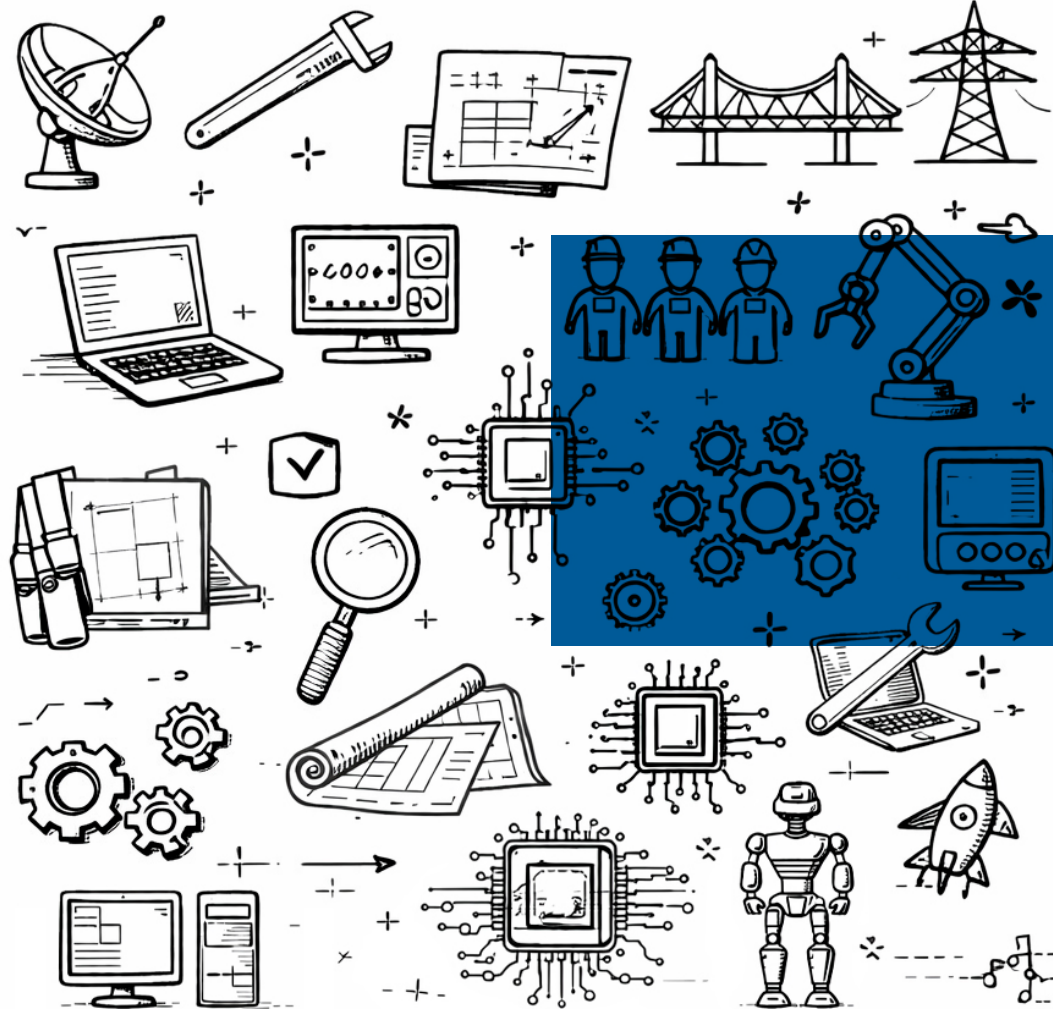




5

MODELACIÓN DINÁMICA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA POTABLE EN COMUNIDADES RURALES DEL CHOCÓ: EL CASO DE PAIMADÓ-RÍO QUITO

DYNAMIC MODELING FOR SUSTAINABLE DRINKING WATER MANAGEMENT IN RURAL COMMUNITIES OF CHOCÓ:
THE CASE OF PAIMADÓ-RÍO QUITO

Cristian Deofanor Hinestroza Moreno
Lubin Delgado Arroyo

RESUMEN

En Paimadó, cabecera municipal de Río Quito (Chocó, Colombia), el acceso al agua potable ha estado condicionado por múltiples factores estructurales, entre los que destaca el crecimiento poblacional, la expansión de la minería aurífera y las limitaciones técnicas y operativas de la infraestructura del acueducto. Estas condiciones han generado un escenario de vulnerabilidad hídrica que compromete la calidad de vida de la comunidad y exige la formulación de soluciones integrales y sostenibles. Ante esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo principal desarrollar un modelo de simulación basado en la dinámica de sistemas para analizar las interacciones entre oferta hídrica, demanda, calidad del recurso y costos de acceso, proyectando escenarios posibles en el periodo 2024–2040. La metodología se estructuró a partir de la construcción de diagramas causales, de niveles y de flujos en la plataforma Vensim PLE, utilizando información primaria obtenida en la comunidad y datos secundarios de fuentes oficiales como el IDEAM, RAS 0330 y DANE. Con este insumo se formularon tres escenarios prospectivos: optimista, moderado y pesimista.

Los resultados de la simulación base revelaron un incremento constante en la demanda de agua, que superaría el millón de metros cúbicos anuales en 2040, impulsada por el crecimiento demográfico y las necesidades de consumo. En paralelo, la oferta de agua mostró una reducción significativa, atribuida principalmente a los impactos negativos de la minería sobre la calidad y disponibilidad del recurso. En el escenario optimista, caracterizado por un control riguroso de la actividad minera y la puesta en marcha de mejoras en el acueducto, se alcanzó cobertura suficiente y una disminución del gasto en agua de los hogares hasta el 0,18% de sus ingresos, lo que representa un alivio económico notable. En contraste, el escenario pesimista reflejó una cobertura insuficiente, con una oferta que apenas alcanzó la mitad de la demanda y familias destinando más del 30% de sus ingresos al acceso al agua, configurando un panorama de inequidad y vulnerabilidad. En conclusión, el estudio demuestra que la dinámica de sistemas es una herramienta eficaz para comprender y proyectar las complejas relaciones entre factores hídricos, sociales y económicos en comunidades rurales. El modelo se presenta como una guía útil para orientar políticas públicas, planes comunitarios y estrategias de gestión hídrica, con potencial de ser transferido a otros territorios que enfrentan problemáticas similares.

PALABRAS CLAVE: acceso al agua, comunidades rurales, dinámica de sistemas, gestión hídrica, minería, sostenibilidad.

¿Cómo citar este capítulo?

En APA: Hinestroza, C. y Delgado, L. (2026). Modelación dinámica para la gestión sostenible del agua potable en comunidades rurales del Chocó: el caso de Paimadó – Río Quito. En Bejarano-Díaz, D. y Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 87-109). Editorial TEINCO.

DOI del capítulo: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.5>

ABSTRACT

In Paimadó, the municipal capital of Río Quito (Chocó, Colombia), access to drinking water has been constrained by multiple structural factors, including population growth, the expansion of gold mining, and the technical and operational limitations of the local aqueduct system. These conditions have created a scenario of water vulnerability that undermines the community's quality of life and demands the design of integrated and sustainable solutions. In response, this research aimed to develop a system dynamics simulation model to analyze the interactions among water supply, demand, quality, and access costs, projecting possible scenarios for the period 2024–2040. The methodology was based on the construction of causal loop diagrams and stock-and-flow models in Vensim PLE, using both primary information collected in the community and

secondary data from official sources such as IDEAM, RAS 0330, and DANE. With these inputs, three prospective scenarios were formulated: optimistic, moderate, and pessimistic.

The baseline simulation revealed a steady increase in water demand, projected to exceed one million cubic meters per year by 2040, driven by demographic growth and rising consumption needs. In parallel, water supply showed a significant decline, mainly due to the negative effects of mining on both quality and availability. In the optimistic scenario, characterized by strict environmental control of mining and improvements in the aqueduct infrastructure, sufficient coverage was achieved and household water expenses decreased to 0.18% of family income, representing a notable economic relief. In contrast, the pessimistic scenario reflected insufficient coverage, with supply meeting barely half of the demand and households allocating more than 30% of their income to access water, creating a context of inequity and vulnerability. In conclusion, the study demonstrates that system dynamics is an effective tool for understanding and projecting the complex relationships among hydrological, social, and economic factors in rural communities. The proposed model is presented as a useful guide for designing public policies, community plans, and water management strategies, with the potential to be transferred to other territories facing similar challenges.

KEYWORDS: access to water, community sustainability, drinking water management, mining, rural areas, system dynamics.

How to cite this chapter?

In APA: Hinestroza, C. and Delgado, L. (2026). Modelación dinámica para la gestión sostenible del agua potable en comunidades rurales del Chocó: el caso de Paimadó – Río Quito. In Bejarano-Díaz, D. and Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 87-109). Editorial TEINCO.

Chapter DOI: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.5>

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable constituye uno de los retos más relevantes a nivel global, pues está directamente relacionado con la salud pública, la equidad social y el desarrollo sostenible. Aunque la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el agua como un derecho humano fundamental, más de 844 millones de personas en el mundo carecen de un suministro seguro y continuo, siendo las comunidades rurales las más afectadas en comparación con las urbanas (ONU, 2023; UNESCO, 2019).

En América Latina y el Caribe persiste una diferencia cercana al 13% entre la cobertura de agua para consumo en áreas urbanas y rurales. En Colombia, esta brecha alcanza hasta 46 puntos porcentuales, lo que refleja profundas desigualdades territoriales (Fernández-Vargas, 2020; Moreno, 2020). El municipio de Río Quito, en el departamento del Chocó, representa un caso ilustrativo, en este contexto, aunque cerca del 84% de la población de Paimadó cuenta con algún tipo de conexión al acueducto, el servicio no garantiza potabilidad ni continuidad, lo que obliga a la comunidad a recurrir a fuentes alternativas como aguas lluvias, quebradas o pozos artesanales, muchas veces sin condiciones sanitarias adecuadas (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2024; Alcaldía Municipal de Río Quito, 2023).

