





Efectos del acceso al agua potable en la población de Murindó, Colombia: Un enfoque basado en Dinámica de Sistemas

<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.11631>


Catalina-María Maya-Iregui

Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia 

Alexandra-Carolina Pantoja-Quiscualtud

Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia 

María-Gabriel Pérez-Barrios

Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia 

Laura Milena Cárdenas-Ardila

Docente, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia 

Resumen

En Colombia, las Zonas No Interconectadas (ZNI) como Murindó presentan altos índices de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), donde se incluye la falta de acceso a agua potable. Este artículo evalúa el proceso de potabilización de agua en Murindó mediante simulación con Dinámica de Sistemas, el cual parte del modelo conceptual, modelo computacional y validación de estructura, para establecer un escenario de mejora y comparación con indicadores de evaluación. La novedad de esta investigación radica en la utilización de herramientas cuantitativas para la evaluación de políticas de potabilización con tecnologías basadas en energía solar, adaptadas a comunidades aisladas sin acueducto ni interconexión eléctrica. Dentro de los resultados, se encontró que en la situación actual del municipio existe un alto consumo de agua no potable del río y, por ende, de personas enfermas. De igual manera, al implementar una solución que consta de una planta portátil de potabilización de agua a partir de energía solar, se registró una disminución entre el 90% y el 100% en el consumo de agua no potable, así como una disminución similar en la tasa de personas enfermas, que también varió entre el 90% y el 100%. Como conclusión, la implementación de una política en el proceso de potabilización del agua en Murindó mejora los indicadores de inasistencia escolar hasta en 52%, ingresos económicos hasta en un 98% y costo de tratamiento de la enfermedad hasta en un 65%. Este estudio demuestra el potencial de soluciones sostenibles y rentables para mejorar el acceso al agua y la salud pública en comunidades rurales desatendidas.

Palabras clave

Abastecimiento de agua; energía solar; Modelo de Dinámica de Sistemas; zona rural; inasistencia escolar; Dinámica de Sistemas; desarrollo rural; municipio Murindó; Colombia.

Registro

Artículo de investigación
Recibido: 29/07/2024
Aceptado: 02/11/2024
Publicado: 05/01/2025

Effects of Access to Potable Water on the Population of Murindó (Colombia): A System Dynamics Approach

Abstract

In Colombia, the non-interconnected zones (ZNI), such as Murindó, have high levels of unmet basic needs (NBI), including a lack of access to drinking water. This article evaluates the process of water potabilization in Murindó by simulation with Systems Dynamics, which includes a conceptual model, computational model, and structure validation, to establish a scenario for improvement and comparison with evaluation indicators. The novelty of this research lies in using quantitative tools to evaluate drinking water policies with solar-based technologies, adapted to isolated communities without an aqueduct or electrical interconnection. Among the results, it was found that in the current situation of the municipality, there is a high consumption of non-potable water from the river and, therefore, of sick people. Similarly, by implementing a solution consisting of a portable water purification plant from solar energy, there was a 90% to 100% decrease in the consumption of non-potable water, as well as a similar decrease in the rate of sick people, also varied between 90% and 100%. As a conclusion, the implementation of a policy on water purification in Murindó improves school absenteeism indicators by up to 52%, economic income by up to 98% and cost of treatment of the disease by up to 65%. This study demonstrates the potential of sustainable and cost-effective solutions to improve access to water and public health in underserved rural communities.

Keywords

Water supply; solar energy; System Dynamics Model; rural area; school absenteeism; System Dynamics; rural development; Murindó municipality; Colombia.

License



Cómo citar este artículo

MAYA-IREGUI, Catalina-María; PANTOJA-QUISCUALTUD, Alexandra-Carolina; PÉREZ-BARRIOS, María-Gabriel; CÁRDENAS-ARDILA, Laura Milena. Efectos del acceso al agua potable en la población de Murindó, Colombia: Un enfoque basado en Dinámica de Sistemas. En: Entramado. Enero - junio, 2025. vol. 21, no. 1 e-11631 p. 1-25. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.11631>

1. Introducción

Murindó, Antioquia (Colombia), enfrenta una grave crisis de acceso al agua potable, lo que ha generado altos índices de enfermedades infecciosas y afectado el desarrollo socioeconómico de su población. La ausencia de infraestructura de acueducto y alcantarillado obliga a la comunidad a consumir agua no tratada, aumentando su vulnerabilidad ante problemas de salud pública y limitando su calidad de vida ([DANE, 2018](#)).

El agua es un recurso fundamental para la subsistencia del hombre, sin embargo, existen regiones en el mundo donde el acceso a agua potable y segura es restringido. Esta falta de acceso puede verse reflejado en el índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) el cual tiene como objetivo medir y caracterizar la pobreza de una población mediante censos, en los que se examina si los hogares satisfacen o no las necesidades elementales requeridas para tener una vida digna ([Feres y Mancero, 2001](#)). Según [Veget Cabrales \(2008\)](#), América Latina es la región más inequitativa del mundo, en donde el índice de NBI ha sido clave para identificar prioridades de inversión social en esta parte del mundo, en la que la insatisfacción de necesidades básicas más extendida se debe al poco acceso a vivienda y servicios.

Dentro de esta región se encuentra Colombia, país catalogado como uno de los más desiguales en América Latina y el Caribe ([Mesa Suárez, 2019](#)). Este país cuenta con altos índices de NBI, tales como el acceso a servicios de energía, agua potable, educación, salud y vivienda digna ([Feres y Mancero, 2001](#)). Estos índices están presentes específicamente en las zonas rurales del país que aún carecen de acceso al servicio de electricidad constante, las cuales son denominadas como zonas no interconectadas (ZNI) ([Anzures et al., 2018](#)). Estas zonas son caracterizadas por presentar baja densidad poblacional, por estar alejados de los centros urbanos y por el difícil acceso debido a su topografía ([Muñoz-Arias et al., 2021](#)).

Para el año 2021, las ZNI corresponden al 52% del área del territorio colombiano, en las cuales las condiciones de vida generan un alto índice de NBI ([Superservicios, 2021](#)). En dichas zonas se encuentra el municipio de Murindó (Colombia), perteneciente al departamento de Antioquia, el cual tiene un 81,73% de su población con NBI según el [DANE \(2018\)](#), dado al permanente aislamiento y poca presencia del estado. Esto se ha reflejado en las circunstancias precarias en las que se encuentra la población respecto al servicio y acceso de agua potable, lo que sumado a otros problemas imposibilita el desarrollo del municipio.

Murindó (Colombia) actualmente no cuenta con un servicio de alcantarillado y acueducto, factor que dificulta el abastecimiento de agua potable ([Maturana, 2016](#)). Por ello, la comunidad se ve obligada a recurrir a métodos caseros de potabilización, lo que no garantiza la eliminación de microorganismos, parásitos, bacterias y residuos tóxicos presentes en el agua. Esta situación incrementa el riesgo de enfermedades de origen microbiano y parasitario, como infecciones diarreicas, respiratorias agudas y diversas enfermedades tropicales desatendidas, con graves consecuencias tanto económicas como sociales ([Ramos Mancheno, 2024](#)).

La falta de acceso a agua potable es una problemática compleja y que se ha manifestado en diversas partes del mundo, algunos autores han utilizado diversos métodos de simulación para abordarla en casos específicos de diferentes países, algunos de los métodos más comunes han sido la programación lineal y el modelado, el uso de modelos híbridos inteligentes y optimización multiobjetivo, ([Bashar et al., 2022](#); [Bashar et al., 2021](#)). Dentro de los países que han usado estos métodos se encuentra a China ([Yue et al. 2022](#)), Estados Unidos ([Vizanko et al., 2024](#)) y en Latinoamérica otros como Colombia ([Jauregui, 2020](#)), México ([Carmona-Paredes et al., 2023](#)), Argentina ([Balestri, 2020](#)) y Venezuela ([Godoy, 2019](#)) para abordar la problemática de escasez de agua potable. Sin embargo, estos métodos presentan ciertas limitaciones, como la falta de consideración de la complejidad y la realimentación en los sistemas de agua y saneamiento, así como la dificultad para incorporar la incertidumbre bajo condiciones naturales y la variabilidad en los modelos ([Giudici et al., 2019](#)). Estudios recientes han demostrado que la Dinámica

de Sistemas es una herramienta eficaz para modelar el acceso al agua potable y evaluar soluciones en comunidades rurales ([Keyhanpour et al., 2021](#); [Matlakala y Mona, 2024](#); [Maneas et al., 2022](#)). A diferencia de enfoques tradicionales, la Dinámica de Sistemas permite analizar la interacción entre factores clave como infraestructura, salud y financiamiento, proporcionando una visión más integral para la toma de decisiones ([Hwang, 2023](#); [Brown et al., 2022](#))

En este contexto, la Dinámica de Sistemas se ha consolidado como una herramienta efectiva para abordar problemas complejos de acceso al agua potable. A partir de esta, se han propuesto modelos para evaluar la contaminación de diversas fuentes hídricas ([Dmitrović, Dušak y Vučinić, 2015](#)), y escasez de este recurso ([Huincho Lapa et al., 2022](#)). Además, la Dinámica de Sistemas permite modelar la complejidad y facilita las interacciones entre numerosos factores en los sistemas de agua y saneamiento, así como incorporar la incertidumbre y la variabilidad en los modelos ([Wang, Wang, y Yan, 2021](#); [Stermann, 2002](#)). Así mismo, permite simular diferentes escenarios para evaluar impactos ambientales, sociales y económicos a largo plazo. Brindando un complemento al estudio de problemáticas complejas como lo es el acceso al agua potable en zonas rurales.

Este estudio emplea Dinámica de Sistemas para analizar el proceso de potabilización del agua en Murindó (Colombia), identificando los factores críticos que afectan su acceso y evaluando soluciones sostenibles para mejorar la calidad de vida de la comunidad con el propósito de responder a dos interrogantes fundamentales: ¿Cuáles son los factores críticos que afectan el acceso al agua potable en Murindó (Colombia)? y ¿cómo puede la Dinámica de Sistemas contribuir a la identificación y solución de estos factores?

A través de simulaciones computacionales, se cuantifican los efectos de diferentes estrategias de intervención, permitiendo desarrollarlas de una manera más efectiva y basadas en evidencia.

La relevancia de este estudio radica en su contribución a la toma de decisiones en comunidades con acceso limitado al agua potable, proporcionando una herramienta de modelado que puede replicarse en otros contextos similares. Al simular escenarios de intervención con la metodología de Dinámica de Sistemas, esta investigación facilitará la planificación de políticas públicas y estrategias sostenibles para la mejora de la calidad del agua en zonas rurales, posibilitando el proceso de aprendizaje para personas interesadas en abordar esta herramienta en futuras investigaciones.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: la primera sección presenta una descripción general de la zona no interconectada abordada en este artículo, el municipio de Murindó (Colombia), brindando una caracterización general del municipio y su proceso de potabilización. Posteriormente, se encuentra la sección de la metodología, donde se describe el modelo conceptual y el modelo computacional, abordados con dinámica de sistemas. En la tercera sección, se presentan los resultados obtenidos del modelo de simulación, apoyados en gráficas de comportamiento, donde se evidencian los efectos no solo directos de la falta de acceso a agua potable sino efectos en indicadores tales como: ingresos económicos, porcentaje de inasistencia escolar y costo de tratamiento de la enfermedad. Finalmente, se encuentran las conclusiones a las que se llegaron en el desarrollo del artículo.

2. Marco teórico

2.1. Caracterización del municipio de Murindó

El municipio de Murindó (Colombia) pertenece a la zona del Medio Atrato ([Ministerio de Trabajo, 2015](#)), ubicada en la subregión de Urabá, perteneciente al departamento de Antioquia-Colombia, con un área total de 1349 kilómetros, que se compone de tres centros poblados, cinco corregimientos y veinticinco veredas ([Secretaría de Agricultura, 2015](#)), de las cuales aproximadamente el 64% de la población total vive en zonas rurales ([Valoyes, 2020](#)).

