



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO
HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA
PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA,
PROVINCIA DE PICHINCHA”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del
Título de Ingenieras Ambientales

Autoras:

Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina
Vargas Erazo Carla Lizeth

Tutora:

Fonseca Largo Kalina Marcela

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina, con cédula de ciudadanía No. 1753658887 y Vargas Erazo Carla Lizeth, con cedula de ciudadanía No. 1727506253, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”** siendo la Ingeniera PhD. Kalina Marcela Fonseca Largo., tutora del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Sisa Pacarina Jilumbango Gualavisi
C.C: 1753658887
ESTUDIANTE

Carla Lizeth Vargas Erazo
C.C: 1727506253
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **JILUMBANGO GUALAVISI SISA PACARINA**, identificada con cédula de ciudadanía **1753658887** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA**” la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: octubre 2022-marzo 2023

Finalización de la carrera: abril 2026 – agosto 2026

Tutora: Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo PhD.

Tema: “**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a. La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b. La publicación del trabajo de grado.
- c. La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta
- d. La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e. Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 5 días del mes de agosto del 2026.

Sisa Pacarina Jilumbango Gualavisi

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **VARGAS ERAZO CARLA LIZETH**, identificada con cédula de ciudadanía **1727506253** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”** la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: octubre 2022-marzo 2023

Finalización de la carrera: abril 2026 – agosto 2026

Tutora: Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a. La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b.
- c. La publicación del trabajo de grado.
- d. La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- e. La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

f. Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 5 días del mes de agosto del 2026.

Carla Lizeth Vargas Erazo

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutora del Proyecto de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”, de Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina y Vargas Erazo Carla Lizeth, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
DOCENTE TUTORA

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, las postulantes: Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina y Vargas Erazo Carla Lizeth, con el título de Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Lcdo. Juan Pio Salazar Arias, Mg.
C.C: 0501389530
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Lcdo. Jaime René Lema Pillalaza, Mg.
C.C: 1713759932
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Andres Sebastian Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

A Dios, por acompañarme a lo largo de este camino, protegerme a mí y mi familia y concederme la fortaleza necesaria para superar cada dificultad hasta alcanzar esta meta.

A mis padres, Virginia Gualavisi Amaguaña y José Roberto Jilumbango, por ser parte fundamental de mi formación personal y profesional. De manera especial, agradezco a mi madre por su esfuerzo incansable, sus sacrificios, su paciencia y por sostenerme en cada etapa de mi vida. A mis hermanos, Delia P., Henry J., y Tamia. J., y a toda mi familia, por su cariño, sus palabras de ánimo y por recordarme siempre que cuento con personas que creen en mí y me acompañan en cada paso.

A Erick Joel Tapia, por su amor, su paciencia y compañía durante gran parte de mi formación universitaria; por confiar en mis capacidades, motivarme en los momentos difíciles y brindarme su apoyo constante para continuar hasta culminar esta etapa.

A Carla V., amiga y compañera de este trabajo de titulación, por todos los años compartidos desde nuestros primeros pasos en la universidad y por el esfuerzo conjunto que nos permitió llegar hasta aquí. A mis amigas Jacla R., y Paola B., por escucharme, aconsejarme y regalarme una amistad que hizo más llevadero este recorrido.

A mi tutora de tesis, Ing. Kalina Fonseca por guiar este trabajo con comprensión y dedicación, por compartir conmigo sus conocimientos durante su desarrollo. De igual manera, a los docentes que participaron en mi formación y particularmente, a la Ing. Evelyn J., por las enseñanzas y experiencias compartidas durante mis prácticas profesionales.

Mi gratitud también al Fondo para la protección del agua (FONAG), especialmente a la Ing. Carla P., por facilitar el acercamiento necesario para desarrollar esta investigación, por recibirnos, confiar en nuestro trabajo y compartir sus conocimientos y experiencias.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi y la carrera de Ingeniería Ambiental, por ser el espacio donde adquirí los conocimientos, experiencias y herramientas que hoy me permiten culminar una de las etapas más importantes de mi formación profesional.