El problema se intensifica con la minería aurífera, que reduce la disponibilidad del recurso y degrada su calidad mediante la contaminación con sedimentos y metales pesados, afectando la salud de la población y los ecosistemas (Beltrán, 2023; Gutiérrez-Mosquera et al., 2021; Murillo & Vargas, 2015). Esta situación incrementa los costos de acceso, ya que los hogares deben invertir tiempo y recursos para recolectar agua segura, destinando en algunos casos más del 30% de sus ingresos a esta necesidad básica (Becerra-Perenguez et al., 2024).

Ante este panorama, surge la necesidad de implementar herramientas que permitan comprender las interacciones entre factores sociales, ambientales y económicos en la gestión del recurso hídrico. La dinámica de sistemas constituye una de las metodologías más adecuadas para este propósito, al posibilitar la representación de relaciones de causa y efecto, así como la proyección de escenarios prospectivos (Aracil y Gordillo, 1997; Phan et al., 2021; Sterman, 2000). Su aplicación en contextos internacionales como China, Nigeria y Suiza ha permitido evaluar el impacto de factores como el crecimiento poblacional, el cambio climático y las tecnologías de potabilización en la sostenibilidad del agua (Adeniran, 2014; Lemaire et al., 2021; Xiao-Jun et al., 2011). En América Latina esta dinámica también se ha empleado para analizar la gestión hídrica en México y en cuencas rurales de Colombia, confirmando su utilidad para abordar problemas locales de acceso al agua (Carrillo-Rodríguez y Toca, 2020; Zuluaga, 2011).

En este sentido, la investigación aquí presentada se orientó a diseñar un modelo de simulación en dinámica de sistemas para evaluar el acceso al agua potable en Paimadó. Se construyó un modelo conceptual que integró cuatro subsistemas: oferta hídrica, demanda, calidad del agua y costos de acceso. Este modelo permitió simular escenarios entre 2024 y 2040, considerando variables como crecimiento poblacional, intensidad de la minería y capacidad de infraestructura de potabilización (Guemouria et al., 2023; Martínez-Austria y Vargas-Hidalgo, 2016; Tian et al., 2020).

Los resultados evidencian que, bajo un escenario de control ambiental y fortalecimiento del acueducto, es posible garantizar la cobertura y reducir el gasto en agua de los hogares a niveles mínimos. En contraste, la falta de intervención conlleva déficits superiores al 50% de la demanda y presiones económicas insostenibles para la comunidad. Estos hallazgos son consistentes con estudios en comunidades rurales de Colombia y otros países, donde se ha demostrado que el fortalecimiento de la infraestructura hídrica y la regulación ambiental reducen de manera significativa los costos de acceso (Chu & Grafton, 2021; Forero-Buitrago et al., 2021; Marykutty et al., 2022).

Así, este estudio ofrece una base sólida para orientar decisiones en política pública y gestión comunitaria del recurso hídrico; de manera que el modelo constituye no solo una herramienta útil para visualizar las implicaciones de la minería y la infraestructura sobre el acceso al agua, sino también una metodología que puede transferirse a otros territorios rurales con problemáticas similares, fortaleciendo la sostenibilidad hídrica y la equidad social.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- Desarrollar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas para evaluar el acceso al agua potable en la comunidad de Paimadó, municipio de Río Quito, considerando la interacción entre la oferta hídrica, la demanda, la calidad del agua y los costos de acceso, con el fin de proyectar escenarios prospectivos y apoyar la toma de decisiones en la gestión del recurso.

Objetivos específicos

- Determinar los componentes del sistema de gestión de agua potable, sus vínculos y retroalimentación interna.
- Construir escenarios mediante un modelo cuantitativo basado en dinámica de sistemas para la gestión de agua potable.
- Aplicar el modelo de gestión de agua potable en Paimadó–Río Quito.

Hipótesis de investigación

La presente investigación tiene como hipótesis que: si se fortalecen las infraestructuras de potabilización y se implementan controles ambientales sobre la minería, la cobertura del servicio de agua potable aumentará y los costos para los hogares disminuirán.

MARCO CONCEPTUAL O TEÓRICO

Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se entiende como un enfoque coordinado que busca equilibrar el desarrollo económico, la equidad social y la sostenibilidad ambiental en el manejo del agua (Bolaños-Alfaro y Solano, 2017; Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Disponibilidad de agua

Es la cantidad y calidad de agua que se encuentra apta para satisfacer las necesidades humanas y ambientales en una región o cuenca hidrográfica determinada (Aguirre, 2011; Londoño, 2001; Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010; UNESCO, 2019).

Cuenca Hidrográfica

Para Gaspari et al. (2013), una cuenca hidrográfica es una región geográfica natural delimitada por divisorias topográficas, tales como montañas o colinas, que actúan como barreras que dirigen el flujo de agua. Esta área recoge todas las precipitaciones y las drena hacia un punto común, típicamente un río principal, arroyo, lago o mar (Gaspari et al., 2013). Además, las cuencas hidrográficas son sistemas complejos que incluyen múltiples subcuencas, cuerpos de agua y diferentes tipos de terreno, cada uno con características específicas que influyen en el comportamiento hidrológico y la gestión de los recursos hídricos (Aguirre, 2011).

Suministro de agua potable

Es el proceso de obtención, tratamiento, almacenamiento, distribución y entrega de agua segura, apta para el consumo humano, asegurando que cumpla con los estándares de calidad y seguridad establecidos para proteger la salud pública (OMS & UNICEF, 2017; UNESCO, 2019).

Costos por acceso a agua

Según la UNESCO (2019), este concepto corresponde a los gastos asociados con la obtención, tratamiento, distribución y mantenimiento del suministro de agua para diferentes usos, como el consumo doméstico, la agricultura, la industria, entre otros (Giraldo, 2008; Pinilla-Rodríguez & Torres-Sánchez, 2019; UNESCO, 2019).

Modelado y simulación

Los modelos son representaciones simplificadas y abstracciones de sistemas, procesos de fenómenos naturales o artificiales, que se utilizan para describir, analizar y predecir el comportamiento de estos sistemas o fenómenos, facilitando su comprensión, predicción y optimización (Portillo, 2019; Sinche, 2020; Zuluaga Duque, 2011). Por otra parte, la simulación es el uso de un modelo para imitar el comportamiento de un sistema real bajo diversas condiciones, donde es posible observar cómo se desempeña el sistema cuando se modifican diferentes variables o parámetros (Bojacá et al., 2017; Petit & Piera, 2004; Uribe-Gómez y Quintero-Ramírez, 2017).

Dinámica de sistemas

Para Sterman (2000), la dinámica de sistemas es una metodología que permite analizar la estructura, interacciones y comportamientos de sistemas complejos a lo largo del tiempo (Agudelo y López, 2018; Sterman, 2000). También utiliza modelos matemáticos para simular las relaciones de causa y efecto entre los componentes del sistema, proporcionando una visión clara de cómo las variables se interrelacionan y afectan mutuamente (García, 2023).

Diagrama causal (CLD)

Liévano y Villada (2013) plantean que un diagrama causal es una herramienta utilizada en la dinámica de sistemas para representar visualmente las relaciones de causa-efecto entre los distintos componentes de un sistema, este diagrama representa las variables clave del sistema y las conexiones entre ellas mediante flechas que indican la dirección de influencia. Asimismo, las conexiones pueden ser positivas, donde el aumento en una variable causa un aumento en otra, o negativas, donde un aumento en una variable causa una disminución en otra (Aracil, 1995; García, 2023; Portillo, 2019; Xiao-Jun et al., 2011). Además, los diagramas causales permiten identificar bucles

de retroalimentación, tanto positivos (que refuerzan un comportamiento) como negativos (que lo contrarrestan), proporcionando una visión clara de las dinámicas complejas que gobiernan el sistema (Aracil, 1995; García, 2023; J. Sterman, 2000).

Diagrama de Forrester

García (2023) indica que el diagrama de Forrester, desarrollado por Jay Forrester, también conocido como diagrama de flujo de sistemas, es una herramienta utilizada en la dinámica de sistemas para representar de manera detallada las relaciones y flujos dentro de un sistema complejo (García, 2023; Muñoz, 2020). De igual modo, se identifican y representan las variables de estado (*stocks*), las cuales representan los niveles acumulados de recursos o cantidades; los flujos (*flows*), que indican las tasas de cambio que afectan a estas variables; los convertidores y los nodos de información (Sterman, 2000), los cuales conectan y regulan las interacciones entre los flujos y las variables de estado, permitiendo capturar la complejidad y dinámica del sistema (Aracil, 1995; García, 2023; Sterman, 1994).

Herramientas para el modelado y simulación

Las herramientas para el modelado y simulación son programas y entornos de software especializados que permiten crear, analizar y experimentar con modelos de sistemas complejos. Además, estas herramientas facilitan la construcción de modelos matemáticos que representan las interacciones y dinámicas dentro de un sistema, permitiendo simular diferentes escenarios y evaluar sus impactos a lo largo del tiempo (García, 2023). Entre las herramientas más utilizadas en la dinámica de sistemas se encuentran Vensim, Stella, AnyLogic, Powersim, entre otras, cada una de las cuales ofrece funcionalidades para diseñar diagramas de flujo, diagramas causales y realizar simulaciones detalladas (Andrade et al., 2011; Huang et al., 2021; Libey et al., 2022; Portillo, 2019; Zuluaga, 2011).