Este municipio se ha caracterizado por estar en un permanente aislamiento y tener poca presencia del estado. Murindó no cuenta con un sistema funcional que permita la eliminación de aguas servidas y residuales ([Ministerio de Trabajo, 2015](#)), lo que ha contribuido a que presente condiciones precarias de agua potable y saneamiento. Es así, como las condiciones antes mencionadas afectan negativamente la salud de los habitantes los cuales presentan altas tasas de mortalidad infantil, donde por cada mil niños nacidos vivos mueren alrededor de 39,8 niños antes de cumplir un año de vida ([Rojas y Burgos, 2019](#)).

Las condiciones precarias del municipio también se ven reflejadas en el sistema de salud, donde solo se cuenta con un hospital para atender las emergencias y prestar los diferentes servicios de salud, sin embargo, este solo puede ofrecerle a la población servicios de primer nivel o atención primaria, es decir, permite resolver las necesidades de atención básicas y que se presenten con mayor frecuencia ([Vignolo, 2011](#)). Por lo tanto, todas las personas que presentan complicaciones o enfermedades graves deben ser trasladados a otros municipios ([Ministerio de Trabajo, 2015](#)).

En términos de infraestructura, las viviendas del municipio no cuentan con acceso a agua potable debido a que no es posible la cobertura por falta de alcantarillado, imposibilitando así obtener mediciones como el índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA) y la Certificación Sanitaria Municipal en Agua Potable ([Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, 2020](#)). Lo anterior ha llevado a que los habitantes de Murindó (Colombia) busquen otras fuentes de abastecimiento de agua dada la riqueza hídrica y forestal del municipio, optando por la recolección de agua lluvia por medio de tanques recolectores ([Maturana, 2016](#)) o por aprovechar el acceso que tienen al río Atrato, específicamente, al río Murindó ([Sánchez, 2009](#)).

A nivel nacional, informes vinculan la deficiente calidad del agua con tasas elevadas de mortalidad infantil y enfermedades diarreicas agudas ([Guzmán, Nava y Díaz, 2015](#)). En la región del Pacífico, por ejemplo, se observa una reducción en la incidencia de diarrea aguda por cada 1000 habitantes, en contraste con una brecha marcada entre áreas urbanas (IRCA 8,2%) y rurales (IRCA 41,3%) ([Rodríguez Moreno y Díaz García, 2022](#)). Aunque estas cifras reflejan la efectividad de algunos programas de potabilización en Colombia, estudios muestran que estos proyectos dependen de infraestructura básica, lo que limita su aplicabilidad en zonas como Murindó ([Cuéllar Rodríguez et al., 2024](#)). En Murindó (Colombia), el contexto de aislamiento geográfico y la ausencia de inversión en acueductos hace que soluciones aplicadas en otras regiones no sean viables sin un enfoque adaptado a sus necesidades específicas.

2.2 Descripción del proceso de potabilización del agua en el municipio de Murindó (Colombia)

La potabilización del agua es el proceso de tratamiento que se aplica al agua para hacerla segura y apta para el consumo humano, en el que se reduce la presencia de contaminantes, microorganismos y sustancias que puedan ser riesgosas para la salud ([Murillo et al., 2021](#)). Teniendo en cuenta los diferentes efectos que puede causar el consumo de agua para las personas es necesario contar con un proceso de potabilización que asegure una ingesta segura. Para ello, según el proceso convencional se debe cumplir con las etapas de captación, pretratamiento, tratamiento, almacenamiento y distribución ([Flórez y Upequi, 2020](#)).

En el proceso convencional de potabilización, se siguen las etapas antes definidas, que inician con la captación en la que se toma el agua de la fuente natural, luego pasa a la etapa de pretratamiento en el que se eliminan las partículas contaminantes y otras, para luego seguir a la etapa de tratamiento en donde se realizan los procesos de coagulación, fluctuación, sedimentación, filtración y desinfección, para así proceder con el almacenamiento del agua en los tanques y la distribución del agua en las distintas redes disponibles como se observa en la [Figura 1](#).

Los sistemas tradicionales de potabilización han demostrado ser eficaces en zonas con infraestructura adecuada, pero en comunidades rurales aisladas como Murindó, su sostenibilidad es cuestionable. La aplicación de sistemas de filtración en múltiples etapas en instituciones educativas en Colombia ha demostrado producir agua potable libre de coliformes fecales ([Matiz et al., 2009](#)). Sin embargo, en

comunidades donde no existen redes de distribución ni programas de mantenimiento, estos sistemas dependen de una gestión local eficiente, lo que dificulta su implementación" ([Cuéllar Rodríguez et al., 2024](#)).

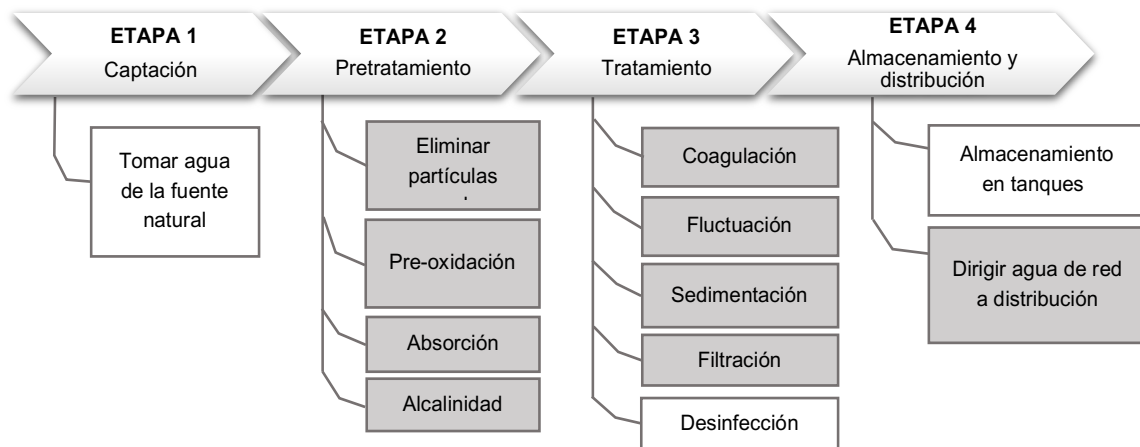


Figura 1. Proceso de potabilización del agua general y en Murindó

Fuente: Elaboración propia basado en [Flórez y Upegui \(2020\)](#).

Sin embargo, los métodos convencionales de potabilización presentan dificultades en comunidades sin infraestructura adecuada. Investigaciones han demostrado que sistemas como la filtración por membranas, la cloración y la ósmosis inversa requieren un alto consumo energético y mantenimiento especializado, lo que los hace inviables en contextos rurales como Murindó ([Díaz Therán et al., 2023](#); [Suárez Serrano et al., 2019](#)).

Además, los modelos de gestión influyen en la sostenibilidad de estos sistemas. En países como Colombia y Chile, la participación comunitaria ha sido clave para el éxito de los programas de potabilización, mientras que la falta de gestión local ha generado fracasos en su implementación ([Frêne et al., 2022](#)).

En Murindó, la falta de infraestructura de alcantarillado y acueducto impide que este proceso convencional tenga su curso normal y por el contrario solo se realicen algunas actividades, en la [Figura 1](#) se observan procesos sombreados que corresponden a los procesos que no se realizan en el municipio de Murindó. En la [Figura 1](#) también se puede evidenciar que en el municipio Murindó, el proceso de potabilización tiene falencias, dejando la responsabilidad del tratamiento del agua al ciudadano, donde solo se efectúa la captación desde la fuente y se realiza el proceso de desinfección, ya sea adicionando cloro, piedra lumbre o hirviendo el agua ([Maturana, 2016](#)).

Estudios han demostrado que la falta de acceso a agua potable no solo afecta la salud, sino también la educación y la economía de las comunidades rurales ([Organización mundial de la salud, 2018](#)). Esta situación representa un riesgo para la salud de la población, ya que no se garantiza una eliminación adecuada de los contaminantes en el agua ocasionando un aumento en la inasistencia en zonas donde los niños deben recolectar agua diariamente ([Rodríguez Moreno y Díaz García, 2022](#)) y pérdida de tiempo de los adultos, lo que se traduce en pérdida de ingresos económicos.

Asimismo, el consumo de agua contaminada incrementa los costos médicos y reduce la productividad laboral, afectando los ingresos económicos. En otros municipios con características similares, se ha demostrado que la implementación de sistemas eficientes de potabilización reduce enfermedades diarreicas y mejora la calidad de vida ([Galeano Botero et al., 2023](#)). En Murindó, donde el problema es más severo, una solución sostenible es esencial para mitigar estos efectos.

Para mejorar la calidad del agua y garantizar su potabilidad en Murindó, es necesario implementar un sistema de potabilización adecuado que cumpla con los estándares de calidad y seguridad establecidos. Esto implica la elaboración e implementación de procesos de tratamiento adecuados para garantizar la eliminación de contaminantes y microorganismos patógenos (Murillo et al., 2021). En este sentido, la Dinámica de Sistemas es una herramienta útil para entender cómo se relacionan factores como la infraestructura, la gestión del agua y la salud de la comunidad, permitiendo evaluar diferentes soluciones y su impacto a largo plazo (Keyhanpour et al., 2021)

Estudios previos han utilizado la Dinámica de Sistemas para optimizar la distribución del agua en contextos urbanos y prever los efectos del cambio climático en el suministro hídrico (Hwang, 2023; Matlakala y Mona, 2024). Sin embargo, en comunidades rurales aisladas, su aplicación ha sido menos frecuente. Este estudio busca aprovechar esta metodología para modelar el acceso al agua en Murindó y evaluar estrategias sostenibles de potabilización.

3. Metodología

Dada la compleja problemática encontrada en el municipio de Murindó (Colombia), el presente artículo se desarrolla por medio de Dinámica de Sistemas. Esta es una metodología que permite simular situaciones de alta complejidad a futuro y diseñar políticas para una mejora sostenida (Sterman, 2002). Así, se hace una hipótesis del problema de la potabilización del agua en un Municipio aislado con la construcción de un modelo conceptual (diagrama causal) desarrollado en el programa Vensim, se elabora el modelo computacional que simule la problemática inicial con la herramienta Powersim Studio 2005, se valida el modelo y se evalúan las políticas de solución que permitan ofrecer alternativas para mejorar el tratamiento del agua en este Municipio teniendo en cuenta su contexto particular.

Para la construcción de dichos modelos se hace necesario el uso de variables, las cuales poseen una relación causal entre ellas. La búsqueda de estas variables se realizó a partir del objetivo principal del estudio a través de fuentes gubernamentales y artículos científicos, permitiendo la definición de su tipología (nivel, flujo, auxiliar, constante). Posteriormente, se buscó el valor cuantitativo constante y el valor inicial de las variables, por medio de fuentes de información como son el DANE, Ministerio de salud y protección, páginas web como Alcaldía de Murindó e informes de la misma así como se muestra en la Figura 2.