Sisa Pacarina Jilumbango Gualavisi

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme acompañado y brindado la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi vida. Gracias por permitirme superar cada dificultad y llegar hasta este momento tan significativo para mí y para mi familia.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por haber contribuido a mi formación académica y profesional, brindándome los conocimientos y herramientas necesarios para culminar satisfactoriamente esta etapa.

A la Carrera de Ingeniería Ambiental y a todos los docentes que, a través de sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, contribuyeron a mi formación y crecimiento profesional.

De manera especial, agradezco a mi tutora, Ing. Kalina Fonseca, por su orientación, disposición, paciencia y valioso acompañamiento durante el desarrollo de la presente investigación.

A Sisa Jilumbango, amiga y compañera de tesis, por su compromiso, colaboración y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por compartir conmigo los desafíos, aprendizajes y experiencias que hicieron posible alcanzar juntas esta meta.

A Madeline Llunitaxi, mi amiga, por llegar a mi vida en una etapa en la que me sentía sola y convertirse desde entonces en una compañía muy especial. Gracias por quedarte, por acompañarme en cada momento y por hacer que este camino universitario fuera mucho más bonito. Siempre agradeceré haberte encontrado en esta etapa de mi vida.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las instituciones, organizaciones y personas que contribuyeron, de manera directa o indirecta, al desarrollo de esta investigación y al cumplimiento de esta importante meta académica y profesional.

Carla Lizeth Vargas Erazo

DEDICATORIA

Dedico este logro primeramente a Dios, a quien he confiado mi vida y la de mi familia. Por acompañarme en cada camino, escuchar mis oraciones y permitirme llegar junto a las personas que amo hasta este momento que durante tantos años esperé.

Con todo mi corazón, dedico especialmente este título a mi madre, Virginia Gualavisi, si hoy estoy aquí es porque durante toda mi vida he tenido frente a mí el mejor ejemplo de una mujer que no se rinde. La he visto trabajar incansablemente, enfrentar las dificultades con valentía y entregar siempre mucho más de sí misma por sus hijos. De usted aprendí a ser trabajadora, honesta, humilde y perseverante. Nuestra historia está hecha de alegrías, lágrimas, diferencias, aprendizajes y, sobre todo, de un amor que siempre nos ha permitido volver a encontrarnos y seguir adelante. Usted ha estado conmigo celebrando mis triunfos y sufriendo también mis dificultades.

Mami, quiero que nunca olvide que, así como usted ha estado para mí durante toda mi vida, yo también quiero estar a su lado, acompañarla y cuidarla, recordar sus sacrificios me dio una razón más para continuar. Todo su esfuerzo tuvo sentido por usted. Este logro también es suyo, mami.

A mi padre y toda mi familia, les dedico este triunfo por ser parte de mi vida, por sus consejos, su cariño y hacerme sentir que siempre tengo personas a quienes acudir.

A Erick Tapia, por acompañarme gran parte de este camino universitario y por ver en mí a una ingeniera mucho antes de que yo pudiera llamarme así. Estuviste presente en días de cansancio, frustración y miedo, pero también en cada pequeña victoria que me acercaba a esta meta. Tus palabras, tu paciencia, tu cariño y cada pequeño detalle con el que buscabas devolverme una sonrisa, hicieron más ligero este proceso.

Finalmente, dedico este éxito a mí misma, por cada madrugada, viaje, sacrificio y momento de cansancio que enfrente hasta llegar aquí. A la Sisa que tuvo miedo, lloró y dudó de sus capacidades, pero siempre encontró la fuerza para levantarse y continuar. Hoy reconozco con orgullo mi esfuerzo todo lo que fui capaz de superar. Este título representa un sueño cumplido y el comienzo de muchos otros que deseo alcanzar.