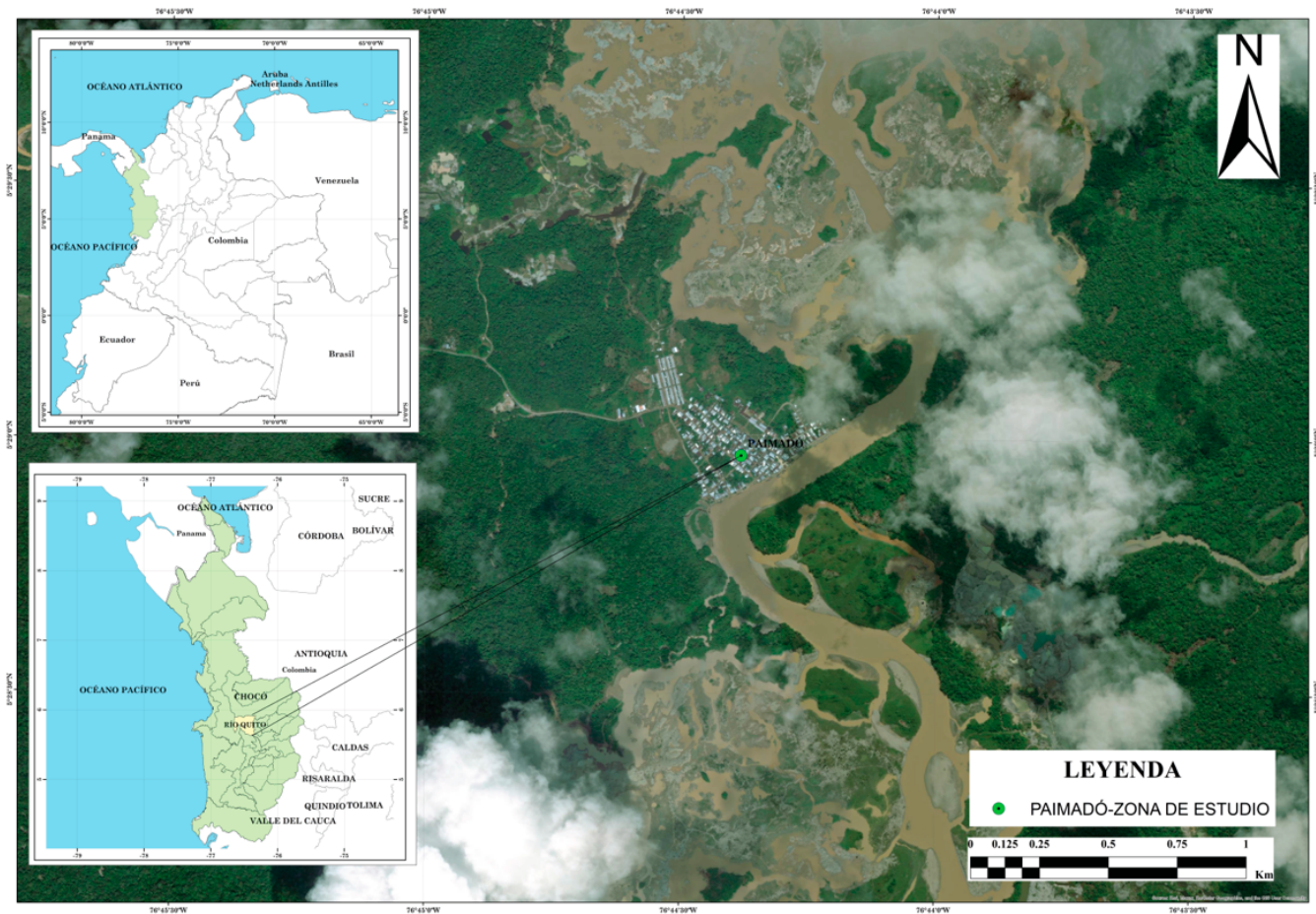
A su vez, estas proporcionan un entorno visual para la creación de modelos e incluyen capacidades avanzadas de análisis, como la identificación de bucles de retroalimentación, análisis de sensibilidad y optimización de políticas (Agudelo y López, 2018; Andrade et al., 2011; García, 2023; Petit y Piera, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y población

La investigación se realizó en Paimadó, cabecera municipal de Río Quito, Chocó, ubicado en el Pacífico colombiano (Figura 28). El centro poblado se localiza en la parte baja de la subcuenca del Río Quito, margen izquierda del río Atrato, a 45 m s. n. m., con coordenadas 5°25'00" N y 76°40'00" O. Este territorio limita al norte con Quibdó, al sur con Cantón del San Pablo y Certeguí, al este con Atrato (Yuto) y al oeste con Alto Baudó. El acceso es principalmente fluvial por el río Quito o por un tramo vial de 8,5 km que conecta con la carretera Unión Panamericana Las Ánimas–Nuquí. De acuerdo con TerriData (2024), Río Quito cuenta con 9.158 habitantes y Paimadó concentra 2.335 habitantes.

Figura 28. Ubicación geográfica de Paimadó–Río Quito, Chocó



Nota. Elaboración propia.

DISEÑO METODOLÓGICO

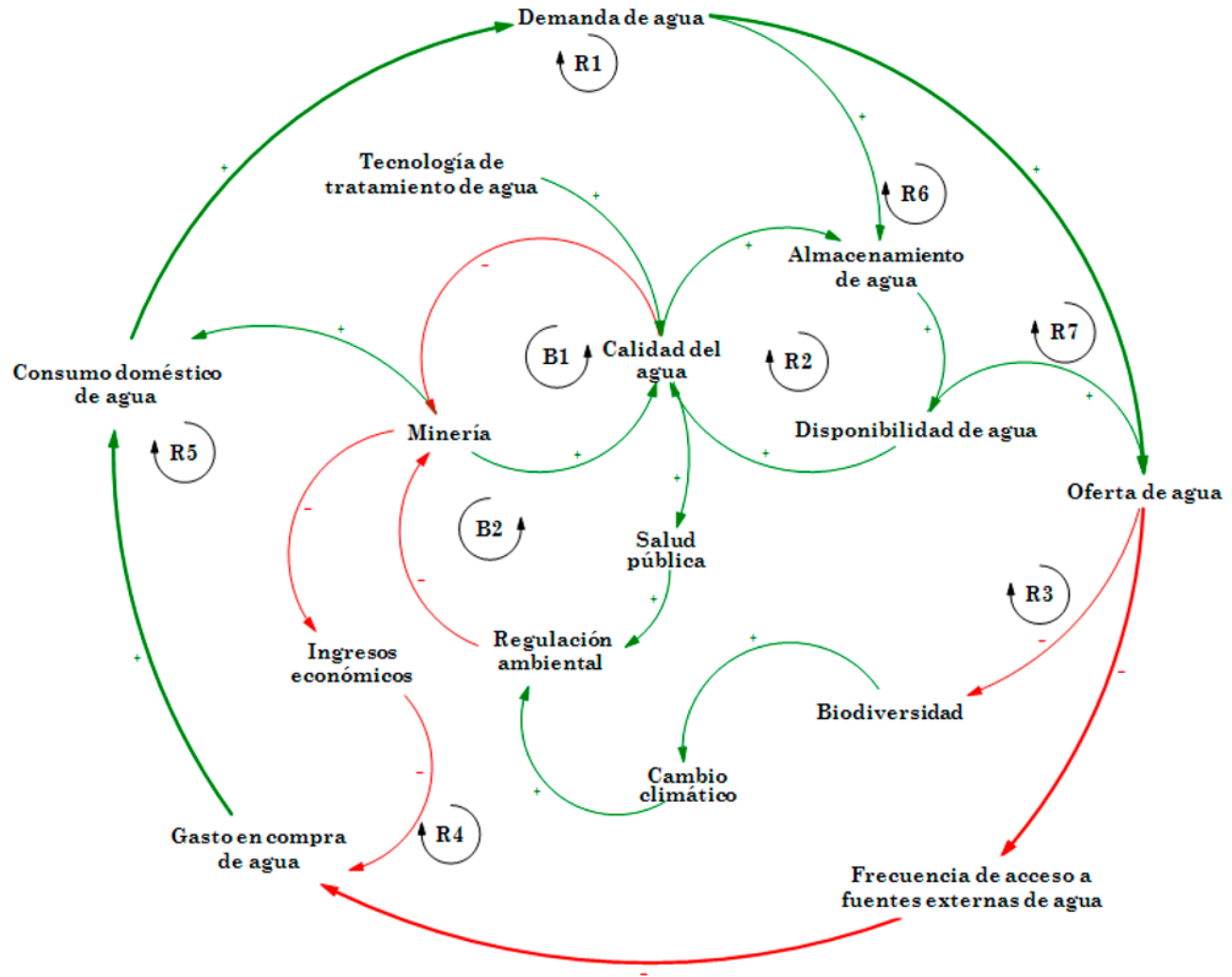
Se adoptó un enfoque cuantitativo aplicado, basado en la dinámica de sistemas. La estrategia se estructuró en cuatro fases, la primera de ellas fue la recopilación y exploración de información, para consolidar la base de datos del modelo. La segunda fase corresponde a la identificación de componentes, vínculos y relaciones causales; posteriormente, se desarrolló el modelo dinámico, representado mediante diagramas causales y de niveles-flujos. Finalmente, se dio la implementación y validación, a través de simulaciones de escenarios prospectivos. Este enfoque metodológico permite representar interacciones entre variables hídricas, sociales, económicas y ambientales a lo largo del tiempo (Aracil, 1995; Sterman, 2000).