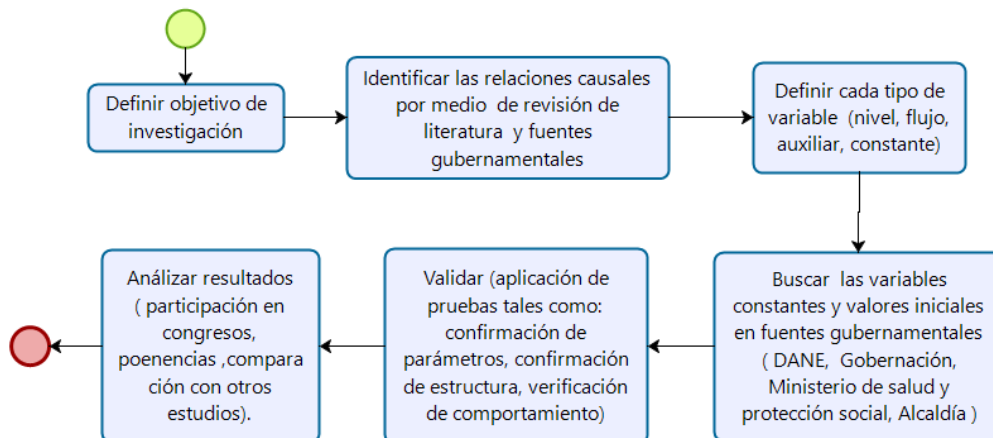


Figura 2. Proceso de investigación
Fuente: Elaboración propia

3.1. Modelo conceptual

En la [Figura 3](#), se presenta la hipótesis dinámica compuesta por 4 secciones, estas son: 1) el comportamiento poblacional del municipio teniendo en cuenta las personas y viviendas (variables de color azul), 2) el proceso de captación de agua lluvia (variables de color verde), 3) el proceso de captación de agua del río (variables de color gris) y 4) la problemática que genera el consumo de agua no potable (variables de color naranja).

Dentro de la hipótesis se observan ciclos de realimentación tanto de refuerzo (identificados con una R) y ciclos de balance (identificados con una B), el primero de los ciclos es el ciclo de refuerzo R1, el cual describe la problemática como tal del municipio, partiendo de una población total, la cual aumenta con los nacimientos (R2) y disminuye con las muertes (B3). Estas muertes incrementan con las personas enfermas (B2) que llegan a esta condición por un aumento en el consumo total de agua no potable por persona. Claramente, las personas que caen en esta enfermedad pueden recuperarse por tratamientos médicos (B1). Lo anterior describe la sección 1 y 4 del diagrama causal ([Figura 3](#)).

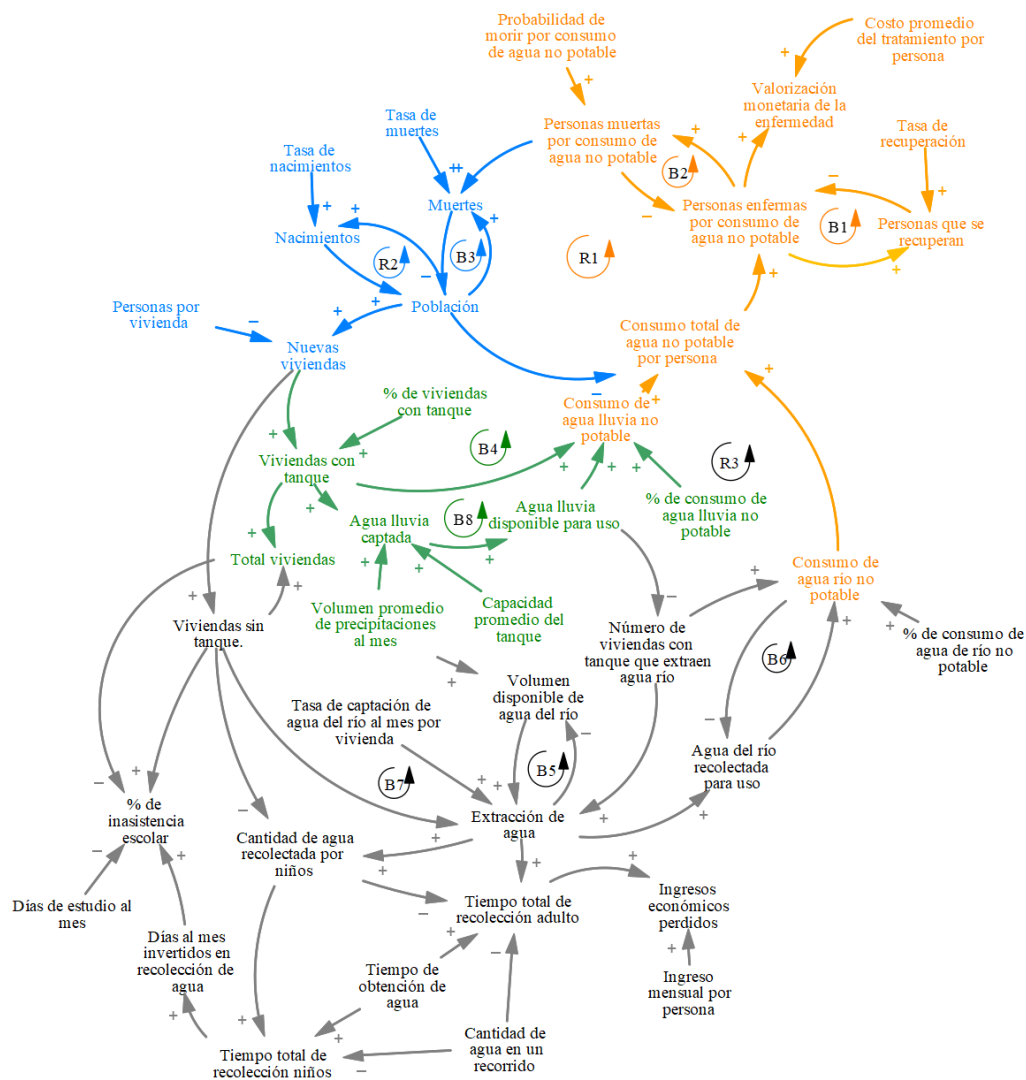


Figura 3. Diagrama causal de la problemática del consumo de agua no potable en Murindó.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la sección 2, se encuentra el ciclo R3 que se forma a partir de la población e incluye el comportamiento de las viviendas, donde algunas de estas viviendas tienen tanque recolector, a medida que aumenta viviendas con tanque recolector se genera más consumo de agua lluvia no potable (B4). Dentro de estas relaciones se encuentra el agua lluvia disponible para uso, que proviene del agua captada (B8). Esta variable es la que influye en el número de viviendas con tanque que extraen agua del río, puesto que, si las viviendas no tienen disponibilidad del recurso hídrico a causa de las precipitaciones, se ven obligadas a dirigirse al río a captar de esta fuente, por lo que el consumo de agua del río no potable aumentará y, por ende, las personas enfermas y muertas, como es descrito con el ciclo R1. En este punto, se evidencia la influencia de la variable exógena 'Volumen promedio de precipitaciones al mes', que afecta directamente en el agua lluvia captada y en el volumen del río.

Por otra parte, en la sección 3 (color gris), con relación a los ciclos de balance, el ciclo B7 comprende a las viviendas sin tanque. Estas viviendas son las más problemáticas, puesto que son las que definitivamente requieren del agua del río para obtener el recurso. Por tanto, aumenta la extracción de esa fuente (B5), el agua recolectada (B6) y el consumo de agua del río no potable (B6), que por sus condiciones de contaminación y turbiedad es la más difícil de potabilizar, generando más enfermedades. Este ciclo describe inicialmente las relaciones encontradas en el proceso de captación de agua del río, que con ayuda de variables como el tiempo total de recolección, la cantidad de agua obtenida en un recorrido, los ingresos económicos y otras que se encuentran en la sección 3 ([Figura 3](#)), es posible identificar efectos que tienen en los índices de inasistencia escolar y costo de recolección de agua.

Para una revisión sintetizada de los ciclos de realimentación dentro del diagrama causal, se puede revisar la [Tabla 1](#), donde la columna "relaciones" se refiere a las variables que intervienen en el ciclo y el campo "descripción" presenta una idea de la función del ciclo en el sistema.

Tabla 1.

Ciclos de realimentación presentes en la problemática de potabilización del agua

Ciclo	Relaciones	Descripción
R1	Población -> - Consumo total de agua no potable por persona -> + Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> + Muertes -> - Población	Problemática de las personas enfermas por consumo de agua no potable.
R2	Población -> + Nacimientos -> + Población	Nacimientos.
R3	Población -> + Nuevas viviendas -> + Viviendas con tanque -> + Agua lluvia captada -> + Agua lluvia disponible para uso -> - Número de viviendas con tanque que extraen agua del río -> + Consumo de agua río no potable -> + Consumo total de agua no potable por persona -> + Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> + Muertes -> - Población	Relación del agua lluvia disponible con respecto a las viviendas con tanque que tendrían que dirigirse al río a recolectar agua.
B1	Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas que se recuperan -> - Personas enfermas por consumo de agua no potable	Recuperación de la enfermedad.
B2	Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> - Personas enfermas por consumo de agua no potable	Muertes a causa de la enfermedad.
B3	Población -> + Muertes -> - Población	Muertes.
B4	Población -> + Nuevas viviendas -> + Viviendas con tanque -> + Consumo de agua lluvia no potable -> + Consumo total de agua no potable por persona -> + Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> + Muertes -> - Población	Relación de las viviendas que poseen tanque con el consumo de agua lluvia no potable.
B5	Volumen disponible de agua del río -> + Extracción de agua -> - Volumen disponible de agua del río	Extracción de agua del río.

Continúa en la página siguiente

Ciclo	Relaciones	Descripción
B6	Agua del río recolectada para uso -> + Consumo de agua río no potable -> - Agua del río recolectada para uso ->	Utilización del agua del río.
B7	Población -> + Nuevas viviendas -> + Viviendas sin tanque -> + Extracción de agua -> + Agua del río recolectada para uso -> + Consumo de agua río no potable -> + Consumo total de agua no potable por persona -> + Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> + Muertes -> - Población	Relación de las viviendas sin tanque recolector con el proceso de captación de agua del río.
B8	Población -> + Nuevas viviendas -> + Viviendas con tanque -> + Agua lluvia captada -> + Agua lluvia disponible para uso -> + Consumo de agua lluvia disponible para uso -> + Consumo total de agua no potable por persona -> + Personas enfermas por consumo de agua no potable -> + Personas muertas por consumo de agua no potable -> + Muertes -> - Población	Relación de las viviendas que tienen tanque con el proceso de captación de agua lluvia.

Fuente: Elaboración propia

3.2. Modelo computacional

Para llevar la problemática a un entorno simulado, se construye un diagrama de flujos y niveles, basado en el diagrama causal, donde se pueden identificar las secciones de comportamiento poblacional y problemática de personas enfermas, procesos de captación e indicadores ([Figuras 4, 5, 6](#) respectivamente).

La elaboración de este modelo se apoya en la formulación de ecuaciones matemáticas las cuales se describen a continuación.

