio del municipio de Jamundí," Tesis de maestría, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2019. <https://hdl.handle.net/10893/14971>
- [7] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, "Informe Nacional de Monitoreo: Sistema General de Participaciones Agua Potable y Saneamiento Básico Vigencia 2024," minvivienda.gov.co, 2024. [Online]. Available: <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/2025-07/informe-nacional-monitoreo-sgp-apsb-2024-09-07-2025.pdf>
- [8] Alcaldía Municipal de Río Quito en el Chocó, "Acuerdo Nro 010 del 28 de mayo del 2020 Plan De Desarrollo Municipal-2020-2023", rioquito-choco.gov.co, 2020. [Online]. Available: <https://www.rioquito-choco.gov.co/normatividad/plan-de-desarrollo-municipal--20202023>
- [9] S. Beltrán Castañeda, "Niveles de metales pesados en suelos, sedimentos y peces en el Río Quito, Chocó," Tesis de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2023. <http://hdl.handle.net/1992/67911>
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Informes de Gestión Anual," minambiente.gov.co, 2023. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/planeacion-y-seguimiento/informes-de-gestion-anual/>
- [11] Y. Murillo Hinestroza, and L. Vargas Porras, "Influencia de la minería en las características fisicoquímicas en la parte media y baja del río Quito, Chocó, Colombia," *Rev. Bioetnia*, vol. 12, no. 1, pp. 41-51, Dec. 2015. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v12i1.157>
- [12] A. M. Hernández Abadía, E. S. Olaya Escobar, H. F. Castro Silva, and D. R. Olaya Escobar, "Metodología para el desarrollo de capacidades tecnológicas y de innovación para la puesta en marcha de una planta de tratamiento de agua residual doméstica municipal. Caso Tibasosa, Boyacá," *Rev. Bolet. Redipe*, vol. 9, no. 10, pp. 75-93, Oct. 2020. <https://doi.org/10.36260/rbr.v9i10.1089>

- [13] D. Y. Becerra-Perenguez, C. P. Acosta-Astaiza, and J. Leyton-Luna, "Gestión del recurso hídrico en la ruralidad, mediante estrategias de fortalecimiento comunitario," *Entramado*, vol. 20, no. 1, pp. 1-16, Dec. 2024. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.10054>
- [14] S. A. Murillo Montoya, "La conservación del agua en la microcuenca El Burro (Victoria, Caldas), un enfoque participativo," *Rev. Mutis*, vol. 14, no. 1, pp. 1-16, Mar. 2024. <https://doi.org/10.21789/22561498.2076>
- [15] ONU, "Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial," unstats.un.org, 2023. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>
- [16] C. Blanco-Moreno, D. Ruiz-Grisales, and M. A. Pérez-Rincón, "Retos y Oportunidades de la Gestión Comunitaria del Agua en la ruralidad de la Cuenca Alta del río Cauca, Colombia, bajo la pandemia del COVID-19," *Prospectiva*, no. 34, pp. 223-248, Jul. 2022. <https://doi.org/10.25100/prts.v0i34.11923>
- [17] A. I. Huaico-Malhue, C. P. Santibañez-Orellana, E. del C. Jaque-Castillo, and C. Ojeda-Leal, «Water Scarcity and COVID-19 mortality in rural chilean areas», *Urbano*, vol. 26, no. 48, pp. 8-19, Nov. 2023. <https://doi.org/10.22320/07183607.2023.26.48.01>
- [18] P. F. Martínez-Austria, and A. Vargas-Hidalgo, "Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano," *Tecnol. Cien. Agua*, vol. 7, no. 4, pp. 139-154, Jul.-Aug. 2016. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000400139&script=sci_arttext
- [19] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Columbus, USA: Irwin/McGraw-Hill, 2000. https://www.researchgate.net/publication/44827001_Business_Dynamics_System_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World
- [20] W. Xiao-Jun, Z. Jian-Yun, A. Elmahdi, H. E. Rui-Min, Z. Li-Ru, and C. Feng, "Water demand forecasting under changing environment: a system dynamics approach", in *Risk. Water Resour. Manag., Proceed. Symp. H03 IUGG2011*, Melbourne, Australia, Jul. 2011, pp. 1-9. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/287272027>
- [21] A. E. Adeniran, "Application of System Dynamics model in the determination of the unit cost of production of drinking water," *Int. J. Water Resour. Environ. Engin.*, vol. 6, no. 6, pp. 183-192, Jun. 2014. <https://doi.org/10.5897/IJWREE2013.0479>
- [22] G. G. Lemaire, S. A. Carnohan, S. Grand, V. Mazel, P. L. Bjerg, and U. S. McKnight, "Data-driven system dynamics model for simulating water quantity and quality in peri-urban streams," *Water*, vol. 13, no. 21, p. 3002, Nov. 2021. <https://doi.org/10.3390/w13213002>