Componentes y retroalimentación del sistema

La gestión hídrica en Paimadó está determinada por factores ambientales, sociales y económicos. El modelo identificó siete ciclos de refuerzo (R1–R7) y dos de balance (B1–B2), (ver Figura 29). Los ciclos de refuerzo explican cómo la demanda, la oferta, la minería, la biodiversidad y la calidad del agua pueden amplificar cambios en el sistema. Por ejemplo, R1 describe la relación entre demanda y oferta; R6 muestra cómo el almacenamiento regula la disponibilidad; R7 enfatiza la eficiencia en consumo doméstico. Otros ciclos (R2–R5) reflejan el vínculo entre calidad, biodiversidad, regulaciones ambientales y presión de la minería (Beltrán, 2023; Murillo y Vargas, 2015).

Por su parte, los ciclos de balance funcionan como mecanismos de autorregulación, en donde el B1 regula minería a través de la calidad del agua y tecnologías de tratamiento, mientras que el B2 conecta calidad, salud pública y regulación ambiental, estabilizando el sistema (Chu y Grafton, 2021; Forero-Buitrago et al., 2021; Marykutty et al., 2022).

Figura 29. Representación de la hipótesis dinámica para la gestión del agua en Paimadó-Río Quito



Nota. Elaboración propia.

Modelación del sistema

El modelo se formuló con ecuaciones diferenciales basadas en la metodología de Forrester (Aracil, 1995; Sterman, 2000). El modelo de Forrester se representa matemáticamente mediante la ecuación diferencial:

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

Donde dx/dt representa la variación de una magnitud en relación con el tiempo de la magnitud F , x , 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 la ecuación 2, (Guemouria et al., 2023).

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

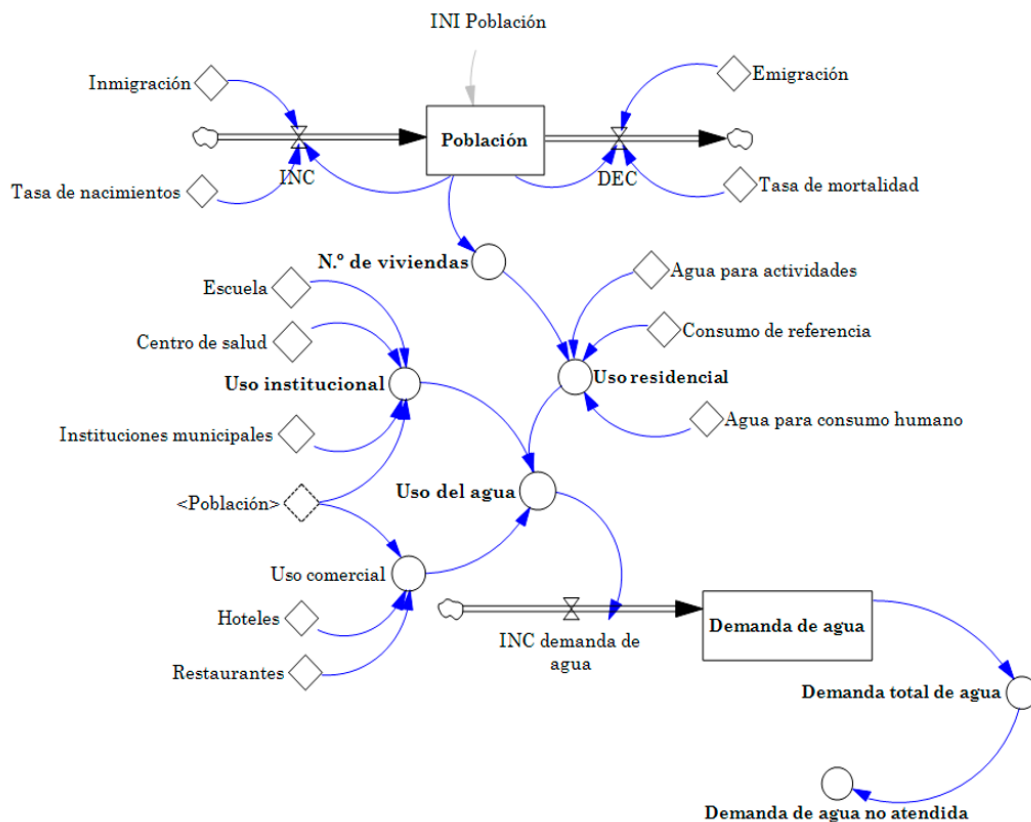
La Figura 30 y Figura 31 muestran el esquema de niveles y flujos, basado en la metodología de Forrester, el cual representa las dinámicas de población, demanda y oferta de agua en Paimadó, Río Quito. Los modelos se desarrollaron en Vensim PLE, reflejando las interacciones entre variables principales, auxiliares y constantes del sistema, 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, en este sentido, la Tabla 8 muestra algunos valores iniciales de las variables en la condición base.

Asimismo, se estructuraron cuatro módulos principales:

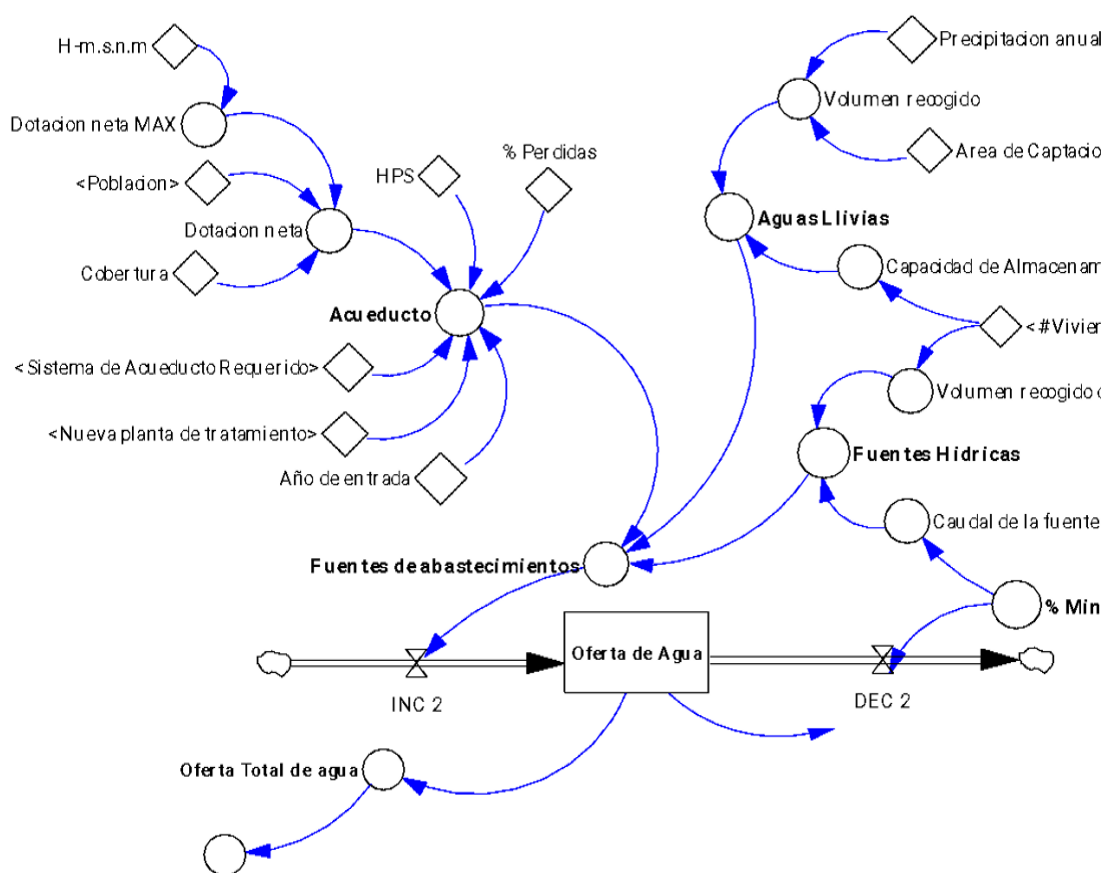
- **Población y demanda.** Considera tasas demográficas y consumos diferenciados (residencial, institucional y comercial).
- **Oferta de agua.** Incluye lluvia, fuentes hídricas y acueducto, afectado por pérdidas y presión minera.
- **Módulo económico.** Estima el porcentaje de gasto familiar en agua, en función de ingresos, costos de transporte y tiempo invertido.
- **Acueducto requerido.** Incorpora dotación neta, eficiencia del sistema, horas de servicio (HPS) y caudales de captación.

Figura 30. Diagrama de niveles y flujos del sistema de agua, basado en la metodología de Forrester

a. Módulo de población y demanda de agua



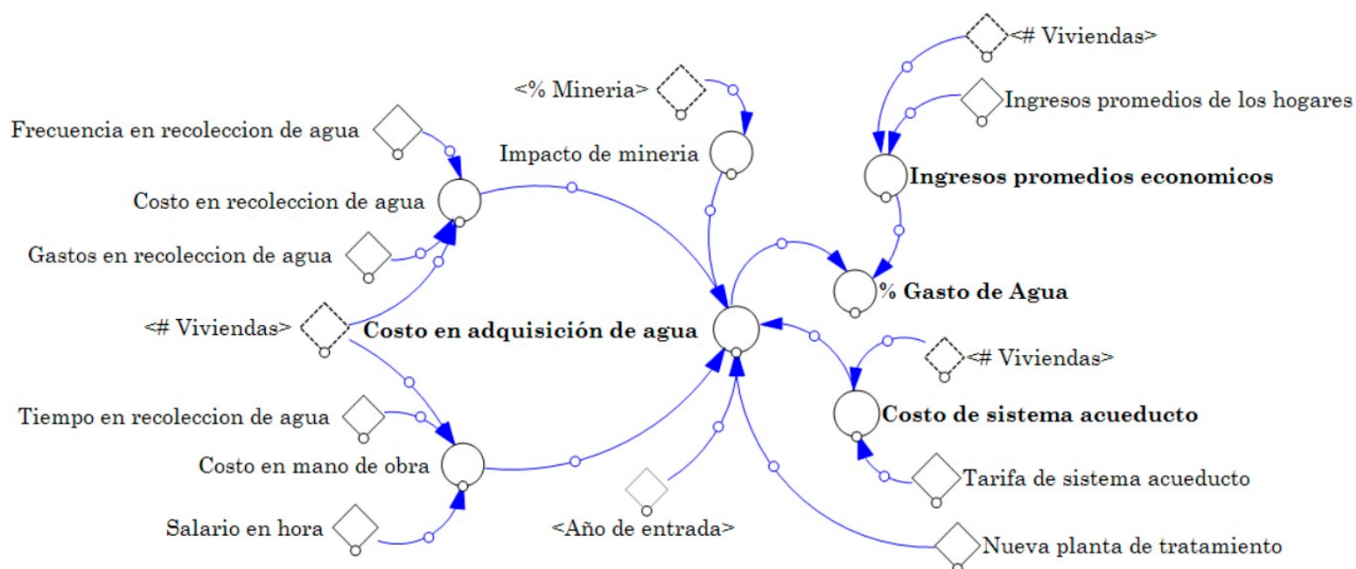
b. Módulo de oferta de agua.