La [Figura 4 \(a\)](#) describe el comportamiento poblacional (P), teniendo en cuenta los nacimientos (N) y muertes (M), como se muestra en la ecuación (1). Además, representa la división de las viviendas que tienen tanque recolector de agua lluvia (VT) y las viviendas que no lo poseen (VST), como muestra la ecuación (2) y la ecuación (3), respectivamente.

$$P(t) = \int_{t_0}^t (N - M)dt + P(t_0) \quad (1)$$

$$VT(t) = \int_{t_0}^t (VCT)dt + VT(t_0) \quad (2)$$

$$VST(t) = \int_{t_0}^t (NV - VCT)dt + VST(t_0) \quad (3)$$

En la [Figura 4\(b\)](#) se modela el efecto del consumo de agua no potable en las personas enfermas con la ecuación (4). Además, se calcula el indicador de sostenibilidad denominado valorización monetaria de la enfermedad, con la ecuación (5), para conocer en términos económicos el costo que representa para el municipio que las personas se enfermen por esta causa.

$$PECANP(t) = \int_{t_0}^t (PCANP - PM - PR)dt + PECANP(t_0) \quad (4)$$

$$VM = PECANP * CPTP \quad (5)$$

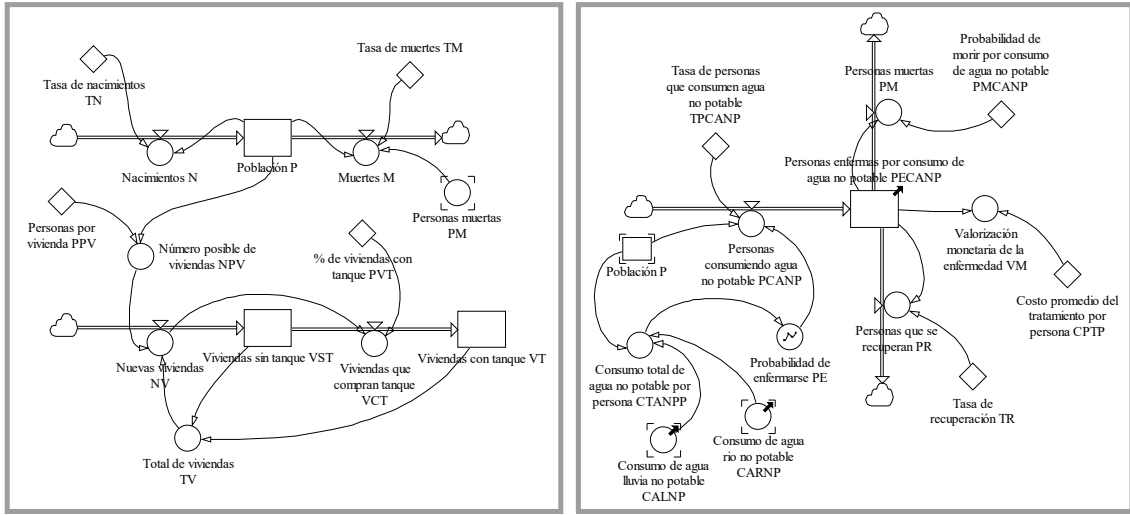


Figura 4. Secciones diagrama de flujos y niveles. a) Comportamiento poblacional, b) Problemática de personas enfermas.

Fuente: Elaboración propia

En la [Figura 5 \(a\)](#) se encuentra el proceso de recolección de agua lluvia, dado por la ecuación (6). Es así como el agua lluvia captada (ALC) es la que alimenta el nivel de disponibilidad del recurso y está influenciado por la capacidad del tanque (CPT), el área del tanque (AT) y las precipitaciones (VPP), como se muestra en la ecuación (7).

$$ALD(t) = \int_{t_0}^t (ALC - CALNP - CALP - ALOU)dt + ALD(t_0) \quad (6)$$

$$ALC = \text{MIN}(CPT * VT; VPP * AT * VT) \quad (7)$$

En la [Figura 5 \(b\)](#) se muestra la captación de agua del río. En este sentido, el agua del río recolectada para uso (ARR) está dada por la ecuación (8), el agua recolectada disminuye con el consumo de agua del río no potable (CARNP), consumo de agua del río potable (CARP) y agua para otros usos (AROU) y aumenta únicamente con el agua del río captada (ARC), en donde esta última es afectada por el volumen disponible de agua en río (VDAR), descrito con la ecuación (9).

$$ARR(t) = \int_{t_0}^t (ARC - CARNP - CARP - AROU)dt + ARR(t_0) \quad (8)$$

$$VDAR(t) = \int_{t_0}^t (PC - EA)dt + VDAR(t_0) \quad (9)$$

Finalmente, dados los objetivos que es identificar los factores críticos y cómo por medio de Dinámica de Sistemas se puede contribuir a la identificación y solución de estos, gracias al diagrama computacional junto con sus ciclos se identifican tres aspectos críticos que son la salud, la economía y la educación.

Por lo tanto, se establecen cuatro indicadores, con el fin de estimar cuantitativamente el desempeño de diferentes escenarios y estos son: valorización monetaria de la enfermedad, costo de recolección de agua y la inasistencia a la escuela.

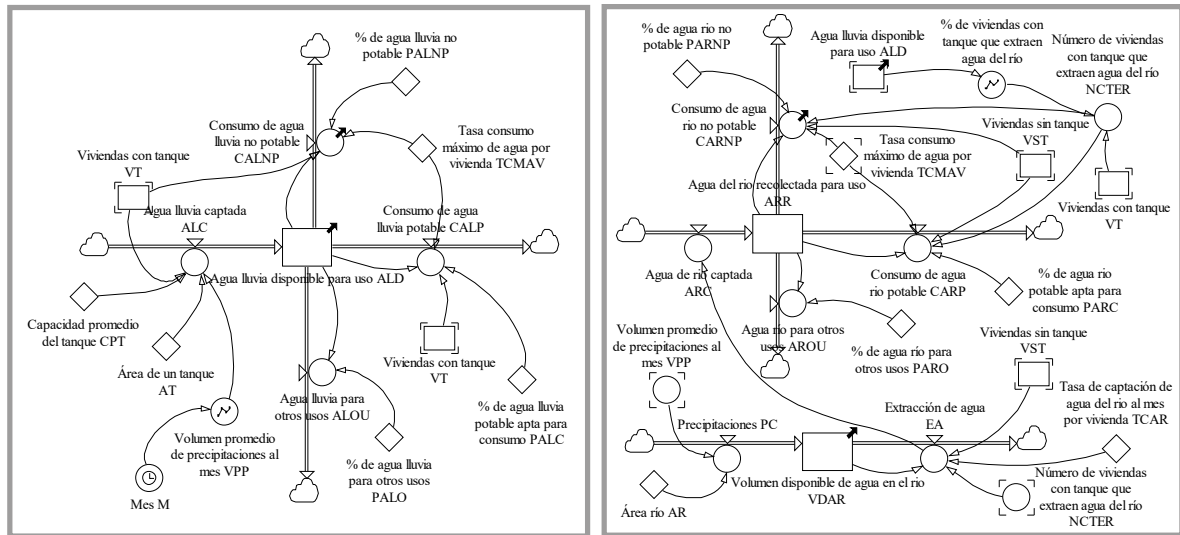


Figura 5. Secciones de captación. a) Captación de agua lluvia, b) Captación de agua del río.
Fuente: Elaboración propia

En la [Figura 6](#) se encuentra el modelado de estos indicadores, los cuales son calculados a partir de la extracción de agua del río. El primer indicador se denomina costo de recolección de agua (CRA), el cual mide en pesos el tiempo que un habitante invierte en actividades de recolección de agua, para ello se calcula a partir del salario mínimo (ingresos promedio que recibe una persona en Colombia) y es estimado en la variable 'ingreso mensual por persona' (IMPP) y el tiempo en meses que se toma un habitante en dicha actividad (TTRA), visualizado con la ecuación (10).

$$CRA = TTRA * IMPP \quad (10)$$

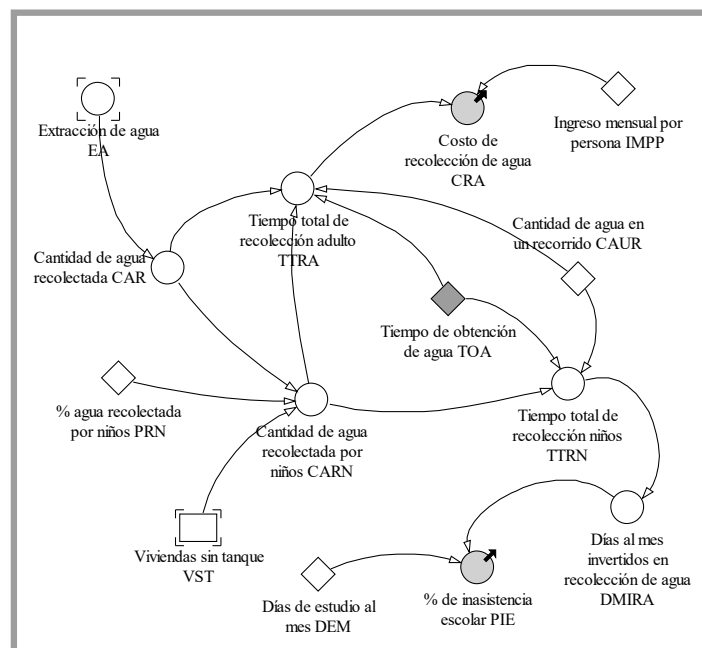


Figura 6. Sección de indicadores del diagrama de flujos y niveles
Fuente: Elaboración propia

De igual manera, existe una inasistencia a la escuela por parte de los niños, puesto que ellos también hacen parte de ese proceso de recolección del agua. De esta manera, se calcula el segundo indicador que es el porcentaje de inasistencia escolar (PIE) con la ecuación (11), teniendo en cuenta los días de estudio al mes (DEM) en una institución educativa y el tiempo (en días) que invierte un niño en la actividad de recolección de agua.

$$PIE = \frac{DMIRA}{DEM} * 100 \quad (11)$$

Además, se analiza el indicador de valorización monetaria de la enfermedad (VM), reflejada en los costos en que incurre el municipio para los tratamientos (CPTP) de las personas enfermas a causa del consumo de agua potable (PECANP), el cual se explica con la ecuación (12). Finalmente, se encuentra el indicador de valor total política (VTP), expresado en la ecuación (13), con el fin de cuantificar el costo de incluir las políticas planteadas en este artículo y las cuales se describirán en la sección de resultados.

$$VM = PECANP * CPTP \quad (12)$$

$$VTP = NP * PPAN * PPLA \quad (13)$$

Validación del modelo

Dentro de esta sección se evalúa la validez del modelo, con la finalidad de darle veracidad y corroborar su consistencia con el escenario real. La validación se realiza por medio de pruebas que se aplican al modelo para verificar su estructura y comportamiento y dar confianza al usuario. Siendo así, la validez del modelo se realiza cuando el modelador tenga plena seguridad de que el modelo empieza a comportarse de acuerdo con lo que sucede en el escenario real ([Forrester y Senge, 1979](#)).

El modelo se validó a partir de las siguientes pruebas: adecuación de límites del modelo, verificación de parámetros y prueba de condiciones extremas. A continuación, se presentan los resultados de dichas pruebas.

Adecuación de los límites

En esta prueba se establecen los límites del modelo que establecen el alcance del sistema a analizar, representados por las principales variables endógenas (variables con variaciones internas) y exógenas (variaciones externas) ([Sterman, 2002](#)) que componen dicha sección del modelo, una explicación detallada de los límites se encuentra en la [Tabla 2](#).

Tabla 2.

Adecuación de límites del modelo construido

Sección del modelo	Variables Exógenas	Variables Endógenas
Población	Tasa de nacimientos	Nacimientos
	Tasa de muertes	Muertes
	Personas por vivienda	Población
	% de viviendas con tanque	Viviendas con tanque
Personas enfermas por el consumo de agua no potable	Probabilidad de morir por consumo de agua potable	Personas muertas
	Tasa de personas que consumen agua potable	Personas consumiendo agua no potable
	Tasa de recuperación	Personas que se recuperan

Continúa en la página siguiente

Sección del modelo	Variables Exógenas	Variables Endógenas
Proceso de captación de agua lluvia	% de agua lluvia no potable	Consumo de agua lluvia no potable
	Capacidad promedio del tanque	Agua lluvia captada
	% de agua lluvia potable apta para consumo	Consumo de agua lluvia potable
Proceso de captación de agua del río	% de agua río no potable	Consumo de agua río no potable
	Tasa de captación de agua del río al mes por vivienda	Extracción de agua
	% de agua río para otros usos	Agua río para otros usos
Indicadores	Cantidad de agua en un recorrido	% de inasistencia escolar
	% de agua recolectada por niños	Cantidad de agua recolectada por niños
	Ingreso mensual por persona	Costo de recolección de agua

Fuente: Elaboración propia

Verificación de parámetros

El objetivo de esta prueba consiste en verificar si los parámetros, tanto conceptual como numéricamente, son consistentes con el sistema y la realidad ([Forrester y Senge, 1979](#)). De esta manera, en la [Tabla 3](#) se encuentran los principales parámetros del modelo, su valor y la fuente de información de donde se obtuvo el parámetro.

En cuanto a la obtención de datos, estos fueron consultados en diferentes fuentes de información: a partir de revisiones de literatura, fuentes primarias con contactos del municipio y otros medios como revistas, periódicos nacionales, páginas oficiales de entidades gubernamentales, ministerios y empresas.