- [23] J. Carrillo-Rodríguez, and C. E. Toca Torres, "Hacia un modelo de gestión sostenible del agua en el estado de Tabasco México (Towards a Water Sustainable Management Model in Tabasco Mexico)," SSRN, 2020. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3733727
- [24] L. Zuluaga Duque, "Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del agua," Trabajo de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2011. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8785>
- [25] Y. Tian, C. Li, Y. Yi, X. Wang, and A. Shu, "Dynamic Model of a Sustainable Water Resources Utilization System with Coupled Water Quality and Quantity in Tianjin City," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 4254, May. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12104254>
- [26] A. Guemouria et al., "System Dynamics Approach for Water Resources Management: A Case Study from the Souss-Massa Basin," *Water*, vol. 15, no. 8, p. 1506, Apr. 2023. <https://doi.org/10.3390/w15081506>
- [27] L. Huang, and L. Yin, "Supply and demand analysis of water resources based on system dynamics model," *J. Engin. Technol. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 705-720, Dec. 2017. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.1>
- [28] M. N. Filimon, R. Popescu, F. G. Horhat, and O. S. Voia, "Environmental impact of mining activity in Bor area as indicated by the distribution of heavy metals and bacterial population dynamics in sediment», *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, vol. 417, no. 30, 2016. <https://doi.org/10.1051/kmae/2016017>
- [29] H. Gutiérrez-Mosquera, J. Marrugo-Negrete, S. Díez, G. Morales-Mira, L. J. Montoya-Jaramillo, and M. P. Jonathan, "Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health," *J. Hazard. Mater.*, vol. 404, part A, p. 124080, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124080>
- [30] T. D. Phan, E. Bertone, and R. A. Stewart, "Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management," *Clean. Environ. Syst.*, vol. 2, p. 100031, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>
- [31] Y. Tan, Z. Dong, S. M. Guzman, X. Wang, and W. Yan, "Identifying the dynamic evolution and feedback process of water resources nexus system considering socioeconomic development,

- ecological protection, and food security: A practical tool for sustainable water use," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 25, no. 12, pp. 6495-6522, Dec. 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6495-2021>
- [32] V. Rueda, M. H. Young, K. Faust, A. Rateb, and B. D. Leibowicz, "System Dynamics Modeling in Local Water Management: Assessing Strategies for the City of Boerne, Texas," *Water*, vol. 14, no. 22, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/w14223682>
- [33] M. Javad Keyhanpour, S. H. Musavi Jahromi, and H. Ebrahimi, "System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach", *Ain Shams Engin. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1267-1281, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029>
- [34] H. E. Martínez Asprilla, and D. J. Salazar Centeno, "Sustentabilidad, transición agroecológica y Plantas útiles en comunidades negras de Río Quito (Colombia)," *Rev. Agroecol.*, vol. 15, no. 1, Feb. 2022. <https://doi.org/10.59187/revistaagroecologia.v15i1.59>
- [35] N. A. Paipa Rios, and M. A. Triana Gómez, "Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó," *Ing. USBMed*, vol. 9, no. 1, pp. 18-29, Feb. 2018. <https://doi.org/10.21500/20275846.3180>
- [36] D. Daniel, J. Prawira, T. P. Al Djono, S. Subandriyo, A. Rezagama, and A. Purwanto, "A system dynamics model of the community-based rural drinking water supply program (Pamsimas) in Indonesia," *Water*, vol. 13, no. 4, p. 507, Feb. 2021. <https://doi.org/10.3390/w13040507>
- [37] A. Libey, P. Chintalapati, S. Kathuni, B. Amadei, and E. Thomas, "Turn up the Dial: System Dynamics Modeling of Resource Allocations toward Rural Water Supply Maintenance in East Africa," *J. Environ. Eng.*, vol. 148, no. 4, Jan. 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001982](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001982)
- [38] J. Aracil, and F. Gordillo, *Dinámica de sistemas*. Madrid, España: Alianza Editorial, 1997.