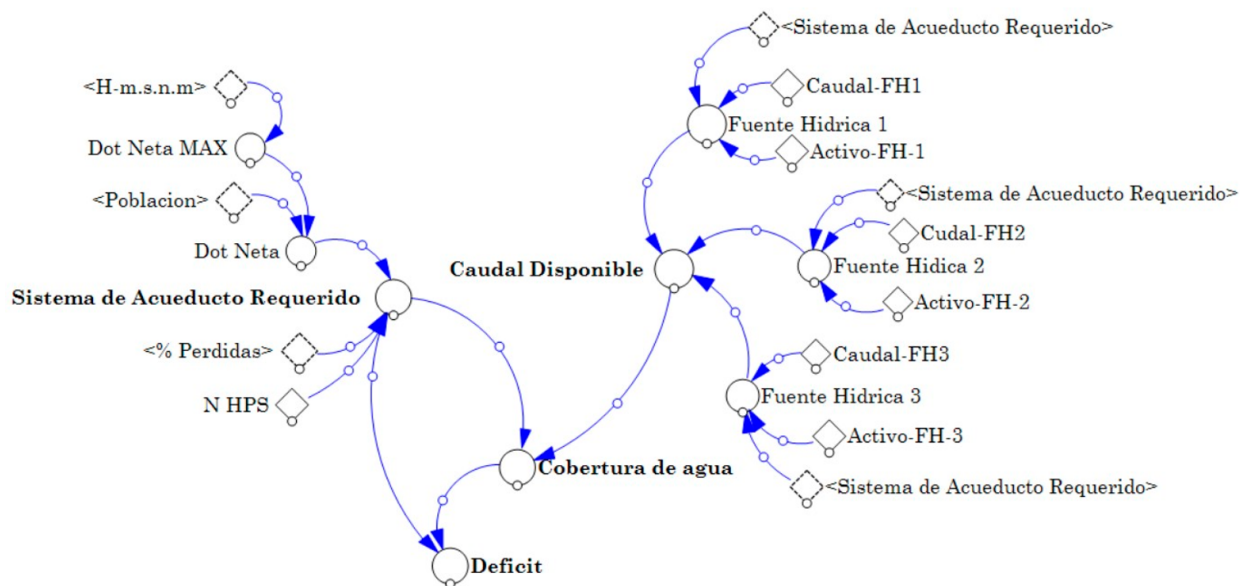
Nota. Elaboración propia.

Figura 31. Diagrama de flujos y niveles de Forrester: módulo económico y sistema de acueducto requerido

a. Módulo económico



b. Módulo de sistema de acueducto requerido



Nota. Elaboración propia.

Tabla 8. Parámetros iniciales del modelo de gestión del agua en Paimadó

Cabecera municipal Paimadó-Río Quito		
Parámetros	Valor y unidad	Fuentes
Altura sobre el nivel del mar	2335 (habitantes)	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Tasa de natalidad	2.0 % - 2.5 %	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Tasa de mortalidad	0.6 % - 0.7 %	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Tasa de inmigración	0.50 %	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Tasa de emigración	1.50 %	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Uso residencial	100 -200 (L/persona/día)	(Resolución 0330 de 2017, 2017)
Centros de salud	50 - 100 (L/paciente/día)	(Resolución 0330 de 2017, 2017)
Escuelas	15 - 50 (L/estudiante/día)	(Resolución 0330 de 2017, 2017)
Restaurantes y hoteles	20 - 50 (L/cliente/día)	(Resolución 0330 de 2017, 2017)
Precipitación anual	7073 (mm)	(IDEAM, 2024)
Altura sobre el nivel del mar	55 (M.S.N.M)	(Alcaldía Municipal de Río Quito, 2020)
Área de captación	265263 (m2)	Software AutoCAD
HPS	0-24 (Horas)	Encuesta aplicada

Nota. Elaboración propia.

Validación del modelo

La validación del modelo desarrollado para la presente investigación combinó tres enfoques:

- Estructural, verificando la coherencia del modelo con la realidad local.
- De comportamiento, contrastando salidas simuladas con datos empíricos.
- Participativa, mediante retroalimentación de actores comunitarios, expertos en gestión hídrica y académicos.

Escenarios prospectivos

Para la proyección de la propuesta a lo largo del tiempo, se definió un horizonte de 16 años (2024–2040) con tres escenarios prospectivos:

- Optimista: demanda +25%, minería reducida al 15%, planta de tratamiento en 2028 y cobertura del 100% con 8 h/día de servicio.
- Moderado: demanda +10%, minería al 30%, planta en 2035 y cobertura parcial con 4 h/día.
- Pesimista: sin aumento de demanda, minería al 65 %, sin nuevas tecnologías y cobertura del 83,6 % con 3 h/día.

Estos escenarios permiten evaluar los efectos de dinámicas socioeconómicas y ambientales sobre la sostenibilidad hídrica, identificando medidas prioritarias para mejorar el acceso al agua potable en Paimadó.

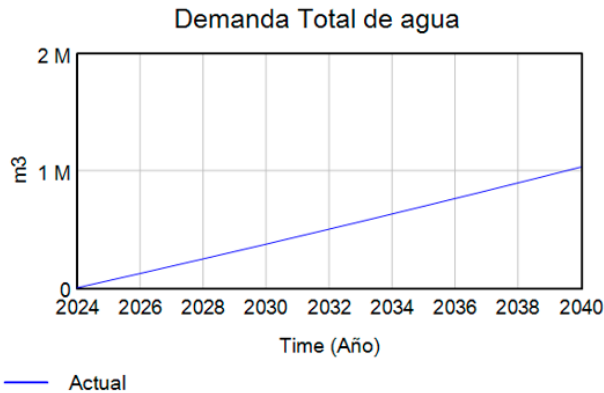
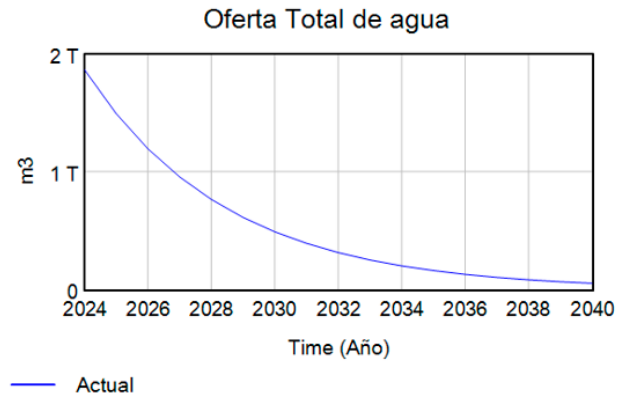
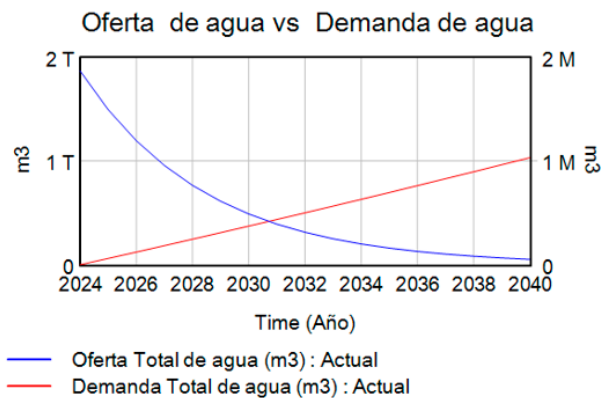
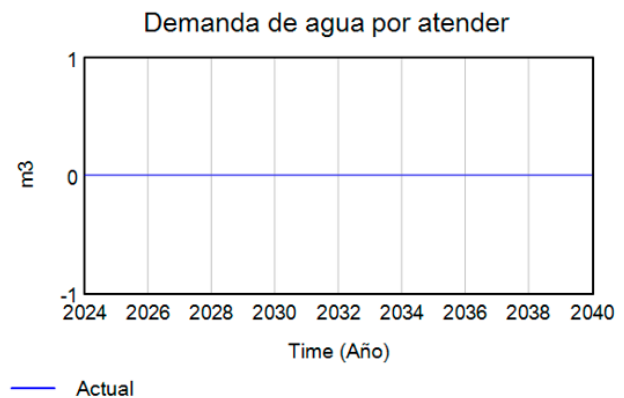
HALLAZGOS O RESULTADOS

La aplicación de la dinámica de sistemas permitió modelar e interpretar las relaciones entre la oferta y demanda de agua potable y las variables socioeconómicas que condicionan el acceso al recurso en Paimadó. La simulación base (2024–2040) proyecta un crecimiento sostenido de la demanda, que pasa de 60,965 m³/año en 2025 a 1,031,690 m³/año en 2040 (Figura 32a), impulsado por el aumento poblacional y mayores necesidades hídricas. Este comportamiento coincide con estudios en contextos rurales donde el crecimiento demográfico y la infraestructura deficiente intensifican la presión sobre los sistemas de abastecimiento (Carrillo-Rodríguez y Toca, 2020; Zuluaga, 2011).