Tabla 3.

Parámetros del modelo de simulación construido.

Nombre de la variable	Valor	Fuente de los datos
Tasa de nacimientos	0,0015 1/mes	(Gobernación de Antioquia, 2021)
Tasa de muertes	0,00025 1/mes	(Gobernación de Antioquia, 2021)
Población inicial	5.398 personas	(DANE, 2020)
Personas por vivienda	4 personas/vivienda	(Gómez et al., 2020)
% de viviendas con tanque	0,54	(Maturana, 2016)
Costo promedio de tratamiento por persona	107.000 pesos/persona	(Ministerio de Salud y Protección Social, Colciencias y Universidad de Antioquia, 2013)
Capacidad promedio del tanque	1.000 litros/vivienda	(Rotoplast, 2020)
Área de un tanque	8,233 m ²	(Rotoplast, 2020)

Fuente: Elaboración propia

Prueba de condiciones extremas

Entre las pruebas de validación del modelo se encuentra la de condiciones extremas, la cual se encarga de verificar si el modelo funciona de manera correcta ante situaciones extremas y de alta incertidumbre, para confirmar la robustez del modelo. Esta prueba se realiza tomando un parámetro del modelo, asignándole un valor extremo y observar el comportamiento del sistema, en este caso el parámetro seleccionado fue

‘Volumen promedio de precipitaciones al mes’, el cual asumirá el valor de cero en los meses de febrero y marzo, lo que quiere decir que no habrá lluvias en estos meses, así se logra identificar si el modelo sigue un comportamiento esperado o lógico. En la [Tabla 4](#) se presenta el nombre del parámetro a modificar en la prueba, su descripción y los valores se asignarán para cada mes.

Tabla 4.

Características del escenario para prueba de condiciones extremas

Variable	Descripción	Condición extrema	
		Valor	
Volumen promedio de precipitaciones al mes	No hay lluvia en los meses de febrero y marzo	Enero = 178,6	Julio = 255,1
		Febrero = 0	Agosto = 276,2
		Marzo = 0	Septiembre = 285,5
		Abril = 301,8	Octubre = 321,8
		Mayo = 334,2	Noviembre = 318,8
		Junio = 272,2	Diciembre = 253,6

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de esta prueba se presenta el comportamiento de dos variables del modelo: volumen disponible de agua en el río y agua lluvia disponible para uso, los cuales son niveles en donde el primero posee un valor inicial de aproximadamente 2.000.000 de litros (0,002 miles de millones de litros) y la segunda un valor inicial de 200.000 litros (0,0002 miles de millones de litros).

En la [Figura 7](#) se puede observar que, al aplicar una condición extrema en los meses de febrero y marzo haciendo las precipitaciones iguales a cero, existe una reducción en el volumen de agua del río con respecto al escenario base como se observa en los círculos de la gráfica, pero continúa con una tendencia creciente debido a que el agua se va acumulando con las precipitaciones de los otros meses.

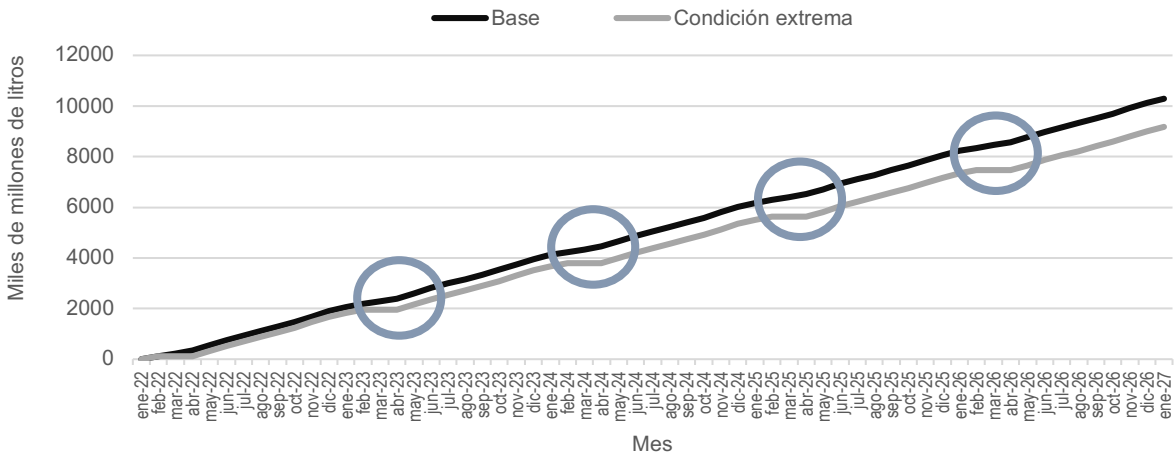


Figura 7. Volumen disponible de agua en el río bajo condiciones extremas

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento observado en la [Figura 7](#) tiene sentido con la realidad puesto que, si no llueve, el volumen del río en esos meses tenderá a reducirse (círculos en [Figura 7](#)), sin embargo, la tendencia es creciente para el Volumen disponible de agua en el río ya que el resto del tiempo si se sigue acumulando el agua. De manera similar ocurre con el agua lluvia disponible para uso, en donde el escenario con las condiciones

extremas debe comportarse de acuerdo con las precipitaciones, tal como sucede en la simulación (Figura 8). Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo se comporta adecuadamente y supera esta prueba.

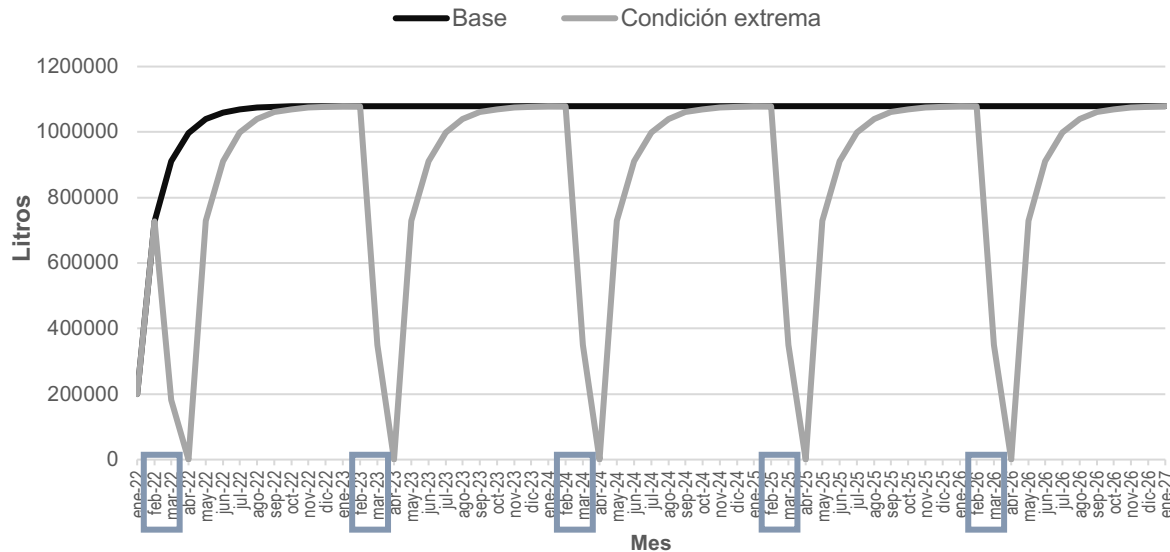


Figura 8. Agua lluvia disponible para uso bajo condiciones extremas

Fuente: Elaboración propia

4. Resultados

Para el análisis de esta problemática, se estableció un escenario base, donde se muestran los resultados del modelo de simulación con la situación actual en el municipio de Murindó (Colombia) en cuanto a la potabilización del agua. Adicionalmente, se presentan los resultados de las simulaciones en diferentes escenarios, donde se incorpora una política de mejora en el Municipio para la problemática del agua no potable.

4.1. Escenario base

A continuación, se muestran los resultados del comportamiento de las variables consumo de agua no potable y personas enfermas en el escenario base. En la Figura 9 (a) se puede observar que el consumo de agua no potable del río y de agua lluvia se mantiene constante en la simulación, sin embargo, también se observa que existe mayor consumo de agua no potable del río que agua lluvia no potable, esto se debe a que muchas familias no cuentan con un tanque recolector de agua lluvia y no tienen más opción que dirigirse al río. Es importante mencionar que el agua extraída del río es mucho más difícil de potabilizar con los tratamientos caseros que realizan los habitantes del municipio, dado que esta fuente está más contaminada.

En este sentido, el agua extraída del río es la más propensa a producir enfermedades por consumo de agua no potable, teniendo en el escenario base un comportamiento creciente entre los meses de enero y abril del primer año, (época en las que el país se encuentra en sequía, por la escasez de lluvia, por lo que solo pueden extraer agua del río) y para el resto de la simulación un valor aproximado de 45 personas enfermas, como se observa en la Figura 9 (b). Gracias a ello, a partir del mes de junio se visualiza en la figura un comportamiento estable de la gráfica, esto debido a que el modelo está limitado por una variable de consumo máximo de agua por persona, la cual se implementa en el modelo debido a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud frente al consumo ideal de agua al día.

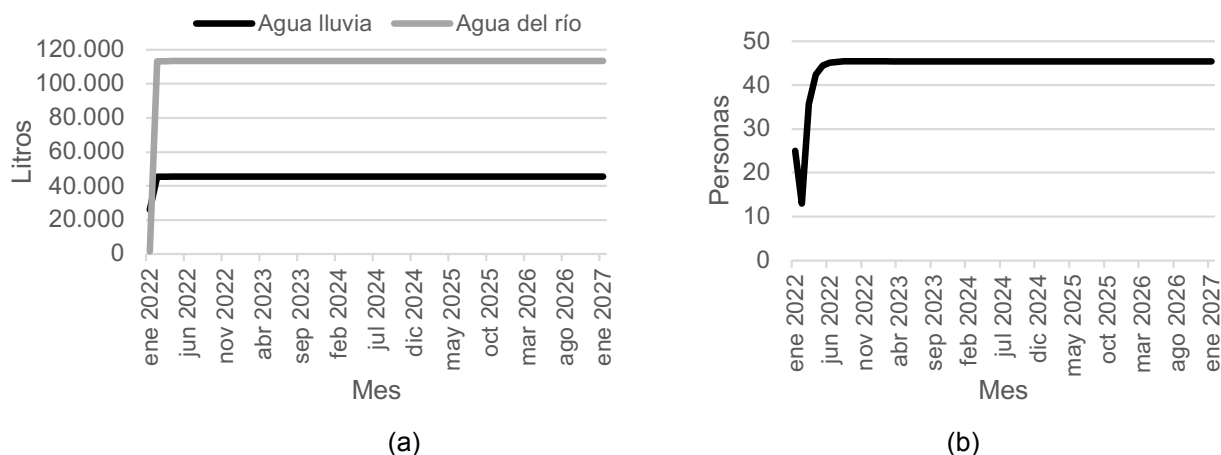


Figura 9. Resultados del escenario base. a) Consumo de agua no potable, b) Personas enfermas por consumo de agua no potable

Fuente: Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que, en este escenario, la comunidad siempre tiene a disposición el recurso, independiente de la fuente, puesto que en Murindó llueve todos los meses, esto permite abastecer de agua tanto los tanques como el volumen del río, de esta manera el consumo de agua de los habitantes termina siendo constante, asociado con el valor de la tasa máxima, la cual únicamente variaría en caso de presentarse épocas de reducción de agua en las fuentes de captación.

Los anteriores resultados evidencian que está problemática es generada principalmente por el consumo de agua del río, que es la fuente más contaminada y a la que lamentablemente deben acudir los habitantes de Murindó. Por lo tanto, la idea con este estudio es revisar cómo se pueden ofrecer soluciones sostenibles que permitan reducir estos índices, para lo cual se presenta a continuación, los resultados del modelo a partir de la incorporación de una política que busca reducir el consumo de agua no potable en el Municipio.