- [39] D. A. Pranedyta Baskoro, A. Hermawan, and T. Permadi, "System dynamics model for sustainable water supply strategy in Sentul City area," *JPSL*, vol. 11, no. 2, pp. 233-240, Jul. 2021. <https://doi.org/10.29244/jpsl.11.2.233-240>
- [40] M. Huang, X. Li, and J. Wang, "Research on regional water demand prediction of the upper and middle reaches of the Pearl River Basin based on system dynamics," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 784, no. 1, p. 012003, Jun. 2021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/784/1/012003>
- [41] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, "Resolución 0330 de 2017," [minvivienda.gov.co](https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reqlamento-tecnico-sector-reqlamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras), 2017. [Online]. Available: <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reqlamento-tecnico-sector-reqlamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- [42] Ideam, "Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos," [dhime.ideam.gov.co](http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/). [Online]. Available: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [43] T. Nazarialamdarloo, H. Ali Jamali, B. Nazari, M. Mehdi Emamjomeh, and H. Karyab, "A system dynamics approach for water resources management with focusing on domestic water demand," *Environ. Health Eng. Manag.*, vol. 7, no. 4, pp. 229-235, Sep. 2020, [Online]. Available: <http://ehemj.com/article-1-685-en.html>
- [44] M. Abraham, K. Venugopal, R. Arunkumar, and S. K. Pramada, "Simulation of chain of tanks to augment water supply: a case study from Tamil Nadu," *Aqua Water Infr., Ecosyst. Soc.*, vol. 71, no. 9, pp. 975-991, Sep. 2022. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.038>
- [45] C. D. Guerrero, D. Herrera-Rodríguez, and G. A. Forero-Buitrago, "Hidrología e hidráulica computacional aplicada al suministro de agua lluvia de la vereda el Tunal en Paipa, Boyacá Colombia," *Ing. Comp.*, vol. 23, no. 2, pp. e2019502-e2019502, May. 2021. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.9502>
- [46] M. Milano, D. Ruelland, A. Dezetter, J. Fabre, S. Ardoin-Bardin, and E. Servat, "Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin," *J. Hydrol.*, vol. 500, pp. 114-126, Sep. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.010>
- [47] S. Huincho Lapa, F. V. Sinche Crispin, and C. A. Almidón Ortiz, "Gestión dinámica de la escasez de aguas superficiales mediante la metodología de dinámica de sistemas," *Rev. Geog. Am. Central*, vol. 2, no. 69, pp. 175-198, Apr. 2022. <http://dx.doi.org/10.15359/rqac.69-2.6>
- [48] W. Sardjono, Harisino, W. Gia Perdana, T. Pudaji, and N. Legowo, "System Dynamics Modeling for Sustainable Water," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 2248-2252, Mar. 2020. <https://www.ijrte.org/portfolio-item/E5674018520/>
- [49] L. Chu, and R. Quentin Grafton, "Dynamic water pricing and the risk adjusted user cost (RAUC)," *Water Resour. Econ.*, vol. 35, p. 100181, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2021.100181>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores de este artículo afirmamos que no hay ningún conflicto de intereses financieros, profesionales, ni personales que obstaculicen la exhibición completa y objetiva del trabajo detallado en este documento.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Cristian Deofanor Hinestroza Moreno: Metodología, investigación, revisión y edición. Lubin Delgado Arroyo: Conceptualización, metodología, investigación, revisión y edición. Rosember Ramirez Garrido: Conceptualización, revisión y edición. Todos los autores examinaron y concuerdan con la divulgación de esta versión del manuscrito.

DECLARACIÓN DE IA

Durante la realización de esta investigación, los autores utilizaron ChatGPT para corregir redacción de párrafos. Luego de emplear esta herramienta, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido según sea necesario y asumen total responsabilidad por el contenido de la publicación.