Estos resultados resaltan la importancia de estrategias sostenibles que garanticen acceso en el mediano y largo plazo. Nazarialamdarloo et al. (2020) evidencian que la educación comunitaria en ahorro de agua puede reducir hasta un 60% el consumo doméstico, mostrando que los hábitos de uso son tan cruciales como ampliar la oferta (Nazarialamdarloo et al., 2020).

La oferta de agua disminuye drásticamente en el mismo periodo, de 1,493,360 millones de m³/año a 52,544 millones (Figura 32b). Esta caída responde al impacto de la minería sobre la calidad y disponibilidad del recurso, como lo documentan Murillo y Vargas (2015) en la cuenca del río Quito. Aunque en el corto plazo no se evidencian déficits, dado que la oferta supera la demanda (Figura 32a–32d), gran parte del recurso no es apto para consumo humano por limitaciones en tratamiento y distribución. Esta paradoja, también observada en otros contextos rurales (Abraham et al., 2022), refuerza la necesidad de optimizar el uso de la oferta disponible mediante mejores sistemas de almacenamiento y potabilización.

Figura 32. Simulación base

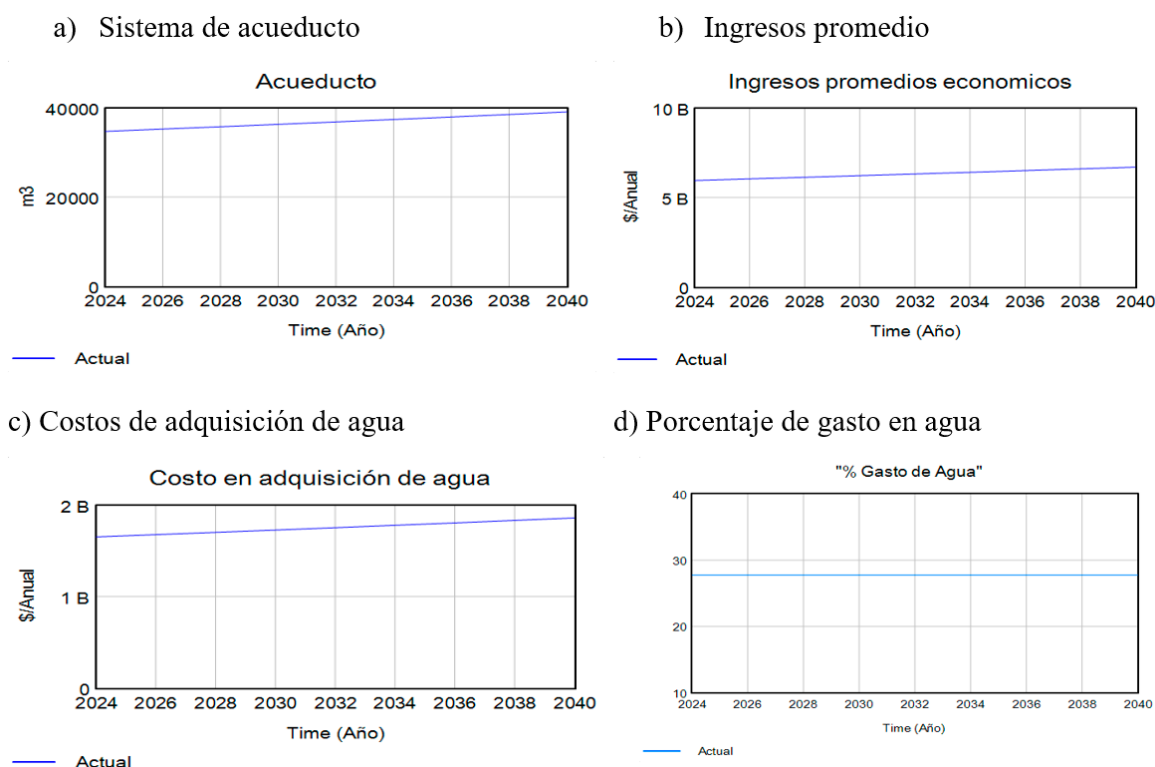
a) Demanda de agua**b) Oferta de agua****c) Demanda de agua-oferta de agua****d) Demanda por atender**

Nota. Elaboración propia.

En el acueducto local (Figura 33a), los resultados indican que actualmente suministra unos 39,111 m³/año, alcanzando cobertura del 83.6% de la población con un servicio intermitente de apenas 3 horas diarias. Aunque esta cobertura parece significativa, la comunidad manifiesta inconformidad por la mala calidad y baja presión, lo que obliga a usar fuentes alternas (pozos, ríos, compra de agua), incrementando costos y riesgos. En contextos similares, se han reportado costos de adquisición superiores al 30% del ingreso familiar (Carrillo-Rodríguez y Toca, 2020). En Paimadó, el modelo estima que en 2024 los hogares destinan en promedio 27.76% de sus ingresos a obtener agua (Figura 33d), incluyendo gastos directos (compra o acarreo) y el costo de oportunidad del tiempo de recolección.

Los ingresos familiares totales crecen de \$5,954 millones COP en 2024 a \$6,702 millones COP en 2040 (Figura 33b), mientras los costos de adquisición aumentan de \$1,653 a \$1,860 millones COP (Figura 33c). Aunque los ingresos crecen más rápido que los costos, el porcentaje del gasto en agua sigue siendo alto, lo que limita la equidad social. Este resultado concuerda con Adeniran (2014), quien halló que la mejora en sistemas de tratamiento y distribución reduce significativamente los costos unitarios en comunidades rurales. Invertir en infraestructura no solo amplía cobertura, también disminuye la carga económica sobre los hogares.

Figura 33. Simulación base



Nota. Elaboración propia.

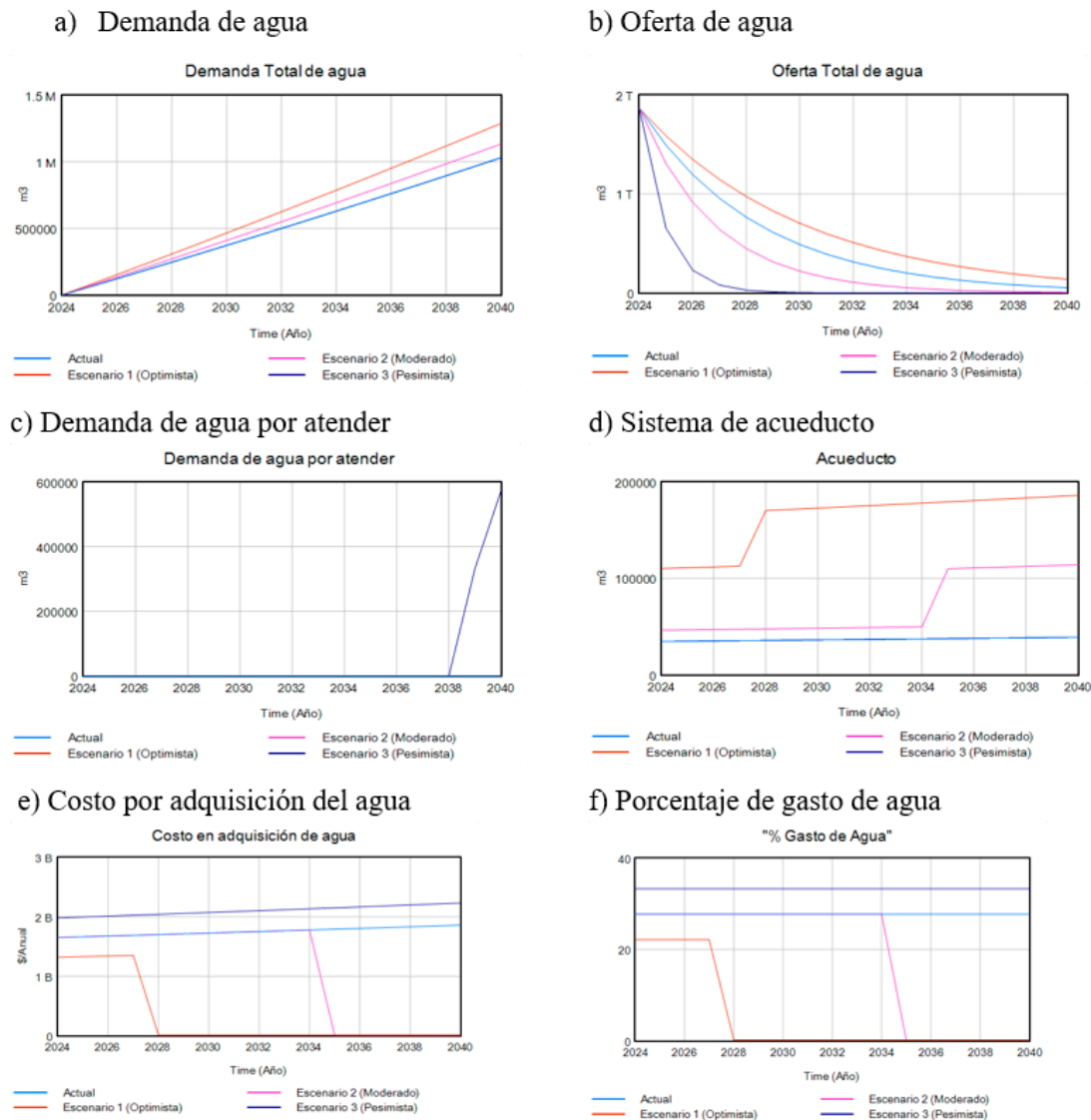
La Figura 34 resume los tres escenarios: optimista, moderado y pesimista. En el optimista, con control riguroso de minería y una planta de tratamiento en 2028, la oferta se mantiene estable hasta 138,607 millones de m³/año en 2040 (Figura 34b), suficiente para cubrir la demanda proyectada (Figura 34a). La demanda por atender se mantiene en cero (Figura 34c) y el porcentaje de ingreso destinado al agua baja al 0.18% (Figura 34f). Forero-Buitrago et al. (2021) mostraron en Colombia que la reingeniería del sistema de abastecimiento puede reducir costos energéticos y mejorar suministro (Forero-Buitrago et al., 2021). Abraham et al. (2022) confirmaron que optimizar almacenamiento permite cubrir hasta el 100% de la demanda (Abraham et al., 2022). Este escenario evidencia que, con regulación ambiental e infraestructura adecuada, el recurso puede ser suficiente y accesible para toda la comunidad.