4.2. Descripción y aplicación de política

A partir del análisis causal y el diagrama de flujos y niveles se encuentra que el consumo de agua del río afecta la salud de las personas en Murindó, puesto que el agua proveniente de esta fuente es difícil de potabilizar con los medios con los que cuentan los habitantes. Adicionalmente, es un municipio que no cuenta con un sistema de acueducto y alcantarillado, por lo que se deben buscar opciones que no requieran una red de tratamiento de aguas, teniendo en cuenta que, al ser una zona no interconectada, se deben pensar en alternativas de autogeneración eléctrica. Por tal motivo, se plantea como política la implementación de una planta potabilizadora portátil comunitaria en el municipio, la cual funcione con paneles solares, puesto que según [Fajardo, Ramírez y Rosero \(2015\)](#) el uso de energías renovables en regiones aisladas posee la ventaja de contar con el recurso energético, disminuyendo la contaminación, algunos costos y transporte de combustible. Con la implementación de esta planta potabilizadora, algunas viviendas del Municipio podrán acceder a agua potable.

De esta manera, para la adaptación de la política al diagrama de flujos y niveles ([Figura 10](#)) se adicionan nuevas variables, las cuales están sombreadas de color gris en la figura. De esta forma, se crea un nuevo nivel para el agua tratada en planta (ARTPP) con sus respectivas entradas y salidas, expresada mediante la ecuación (14). Así, el número de paneles solares (NP) y el agua del río tratada con la planta (ARTPP), permite que las viviendas que no poseen tanque (VST) sean beneficiadas por esta solución (VSTEAR), como se puede calcular con la ecuación (15).

$$ARTPP(t) = \int_{t_0}^t (CAP - EAT)dt + ARTPP(t_0) \tag{14}$$

$$VSTEAR = VST - NVB \tag{15}$$

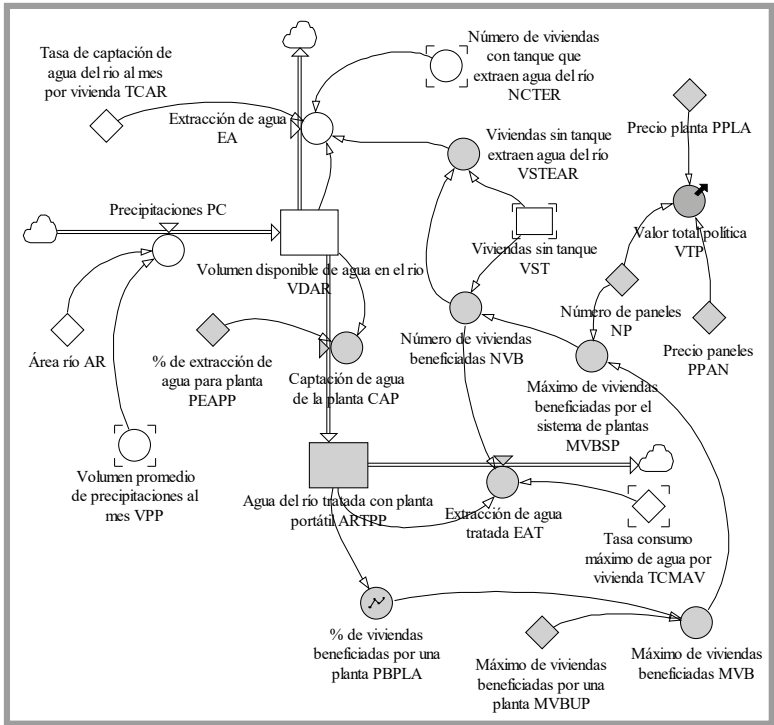


Figura 10. Adaptación de la política al diagrama de flujos y niveles
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la política descrita, se analizan tres escenarios descritos en la [Tabla 5](#), con el fin de comparar el impacto de la política, realizando variaciones con respecto a las condiciones iniciales del escenario base, específicamente variaciones con respecto a la variable número de paneles.

Tabla 5.
Escenarios para la evaluación de la política de solución al acceso de agua potable.

Variable/escenario	Base	Parcial	Completo
Número de paneles	0 paneles	Un sistema de dos módulos.	Dos sistemas cada uno de dos módulos.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los índices de radiación solar del municipio y a la solución energética analizada, se requiere de un sistema fotovoltaico compuesto por dos módulos con una capacidad de 1,09 kWp para suplir el consumo energético de una planta potabilizadora portátil, la cual produce 10000 litros/h de agua y tiene una cobertura de 300 hogares, equivalente al 50% de las viviendas que no poseen tanque en Murindó, por lo que este sería el escenario parcial. Por otro lado, el escenario completo cubriría el total de viviendas sin tanque recolector, contando con dos sistemas de dos módulos cada uno y, por ende, dos plantas potabilizadoras.

Ahora bien, partiendo de los escenarios descritos anteriormente, en la [Figura 11 \(a\)](#) se puede observar que el consumo del agua del río no potable presenta una disminución de 50%, aproximadamente, con el escenario parcial y entre un 90% y 100% con el escenario completo. De igual forma en la [Figura 11 \(b\)](#), se experimentan reducciones similares en las personas enfermas, puesto que estas son variables directamente proporcionales dada su alta relación dentro de la problemática, en donde el consumo de agua no potable del río enferma a las personas. El anterior comportamiento es esperado ya que, al contar con una planta potabilizadora, la población de Murindó podrá mejorar su proceso de tratamiento de agua, afectando directamente las personas enfermas.

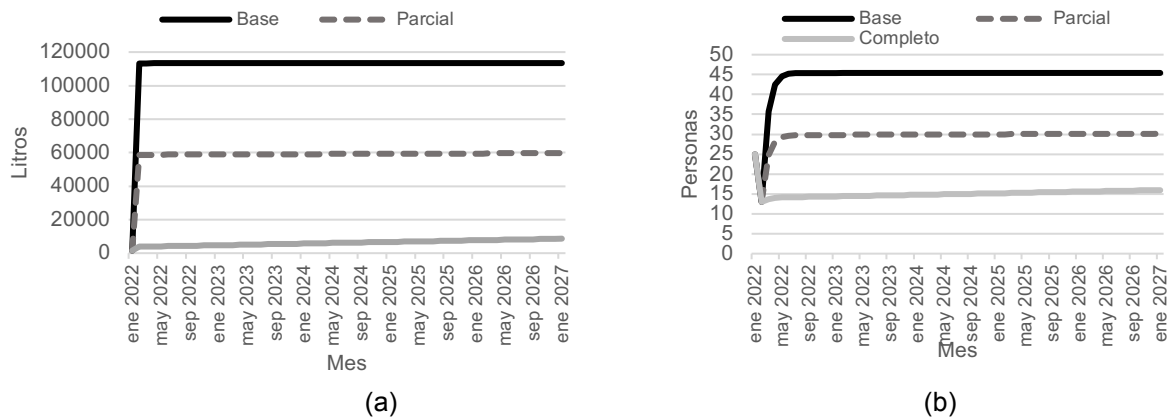


Figura 11. Comparación de comportamiento en los diferentes escenarios. a) Consumo de agua del río no potable, b) Personas enfermas por consumo de agua no potable

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse, la propuesta de solución tiene un impacto en el consumo de agua y en el número de personas enfermas, sin embargo, la implementación de la política tiene otros efectos en la comunidad. En la tabla 6, se encuentran los valores promedio mensuales del resultado de los indicadores que se establecieron para evaluar el desempeño de la política, estos son: 1) valoración monetaria de la enfermedad, 2) costo de recolección de agua, 3) inasistencia escolar y 4) valoración total de la política.

Los resultados presentados en la [Tabla 6](#) evidencian que el escenario completo, correspondiente a la implementación de dos plantas potabilizadoras portátiles, alimentadas por paneles solares, es el que genera los mayores beneficios en términos de reducción de costos sociales y económicos para la comunidad. En este escenario, la valoración monetaria de la enfermedad disminuye de manera considerable hasta \$1.619.722, mientras que el costo de recolección de agua se reduce drásticamente de más de \$724 millones en el escenario base a tan solo \$10.528.623. Además, la inasistencia escolar baja al 11 %, lo que refleja un impacto positivo en la permanencia de los estudiantes en el sistema educativo.

Tabla 6.

Comparación de resultados de los indicadores

Indicador/escenario	Valorización monetaria de la enfermedad	Costo de recolección de agua	Inasistencia escolar	Valor total
Base	\$4.741.562	\$724.374.519	63%	0
Parcial	\$3.154.925	\$94.660.571	16%	\$48.420.000
Completo	\$1.619.722	\$10.528.623	11%	\$96.840.000

Fuente: Elaboración propia

Aunque el escenario base no requiere inversión inicial (valor total de \$0), los costos sociales y económicos derivados de la falta de acceso a agua potable se mantienen elevados, perpetuando la situación actual del municipio. En contraste, los escenarios parcial y completo implican una inversión inicial de \$48.420.000 y \$96.840.000, respectivamente, considerando que una planta potabilizadora portátil con cobertura de 300 viviendas tiene un costo aproximado de \$32.600.000 pesos colombianos y que un sistema de dos módulos de paneles solares asciende a \$15.820.000 pesos colombianos, de acuerdo con empresas del sector ([Fibras & Normas de Colombia S.A.S., 2023](#); [Solenium, 2023](#)).

Sin embargo, esta inversión se compensa con los beneficios derivados de la reducción de enfermedades asociadas al consumo de agua no potable y la disminución de la inasistencia escolar, que en el escenario base afecta a más del 60 % de los niños y jóvenes de Murindó. La intervención planteada no solo disminuye gastos en salud de las familias, sino que también mejora el acceso a la educación al reducir los días de inasistencia, lo que podría tener efectos positivos a largo plazo en el desarrollo de la comunidad.

Este análisis pone de manifiesto la importancia de considerar no solo los costos directos de la implementación de la política, sino también los efectos indirectos en el bienestar social y económico de la población. La reducción de la carga económica sobre los hogares y la mejora en la calidad de vida a través del acceso a agua potable segura, se consolidan como beneficios clave que justifican la inversión inicial. De esta forma, la intervención propuesta no solo representa una solución técnica al problema de acceso al agua potable, sino que también genera externalidades positivas que impactan de manera integral en la salud, la educación y la economía local.

5. Discusión

Los resultados obtenidos reflejan una contribución significativa al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular al ODS 3 (Salud y bienestar) y al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), al evidenciar cómo la implementación de soluciones, como las plantas potabilizadoras portátiles con sistemas de energía solar, permite reducir significativamente los costos asociados a enfermedades transmitidas por el consumo de agua no potable y disminuir la inasistencia escolar. Estos hallazgos se alinean directamente con un aporte a la reducción de las necesidades básicas insatisfechas en territorios rurales, donde la falta de acceso a servicios básicos como el agua potable genera ciclos de pobreza, enfermedad y exclusión educativa. En este sentido, la propuesta no solo aborda la problemática desde una perspectiva técnica, sino que también representa una mejora de la calidad de vida de comunidades como Murindó (Colombia), donde la intervención estatal es limitada. Adicionalmente, los beneficios indirectos proyectados, como el aumento de la asistencia escolar y la reducción de gastos en salud para los hogares, contribuyen al desarrollo social y económico de la población, consolidando la intervención como una estrategia sostenible que trasciende la solución de la problemática puntual de acceso al agua.