En el moderado, con control parcial de minería y planta en 2035, la oferta se mantiene suficiente durante buena parte del periodo, pero en 2040 cae a 6,204 millones de m³, reduciendo el margen de seguridad (Figura 34b y 34c). Aunque aún supera la demanda, la tendencia muestra estrés del sistema, algunos estudios advierten que cuando la provisión cae por debajo del 40% de la demanda, los sistemas colapsan (Milano et al., 2013; Xiao-Jun et al., 2011). Autores como Huincho-Lapa et al. (2022) sugieren usar índices de escasez como alertas tempranas, por lo que social y económicamente el gasto en agua también se reduce al 0.18% del ingreso (Figura 34d y 34f), pero persisten riesgos de inequidad y vulnerabilidad.

En el pesimista, sin nuevas intervenciones y con minería en aumento, la oferta cae a 457,600 m³/año en 2040, generando un déficit de 574,000 m³ (Figura 34a–34c). En este escenario, el 55% de la demanda queda insatisfecha, confirmando un estado de escasez extrema. Wahyu Sardjono et al. (2020) advirtieron que la falta de control de bucles de retroalimentación lleva a crisis de agua severas, lo que en Paimadó se debe a que la minería intensa degrada las fuentes y obliga a usar agua de baja calidad, profundizando la crisis.

Las consecuencias socioeconómicas serían graves en caso de que la cobertura se mantenga en 83.6% y el servicio limitado, debido a que muchos hogares dependen de soluciones precarias. El modelo proyecta que en 2040 los hogares destinarán 33.31% de sus ingresos al agua (Figura 34e y 34f), un nivel muy por encima del límite de asequibilidad. Esto incluye costos directos e indirectos (compra de agua, gastos médicos). Chu y Grafton (2021) resaltan la importancia de internalizar los costos de oportunidad y riesgo en la gestión del agua.

Figura 34. Simulación de escenarios de prueba de comportamiento de las variables del modelo (2024–2040)



Nota. Elaboración propia.

LIMITACIONES Y ALCANCES

El modelo presenta limitaciones propias de la dinámica de sistemas, en donde la calidad y disponibilidad de datos locales puede contener incertidumbres, especialmente sobre minería y consumo. Además, las simulaciones incluyen supuestos simplificados que no capturan toda la complejidad futura. El horizonte temporal (2024–2040) permite evaluar tendencias, pero estudios futuros podrían ampliarlo para incluir eventos extremos o cambios climáticos.

Pese a ello, los resultados son una base sólida para orientar decisiones estratégicas: regulación temprana de la minería, inversión en infraestructura de potabilización y distribución, y políticas que reduzcan costos para los hogares. El contraste de escenarios subraya que las decisiones actuales definirán la seguridad hídrica futura y la calidad de vida en Paimadó. Además, la metodología puede aplicarse a otras comunidades rurales con problemáticas similares.

CONCLUSIONES

Mediante la simulación de diferentes escenarios se identificaron los factores clave que afectan la disponibilidad y el consumo de agua potable en Paimadó, así como las consecuencias socioeconómicas vinculadas a su acceso. En este contexto, los resultados del modelo proyectan un incremento sostenido de la demanda de agua desde 60,965 m³/año en 2025 hasta 1,031,690 m³/año en 2040, en consonancia con el crecimiento poblacional. En paralelo, la oferta hídrica disminuiría de manera considerable, pasando de 1,493,360,000,000 a 52,544,100,000 m³/año, debido principalmente a los efectos negativos de la minería en la comunidad. Estas tendencias señalan un riesgo inminente de desequilibrio entre la disponibilidad del recurso y las necesidades de los hogares a mediano plazo.

El análisis del actual sistema de acueducto mostró limitaciones significativas, en las que pese a que suministra alrededor de 39,111 m³/año y atiende al 83.6% de la población, solo ofrece un servicio intermitente de tres horas diarias, lo que es insuficiente para garantizar un acceso constante y equitativo. Esta carencia obliga a los hogares a recurrir a fuentes alternativas, incrementando el gasto promedio en agua potable al 27.76% de los ingresos familiares. A pesar de que los ingresos de los hogares tienden a crecer en el periodo analizado, el costo del agua sigue representando una carga excesiva, lo que evidencia inequidades en la accesibilidad al recurso.

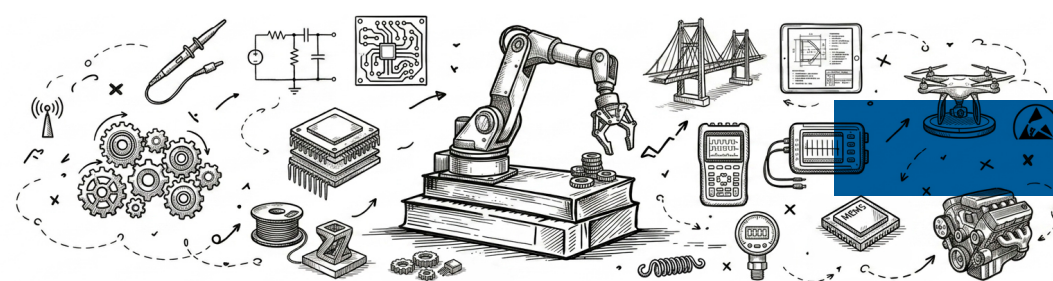
La simulación de escenarios futuros destacó la importancia de intervenciones oportunas en la gestión del agua de la zona. En el escenario optimista, que contempla una estricta normativa ambiental y la puesta en marcha temprana de una planta de tratamiento, la oferta de agua se mantendría en torno a 138,607,000,000 m³/año en 2040, sin déficits, y el gasto de los hogares se reduciría a un valor mínimo cercano al 0.18 % de sus ingresos. En contraste, el escenario moderado evidenció que, aunque la oferta cubre la demanda durante buena parte del periodo, hacia 2040 descendería a 6,204,530,000 m³/año, reduciendo de forma notable el margen de seguridad y mostrando que son necesarias acciones adicionales. Finalmente, el escenario pesimista proyectó un déficit de 574,084 m³/año, con un 55 % de la demanda insatisfecha y un gasto familiar que alcanzaría el 33.31 % de los ingresos, situación que resultaría insostenible tanto social como económicamente.

En relación con el objetivo general, el estudio logró diseñar y validar un modelo de simulación que representa de manera fiel la dinámica hídrica de Paimadó, anticipando posibles trayectorias del sistema en diferentes condiciones. Respecto a los objetivos específicos, se cumplió con la caracterización de la situación actual incluyendo oferta, demanda, costos y cobertura del acueducto; se construyó un modelo dinámico con ciclos de refuerzo y balance que permitió analizar la interacción entre variables sociales, económicas y ambientales; finalmente, se evaluaron escenarios prospectivos que confirmaron la utilidad de la dinámica de sistemas para orientar decisiones en materia de gestión hídrica.

En definitiva, los hallazgos de esta investigación evidencian la necesidad de estrategias integrales de gestión del agua que articulen regulación ambiental, inversión en infraestructura y optimización de la distribución, con el fin de equilibrar oferta y demanda a largo plazo; además, la dinámica de sistemas se demostró como una herramienta idónea para prever los efectos de distintas políticas y señalar puntos críticos de intervención. Los resultados obtenidos pueden servir como referencia tanto para investigaciones futuras como para el diseño de planes de manejo hídrico en comunidades rurales con condiciones similares, aportando a la construcción de soluciones sostenibles y equitativas en el acceso al agua potable.

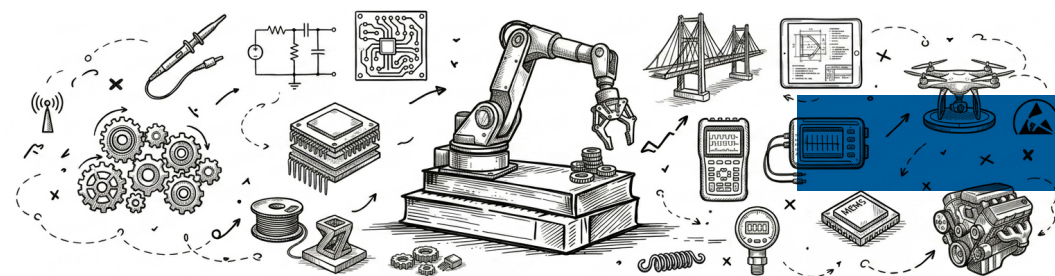
REFERI

- 106



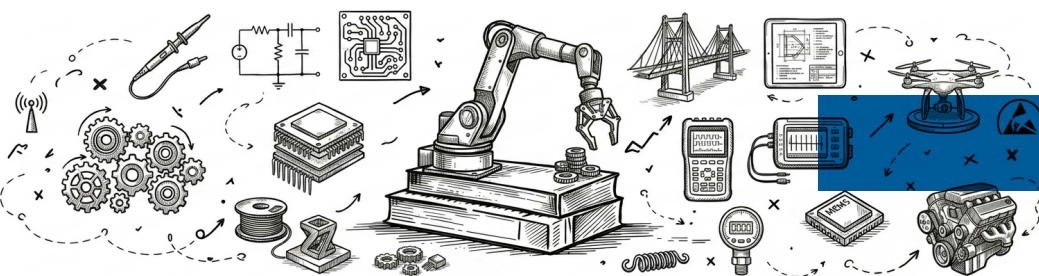
REFERENCIAS

- Bojacá Aldana, C. R., Díaz Guevara, D. C., Cala Vitery, F., Gutiérrez Bonilla, F. de P., Villalobos Camargo, G., Riascos Ochoa, J., Burgos Bedout, J., & Gil Castañeda, R. (2017). Modelado y simulación de sistemas naturales. Editorial Utadeo. https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/field_attached_file/pdf-modelado_y_simulacion_completo_fisico.pdf
- Bolaños-Alfaro, J. D., & Solano Muñoz, E. (2017). Gestor integral del recurso hídrico, un experto necesario ante la vulnerabilidad socio-natural. *Ingeniería Solidaria*, 18(38). <https://doi.org/10.15517/isucr.v18i38>
- Carrillo-Rodríguez, J., & Toca Torres, C. E. (2020). *Hacia un modelo de gestión sostenible del agua en el estado de Tabasco México*. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3733727
- Chu, L., & Grafton, R. Q. (2021). Dynamic water pricing and the risk adjusted user cost (RAUC). *Water Resources and Economics*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2021.100181>
- Fernández-Vargas, G. (2020). La gobernanza del agua como marco integrador para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Latinoamérica. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1561>
- Forero-Buitrago, G. A., Guerrero, C. D., & Herrera-Rodríguez, D. (2021). Hidrología e hidráulica computacional aplicada al suministro de agua lluvia de la vereda El Tunal en Paipa, Boyacá, Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 23(2), e2019502. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.9502>
- García, J. M. (2023). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas: Dinámica de sistemas con VENSIM PLE*. Juan Martín García.
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M., & Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Giraldo, N. (2008). Agua para consumo doméstico en Colombia: Costos y regulación tarifaria. *Gestión y Ambiente*, 11(1). <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169414452006.pdf>
- Guemouria, A., Chehbouni, A., Belaqqiz, S., Epule, T. E., Ait Brahim, Y., El Khalki, E. M., Dhiba, D., & Bouchaou, L. (2023). System dynamics approach for water resources management: A case study from the Souss-Massa Basin. *Water*, 15(8), 1506. <https://doi.org/10.3390/w15081506>



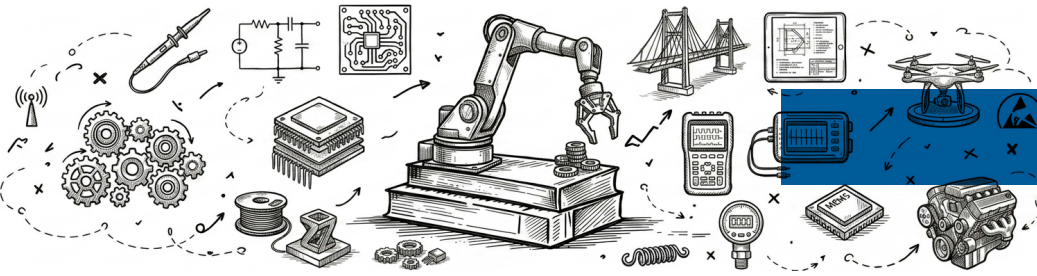
REFERENCIAS

- Gutiérrez-Mosquera, H., Marrugo-Negrete, J., Díez, S., Morales-Mira, G., Montoya-Jaramillo, L. J., & Jonathan, M. P. (2021). Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124080. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124080>
- Huang, M., Li, X., & Wang, J. (2021). Research on regional water demand prediction of the upper and middle reaches of the Pearl River Basin based on system dynamics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 784(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/784/1/012003>
- Huincho Lapa, S., Sinche Crispin, F. V., & Almidón Ortiz, C. A. (2022). Gestión dinámica de la escasez de aguas superficiales mediante la metodología de dinámica de sistemas. *Revista Geográfica de América Central*, 2(69), 175–198. <https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.6>
- IDEAM. (2024). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Lemaire, G. G., Carnohan, S. A., Grand, S., Mazel, V., Bjerg, P. L., & McKnight, U. S. (2021). Data-driven system dynamics model for simulating water quantity and quality in peri-urban streams. *Water*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213002>
- Libey, A., Chintalapati, P., Kathuni, S., Amadei, B., & Thomas, E. (2022). Turn up the dial: System dynamics modeling of resource allocations toward rural water supply maintenance in East Africa. *Journal of Environmental Engineering*, 148(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001982](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001982)
- Liévano, F., & Villada, J. (2013). Un modelo de dinámica de sistemas para la administración de inventarios. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, 6(11), 121–135. <https://doi.org/10.14508/rsdp.2013.6.11.121-135>
- Londoño, C. (2001). *Cuencas hidrográficas*. Universidad del Tolima. https://www.academia.edu/29394172/CUENCAS_HIDROGR%C3%81FICAS_BASES_CONCEPTUALES_CARACTERIZACI%C3%93N_PLANIFICACI%C3%93N_ADMINISTRACI%C3%93N
- Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 139–154. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000400139&script=sci_arttext
- Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2013). Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 500, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.010>



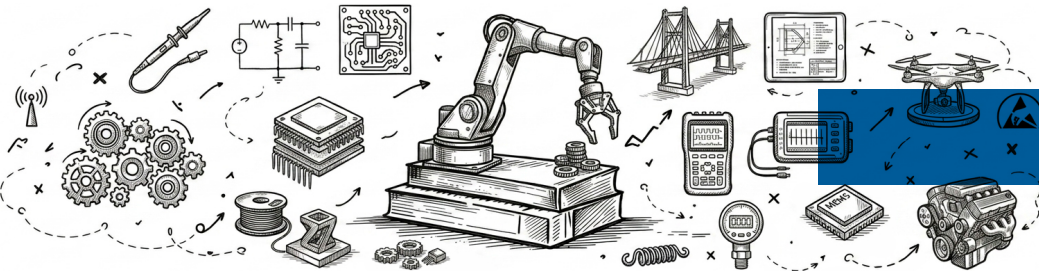
REFERENCIAS

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2024). *Informe nacional de monitoreo: Sistema General de Participaciones Agua Potable y Saneamiento Básico*. <https://minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/gestion-institucional/monitoreo-los-recursos-del-sgp-apsb>
- Moreno Méndez, J. O. (2020). Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 49, 28–37. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.5>
- Muñoz, R. (2020). *Modeling and design by Forrester's system dynamics of the hemodialysis process control system* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/20358>
- Murillo Hinestroza, Y., & Vargas Porras, L. (2015). Influencia de la minería en las características fisicoquímicas en la parte media y baja del Río Quito, Chocó, Colombia. *Revista Bioetnia*, 12(1), 41–51. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v12i1.157>
- Nazarialamdarloo, T., Jamali, H. A., Nazari, B., Emamjomeh, M. M., & Karyab, H. (2020). A system dynamics approach for water resources management with focusing on domestic water demand. *Environmental Health Engineering and Management*, 7(4), 229–235. <http://ehemj.com/article-1-685-en.html>
- OMS & UNICEF. (2017). *Agua potable gestionada de forma segura*. <http://apps.who.int/bookorders/>
- ONU. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. <https://unstats.un.org/sdgs>
- Petit, A. G., & Piera, M. À. (2004). *Modelado y simulación: Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Phan, T. D., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2021). Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>



REFERENCIAS

- Pinilla-Rodríguez, D. E., & Torres-Sánchez, Y. A. (2019). Public social expenditure, access to drinking water and sanitation for rural populations in Latin America. *Problemas del Desarrollo*, 50(196), 55–81. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.196.63499>
- Portillo, J. (2019). *Modelo de simulación para predecir el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Andahuaylas, al 2050* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/4882>
- Resolución 0330 de 2017. (2017). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Colombia. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- Sinche, F. (2020). *Modelo dinámico para la determinación de estrategias en el manejo sostenible del agua en el distrito de Daniel Hernández de la Región Huancavelica* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6499>
- Sterman, J. D. (1994). Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review*, 10(2–3), 291–330. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260100214>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Tian, Y., Li, C., Yi, Y., Wang, X., & Shu, A. (2020). Dynamic model of a sustainable water resources utilization system with coupled water quality and quantity in Tianjin City. *Sustainability*, 12(10), 4254. <https://doi.org/10.3390/su12104254>
- UNESCO. (2019). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- Uribe-Gómez, J. A., & Quintero-Ramírez, S. (2017). Application of simulation models based on the theory of constraints in production environments. *Revista CEA*, 3(6), 11–27.
- Wahyu Sardjono, H., Widhilaga Gia Perdana, T. P., & Legowo, N. (2020). System dynamics modeling for sustainable water. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(6), 2248–2252. <https://www.ijrte.org/portfolio-item/E5674018520/>



REFERENCIAS

- Xiao-Jun, W., Jian-Yun, Z., Elmahdi, A., Rui-Min, H. E., Li-Ru, Z., & Feng, C. (2011). Water demand forecasting under changing environment: A system dynamics approach. Risk in Water Resources Management: Proceedings of Symposium H03 Held During IUGG2011, Melbourne, Australia, 1–9. <https://www.researchgate.net/publication/287272027>
- Zuluaga Duque, L. (2011). *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* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8785>