Asimismo, al comparar la propuesta basada en Dinámica de Sistemas con otros estudios recientes que abordan la potabilización del agua mediante metodologías distintas, se identifican diferencias metodológicas clave. Por ejemplo, mientras que el análisis multicriterio (MCA) ha sido empleado para la priorización de territorios y la clasificación de zonas según criterios socioeconómicos y ambientales ([Iordache et al., 2022](#)), y otros enfoques basados en análisis estadísticos han permitido evaluar la calidad del agua subterránea mediante parámetros físico-químicos ([Dehghani-Sanij et al., 2016](#)), la Dinámica de Sistemas destaca por su capacidad para modelar relaciones causales y simular la evolución dinámica del sistema en el tiempo. A diferencia de los métodos mencionados, que se centran en diagnósticos puntuales y estáticos, la metodología desarrollada en esta propuesta permite anticipar los efectos de las políticas y las intervenciones bajo diversos escenarios, lo que ofrece una herramienta de apoyo a la toma de decisiones más integral y predictiva para contextos rurales como el de Murindó. Esta capacidad de integrar la complejidad de los factores sociales, económicos y ambientales en un modelo dinámico fortalece la formulación de soluciones sostenibles y adaptadas al entorno local.

La política propuesta ofrece una solución sostenible para zonas rurales con baja cobertura de servicios públicos, garantizando el acceso a agua segura y reduciendo costos asociados a la salud y la educación. Se recomienda priorizar intervenciones descentralizadas que usen energía renovable y tecnologías portátiles, promoviendo la participación comunitaria para su sostenibilidad. Además, es clave establecer alianzas entre actores gubernamentales, comunitarios y privados para asegurar su financiamiento y correcta implementación.

6. Conclusiones

A partir de la caracterización del proceso de potabilización del agua general se encontró que en Murindó no realizan todas las etapas requeridas para un tratamiento adecuado, llevando a cabo únicamente la captación de la fuente, la desinfección y el almacenamiento en tanques recolectores. Además de utilizar métodos caseros y de no contar con sistema de acueducto y alcantarillado, evidenciando la problemática de un alto consumo de agua no potable y, por ende, de personas enfermas en el municipio.

Este estudio contribuye al análisis de la problemática del agua potable en comunidades rurales a través del uso de Dinámica de Sistemas. A diferencia de estudios previos que han abordado el problema desde un enfoque estructural, este trabajo permite evaluar el impacto de soluciones descentralizadas como el uso de plantas portátiles de potabilización y fuentes de energía renovables, integrando variables de salud, educación y economía.

Por otro lado, del análisis de la situación actual del municipio se identifica el consumo de agua del río no potable como una variable a intervenir, dado a su alto impacto en la problemática por el limitante de recolección que poseen los habitantes (ausencia de tanques recolectores en todas las viviendas), sumado a las condiciones de contaminación de la fuente, que no permite una adecuada y efectiva potabilización.

Partiendo de lo anterior, este trabajo pone en evidencia una problemática de necesidades sumamente básicas que lleva muchos años con el abandono del gobierno. Es así como el artículo permite volcar la mirada hacia una zona de difícil acceso como Murindó, constituyendo un aporte para todos los habitantes del municipio, los cuales serán los principales beneficiados por las soluciones que lleguen a sus hogares y los que recibirán la atención que requieren para suplir sus necesidades básicas, las cuales han sido expuestas dentro de esta investigación. La experiencia y el análisis realizado en este Municipio puede extenderse a otras zonas no interconectadas de Colombia y Latinoamérica.

Para garantizar la viabilidad de la propuesta, es necesario establecer un esquema de implementación en el que participen el gobierno local, ONG y la comunidad. Se recomienda que las administraciones municipales lideren la instalación del sistema, mientras que organizaciones comunitarias se encarguen de su mantenimiento y operación. Además, se debe considerar un esquema de financiamiento mixto que permita cubrir los costos iniciales y operativos mediante recursos públicos y privados.

De esta manera, dadas las condiciones de índices de necesidades básicas insatisfechas, el aislamiento de la zona y, por ende, la dificultad para presencia del gobierno en Murindó, se analizó una opción portable y con fuentes de energía renovables. La solución se compone de una planta de potabilización portable que no exige sistema de acueducto, con un abastecimiento eléctrico a partir de paneles solares. La opción permite mejorar las condiciones de la zona, debido a que se evidencia una reducción del porcentaje de inasistencia escolar hasta en un 52%, el costo de recolección de agua hasta en un 98% y en el costo en el que incurre el municipio por los tratamientos de las enfermedades generadas por esta problemática hasta en un 65%. Sin embargo, la política tiene unos costos asociados y se sugiere un trabajo futuro en el tema que permita incluir, en la evaluación de políticas, indicadores económicos que complementen la evaluación.

Los resultados de este estudio pueden ser replicables en otras comunidades con características similares a Murindó, como municipios con alta dispersión poblacional y dificultades de acceso a infraestructura básica.

No obstante, la aplicabilidad del modelo dependerá de factores como la disponibilidad de fuentes hídricas, el nivel de organización comunitaria y la capacidad de gestión local. Se recomienda adaptar el modelo a cada contexto específico para garantizar su efectividad.

Es así como el modelo construido dentro de este artículo permite cuantificar el problema, creando una herramienta que posibilita visualizar y evaluar a largo plazo soluciones que en la vida real ocasionarían altos costos económicos y consecuencias sociales, además de espera muy largas de tiempo para ver los efectos. Por lo tanto, es un aporte para la toma de decisiones en la Alcaldía y entes gubernamentales que requieran analizar el comportamiento en el tiempo de una solución y su contribución cuantificada, donde es posible ser aplicada en diferentes ZNI del país, con condiciones similares a las de Murindó.

Finalmente, el caso de aplicación presentado en este artículo amplía el ejercicio y aplicación de la dinámica de sistemas en la comunidad académica, por tanto, puede facilitar el proceso de aprendizaje de otros practicantes de la metodología y de futuras investigaciones en simulación. Este trabajo representa un aporte metodológico al estudio del acceso al agua potable en comunidades rurales aisladas, ya que permite evaluar estrategias de intervención a través de simulaciones computacionales, reduciendo los riesgos y costos asociados a pruebas en campo.

7. Limitaciones y trabajos futuros

Entre las principales limitaciones del desarrollo del proyecto se encuentra la limitada disponibilidad de información sobre la problemática, especialmente en zonas rurales no interconectadas y con baja presencia institucional. Esta situación dificulta la obtención de datos actualizados y precisos, lo que representa un desafío adicional para la parametrización del modelo y la formulación de políticas ajustadas a las condiciones reales de estas comunidades.

A raíz de este trabajo se desprenden varios trabajos futuros, algunos de ellos son: 1) analizar la problemática desde otras técnicas de modelado o inclusive realizar un trabajo híbrido con otras metodologías como lo son la simulación basada en agentes; 2) el proceso de evaluación puede enriquecerse con la inclusión de otros indicadores que aporten a la toma de decisiones, como índices ambientales comparando con otras fuentes de energía; 3) es posible ampliar el alcance de esta investigación a partir del análisis de la problemática implementando el sistema de acueducto y alcantarillado y evaluando la viabilidad financiera de esta opción.

Sobre los autores

Catalina-María Maya-Iregui

Ingeniera Industrial, estudiante de Maestría en Ingeniería Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
catalina.mayai@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-9649-2529>.

Alexandra-Carolina Pantoja-Quiscualtud

Ingeniera Industrial Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
alexandra.pantoja@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-3035-1958>

María-Gabriel Pérez-Barrios

Ingeniera Industrial Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
mgabriel.perez@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-5214-221X>

Laura M Cárdenas

Doctora en ingeniería, magíster en Ingeniería de sistemas, ingeniera de sistemas. Docente de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
lauram.cardenas@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-7361-5730>

Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo.

Fuentes de financiación

Este estudio fue realizado en el marco de un proyecto de investigación del portafolio de programas financiados por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander

Disponibilidad de datos

Las autoras declaran que en el artículo se encuentran todos los datos necesarios y suficientes para la comprensión de la investigación.

Contribución de los autores

Catalina-María Maya-Iregui: Conceptualización, metodología, análisis formal, administración del proyecto, software, escritura – borrador original.

Alexandra-Carolina Pantoja-Quiscualtud: Metodología, investigación, validación, escritura – borrador original.

María-Gabriel Pérez-Barrios: Metodología, investigación, análisis formal, escritura – borrador original.

Laura Milena Cárdenas-Ardila: Supervisión, validación, escritura – revisión y edición

Referencias bibliográficas

1. ANZURES, Cristian; POSADA, Johnny; OSORIO, Kevin; VIDAL MEDINA, Juan Ricardo. En: IEEE ANDESCON (2018: Santiago de Cali). Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia. Cali: IEEE, 2018.
2. BALESTRI, Luis Alejo. Optimización sustentable del abastecimiento de agua potable en la ciudad de General Pico (La Pampa, Argentina) mediante una estrategia de precios. La Pampa, 2020. Tesis de posgrado (Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales). Universidad Nacional de La Pampa. Doctorado en Ciencias Económicas y Empresariales
3. BASHAR, Alireza Mehrabani; NOZARI, Hamed; MAROFI, Safar; MOHAMADI, Mohamad; AHADIIMAN, Ahad. Investigation of factors affecting rural drinking water consumption using intelligent hybrid models. En: Water Science and Engineering. Noviembre, 2022, vol. 16, no. 2. p 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.12.002>
4. BASHAR, Rania; KARTHIKEYAN, K. G.; NOGUERA, Daniel R. Simulation-based analysis of full-scale implementation of energy neutral wastewater treatment plants. En: Journal of Water Process Engineering. Abril, 2021, vol. 40. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101875>
5. BROWN, A.; BOLTON, K.; CLARKE, B.; FRASER, P.; LOWE, J.; KAYS, J.; HOVMAND, P. S.; ALLENDER, S. System dynamics modelling to engage community stakeholders in addressing water and sugar sweetened beverage consumption. En: International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity. Enero, 2022, vol. 19, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12966-022-01363-4>
6. CARMONA-PAREDES, R. B.; DOMÍNGUEZ-MORA, R.; ARGANIS-JUÁREZ, M. L., Juan-Diego, E., MENDOZA-RAMÍREZ, R., CARRIZOSA-ELIZONDO, E. Use of evolutionary computation and guide curves to optimize the operating policies of a reservoir system established to supply drinking water. Applied Water Science.2023. vol. 13, no. 1. p.1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01807-z>
7. CUÉLLAR RODRÍGUEZ, René Ricardo; MALDONADO OSORIO, Víctor Mauricio; PEDRAZA HERNÁNDEZ, Luz Dary; MORENO, María Zolangela. Diagnóstico de los sistemas de tratamiento de agua cruda para consumo humano acueductos veredales de la subregión PDET Macarena - Guaviare. En: Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 2024, vol. 7, no. 2. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-027>
8. DANE. Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Colombia, 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>
9. DANE. Proyecciones de población a nivel municipal. Periodo 2018-2035. Colombia, 2020. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
10. DEHGHANI-SANIJ, Alireza; KHANI, Mohammadreza; ZHANG, Baiyu; NARIMANNEJAD, Samira; MOHAMMADNIA, Mahin. Water Quality Analysis of Underground Reservoirs in Hot and Arid Regions. In: J. Appl. Environ. Biol. Sci. vol. 6, no.7. p. 149–161. https://www.researchgate.net/publication/305112899_Water_Quality_Analysis_of_Underground_Reservoirs_in_Hot_and_Arid_Regions
11. DÍAZ THERÁN, Hugo A.; HINCAPIÉ, Margarita M.; MONTOYA, L.; GALEANO, Laila; BALAGUERA, Alejandra; y 1 más. Evaluación de la sostenibilidad para un sistema individual de potabilización de agua en comunidades rurales a través de la metodología de ACV. En: Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. 2023. <https://doi.org/10.26507/paper.3128>

12. DMITROVIĆ, Lovorka Gotal; DUŠAK, Vesna; VUČINIĆ, Aleksandra Anić. The development of conceptual, mathematical and system dynamics model for food industry wastewater purifying system. En: Journal of Information and Organizational Sciences. Noviembre, 2015, vol. 39, no. 2. p. 151–162. <https://hrcak.srce.hr/149618>
13. FAJARDO FAJARDO, Darío Fernando; RAMÍREZ CAICEDO, Silvana María; ROSERO NARAVAÉZ, Luis Alberto. Análisis del recurso eólico en regiones ZNI de nariño. En: Tecnura. Septiembre, 2015, vol. 19. p. 78–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.1.a07>
14. FERES, Juan Carlos; MANCERO, Xavier. El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina. Santiago de Cali: Naciones Unidas, 2001. ISBN: 92-1-321791-9
15. FIBRAS & NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Fibras y Normas de Colombia SAS. [Online]. Colombia, 2023. <https://www.fibrasynormasdecolombia.com>
16. FLÓREZ BETANCUR, Ángela María; UPEGUI SOSA, Sergio Augusto. Comparación de técnicas alternativas de potabilización de agua, y su posible aplicación en el área rural del territorio nacional colombiano. Medellín, 2020. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Tecnológico de Antioquia. Facultad de Ingeniería.
17. FORRESTER, Jay; SENGE, Peter. Test for building confidence in System Dynamics models. En: Journal of Forecasting. Junio, 1979, vol. 2, no. 1. <http://static.clexchange.org/ftp/documents/roadmaps/RM10/D-2926-7.pdf>
18. FRÊNE, Cristián; VILLARROEL, Fernanda; ROJAS, Rolando; SANZANA, Javier; GONZÁLEZ, J.; y 3 más. Escasez de agua en Chiloé: Red Participativa de Agua como solución para el sector rural. En: Revista de geografía Norte Grande. Agosto, 2022, no. 82. p. 375-400. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022022000200375>
19. GALEANO BOTERO, Laila; MONTOYA, L.; CARVAJAL, G.; HINCAPIÉ, Margarita M.; BOTERO, L.; y 1 más. Tecnologías de bajo costo para agua potable en regiones en vía de desarrollo. En: Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. 2023. <https://doi.org/10.26507/paper.2946>
20. GIUDICI, Federico; CASTELLETTI, Andrea; GAROFALO, Elisabetta; GIULIANI, Matteo; MAIER, Holger R. Dynamic, multi-objective optimal design and operation of water-energy systems for small, off-grid islands. En: Applied Energy. Mayo, 2019, vol. 250. p. 605–616. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.084>
21. GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. Murindó. Colombia, 2021. <https://dssa.gov.co/images/asis/fichas/Murindo.pdf>
22. GODOY MORALES, Iris Tibisay. Promoción del uso responsable del agua potable desde los planes educativo-ambiental. En: Propuestas Educativas. Julio, 2019, vol. 1, no. 2. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229289719>
23. GÓMEZ TORRES, Edwin Esteban; TORRES GORRÓN, Jhon Edwar; LÓPEZ GONZÁLEZ, Mauricio; LOAIZA QUINTERO, Osmar Leandro; SÁNCHEZ SALAZAR, Cristian Andrés. Murindó guía base para la reactivación económica. Antioquia: Facultad de Ciencias Económicas Universidad de Antioquia, 2020. <https://udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/67ce0231-e26f-4920-8893-9c3c02edcfac/5.+Murindo%CC%81-dos.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nakF6tB>
24. GUZMÁN, B.; NAVA, Gerardo; DÍAZ, Paula. La calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbilidad en Colombia, 2008-2012. En: Biomédica. 2015, vol. 35. <https://doi.org/10.7705/BIOMEDICA.V35I0.2511>
25. HUINCHO LAPA, S.; SINCE CRISPIN, F. V.; ALMIDÓN ORTIZ, C. A. Gestión dinámica de la escasez de aguas superficiales mediante la metodología de dinámica de sistemas. Revista Geográfica de América Central. 2022. vol. 2, no. 69. p. 175–198. <https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.6>
26. HWANG, S.-J. System Dynamics as a Policy Evaluation Method. En: Advances in Urban Humanities. 2023, vol. 2, no. 2. <https://doi.org/10.59013/auh.2023.2.2.002>
27. JAUREGUI YATE, Cristian Miguel. Un algoritmo PSO para el problema de suministro de agua potable ante un desastre en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga, 2020. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Santo Tomás. División de Ingenierías y Arquitectura.
28. IORDACHE, Ana Maria Mihaela; VASILE, Gabriela Geanina; PASCU, Luoana Florentina. The multicriteria analysis, a useful tool in classifying countries from a socio-economic point of view and investments made in water management: a case study on Romania. In: Romanian Journal of Ecology & Environmental Chemistry, 2022. vol.4, no. 1. p. 1–23. <https://doi.org/10.21698/rjeec.2022.101>
29. KEYHANPOUR, Mohammad Javad; MUSAVI JAHROMI, Seyed Habib; EBRAHIMI, Hossein. System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. En: Ain Shams Engineering Journal. Junio, 2021, vol. 12, no. 2. p. 1267–1281. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029>
30. MANEAS, G.; KASTANIDI, E.; PANAGOPOULOS, Y.; KARAGEORGIS, A. P. A System Dynamics model of the rural socio-environmental system of the SW Messina and Gialova lagoon. 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7176451>
31. MATIZ, A. P.; VELÁSQUEZ, Liliana; GONZALEZ, L. Identificación de elementos que impactan la consolidación de procesos de potabilización del agua en planteles educativos suburbanos y rurales de Villavicencio y Acacias, Meta, Colombia. En: Orinoquia. 2009. <https://doi.org/10.22579/20112629.210>

32. MATLAKALA, M. E.; MONA, S. System Dynamics Approach to Potable Water Management in Eastern Cape Province of South Africa. En: Journal of Digital Food, Energy & Water Systems. 2024, vol. 5, no. 2. <https://doi.org/10.36615/pqaaf497>
33. MATURANA USUGA, Jorge Eliecer. Plan de Desarrollo Municipal Murindó [Online]. Murindó: Alcaldía de Murindó, (2016).
34. MESA SUÁREZ, M. A. . Desigualdades en América Latina y el Caribe. Oasis, 2019. vol. 30, 117–132. <https://doi.org/10.18601/16577558.n30.07>
35. MINISTERIO DE TRABAJO. Estudio de Perfil Productivo Rural y Urbano del municipio de Murindó. Bogotá: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015. ISBN: 978-958-8902-43-2
36. MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Guía de Práctica Clínica: Para prevención, diagnóstico y tratamiento de la enfermedad diarreica aguda en menores de 5 años SGSS Guía No. 8. Bogotá, 2013. ISBN: 978-958-57937-5-0
37. MUÑOZ-ARIAS, C.; VILLAMIL-VILLAR, B.; RESTREPO-ÁLVAREZ, A.; & BOLÍVAR-CHAVES, O. Socio-technical study of the use of renewable energies as a lighting alternative in the communities of Non-Interconnected Zones. Revista UIS Ingenierías. 2021. vol. 21, no. 1. p.15–27. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9514550.pdf>
38. MURILLO PEÑA, Sandra Emperatriz; CASTRO RONQUILLO, Sandra Mirella del Consuelo; MANOSALVA VILLA, Gonzalo; NEVÁREZ ZAMBRANO, Eddie Manuel. Sistema de Potabilización en zonas rurales. En: Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información. Febrero, 2022, E48. p. 563–575. https://www.researchgate.net/profile/Gonzalo-Villa-Manosalvas/publication/361092009_WATER_PURIFICATION_SYSTEMS_IN_RURAL_AREAS/links/663d34c535243041538536e3/WATER-PURIFICATION-SYSTEMS-IN-RURAL-AREAS.pdf
39. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Perú, 2018. ISBN: 978-92-4- 354995-8
40. RAMOS MANCHENO, A. D. de J. (2024). Efectos del consumo de agua contaminada en la calidad de vida de las personas. Polo Del Conocimiento, 9(1), 614–632. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i1.6396>
41. ROJAS LÓPEZ, Andrés Felipe; BURGOS CARDOZO, Eliana Vanessa. Evaluación de alternativas sobre dispositivos de refrigeración con fuentes de energía no convencional para las zonas no interconectadas de Colombia. Bogotá D.C, 2019. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería.
42. RODRÍGUEZ MORENO, Vanessa Mirella; DÍAZ GARCÍA, Álvaro Fernando. Enfermedades Diarreicas y el IRCA: Análisis piloto en la región Pacífica. En: Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. 2022. <https://doi.org/10.26507/paper.2436>
43. ROTOPLAST. Tanque de agua cónico. Colombia, 2020. <https://www.rotoplast.com.co>
44. SÁNCHEZ PEREA, Ivonne. Arolatinidad y Globalización: Perspectiva Étnica de la Globalización. Estudio de Caso: Proyecto Minero Mande Norte. Bogotá, 2009. Monografía de grado (Internacionalista). Universidad del Rosario. Facultad de Relaciones Internacionales.
45. SECRETARÍA DE AGRICULTURA. Vías para el desarrollo y la educación. Municipio de: Murindó. Antioquia, 2015. <http://secretariainfraestructura.antioquia.gov.co>
46. SECRETARÍA SECCIONAL DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL DE ANTIOQUIA. Planilla Agua Potable Antioquia 2020. Antioquia, 2020. https://www.dssa.gov.co/images/programas-y-proyectos/factores-de-riesgo/vigilancia-agua/Planilla_Agua_Potable_Antioquia_2020.xls
47. SOLENIUM. Solenium. Medellín, 2023. <https://solenium.co/>
48. STERMAN, John D. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. En: Journal of the Franklin Institute, Abril 2002, ESD-WP-2003-01.13. ISSN: 00160032
49. SUÁREZ SERRANO, Andrea; BALDIOCEDA GARRO, Álvaro; SANABRIA, G.; ROJAS CONEJO, Johanna; ROJAS CANTILLANO, Daniela; y 1 más. Seguridad hídrica: Gestión del agua en comunidades rurales del Pacífico Norte de Costa Rica. En: Revista de Ciencias Ambientales. Diciembre, 2019, vol. 53, no. 2. <https://doi.org/10.15359/RCA.53-2.2>
50. SUPERSERVICIOS. Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica. Bogotá, 2021. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_sectorial_zni_2021%20%281%29.pdf
51. VALOYES CABRERA, Yuliza. Estrategias de resistencia cultural y política de mujeres negras en Murindó, Antioquia (Colombia). En: Revista de Ciencias Sociales. Diciembre, 2020, vol. 1, no. 42. p. 154–165. DOI: 10.29166/csociales.v1i42.2774
52. VEGEL CABRALES, Gustavo. La pobreza en América Latina y en Colombia - con base en revisión bibliográfica y de los estudios más recientes sobre la pobreza en la región. En: Económicas CUC. Diciembre, 2008, vol. 29, no. 1. p. 163–176. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/economicascuc/article/view/1235>

53. VIGNOLO, Julio; VACAREZZA, Mariela; ÁLVAREZ, Cecilia; SOSA, Alicia. Niveles de atención, de prevención y atención primaria de la salud. En: Archivos de Medicina Interna. Marzo, 2011, vol. 33, no. 1. ISSN: 0250-3816
54. VIZANKO, B.; SHMAYA, T.; PANKAJ BOINDALA, S.; OSTFELD, A.; BERGLUND, E. (2024). Operating Water Distribution Systems for Equitable Access to Clean Water. World Environmental and Water Resources Congress 2024: Climate Change Impacts on the World We Live In - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2024, 1229–1235. <https://doi.org/10.1061/9780784485477.109>
55. WANG, Linlin; WANG, Rongchang; YAN, Haiyan. System-dynamics modeling for exploring the impact of industrial-structure adjustment on the water quality of the river network in the Yangtze Delta Area. En: Sustainability. Julio, 2021, vol. 13, no. 14. <https://doi.org/10.3390/su13147696>
56. YUE, Wencong; YU, Shujie; XU, Meng; RONG, Qiangqiang; XU, Chao; SU, Meirong. A Copula-based interval linear programming model for water resources allocation under uncertainty. En: Journal of Environmental Management. Septiembre, 2022, vol. 317. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115318>