Sisa Pacarina Jilumbango Gualavisi

DEDICATORIA

En primer lugar, a mi hija, Emilia Vargas, por ser una de mis mayores motivaciones para seguir adelante. Todo esfuerzo, cada desvelo y cada sacrificio han tenido también un propósito: construir un mejor futuro para nosotras. Espero que algún día puedas mirar este logro y sentirte orgullosa de tu mamá.

A mis padres, Silvia Erazo y Rodrigo Vargas, por su amor, apoyo y sacrificio incondicional. Gracias por creer en mí, por acompañarme durante este camino y por enseñarme que, con esfuerzo y perseverancia, los sueños pueden convertirse en realidad.

A mi hermana Camila, por compartir conmigo la vida y, de una manera muy especial, este momento tan importante. Qué bonito es poder llegar juntas a esta meta y celebrar que las dos estamos cumpliendo nuestros sueños profesionales.

A mis tías Anita, Lidia, Olguita, a mi tío Mario y a mi familia paterna más cercana, por su cariño, apoyo y por acompañarme durante este proceso. Gracias por cada palabra de aliento y por estar presentes en este camino.

Y, de manera muy especial, a mi Chaito preciosa, mi abuelita, mi ángel.

A ti, que, aunque ya no estás físicamente conmigo, sigues presente en cada uno de mis pasos. Recuerdo nuestras conversaciones, cuando me decías que tu anhelo era verme algún día convertida en toda una profesional. Yo te decía que tenías que estar ahí, que no podías irte sin antes verme graduada, porque quería compartir contigo ese momento y cumplir juntas ese sueño.

La vida quiso que fuera diferente y hoy no puedo tenerte a mi lado para abrazarte y decirte que lo logramos. Pero sé que estás conmigo de una manera diferente, cuidándome y acompañándome desde el cielo. Hoy cumplo aquella promesa que tantas veces conversamos. Llegué hasta aquí pensando en ti, en tus palabras y en ese deseo que tenías de verme convertida en una profesional.

Chaito, mi promesa está cumplida. Este logro es para ti, mi ángel. Me hubiera encantado verte aquí, pero sé que, desde donde estés, estás orgullosa de mí. Te llevo conmigo en cada logro, en cada paso y para siempre en mi corazón.

Carla Lizeth Vargas Erazo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “EVALUACION DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA, PROVINCIA DE PICHINCHA”

Autoras:

Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina
Vargas Erazo Carla Lizeth

RESUMEN

Diversas comunidades a nivel mundial gestionan el agua de manera autónoma; sin embargo, la limitada articulación con el Estado dificulta el monitoreo y la solución de los problemas hídricos debido a factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales (PESTEL). En este contexto, la presente investigación evaluó la implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua para consumo humano, basado en los principios de ciencia abierta y ciencia ciudadana, en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito, provincia de Pichincha. Esta comunidad forma parte de las organizaciones comunitarias vinculadas al Fondo para la Protección del Agua (FONAG), institución que promueve la conservación de las fuentes hídricas y el fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua. Se empleó un enfoque mixto, de alcance descriptivo y prospectivo, con el propósito de identificar, mediante el análisis PESTEL, los principales problemas que afectan la disponibilidad de agua segura. La información se obtuvo mediante talleres participativos, utilizando un muestreo no probabilístico intencional, en el que participaron representantes de la Junta Administradora de Agua vinculados con la gestión del recurso hídrico. Posteriormente, se evaluaron estrategias de solución mediante la integración de Mapas Cognitivos Difusos (FCM) e inferencia difusa. Como resultado se identificaron 36 conceptos distribuidos en las dimensiones PESTEL evidenciando que la disponibilidad de agua segura depende de la interacción sistémica de los factores. El análisis estructural presentó una densidad de 0,93 e identificó al Control insuficiente de la contaminación hídrica (LC2) como el nodo de mayor centralidad ($C_i = 56,73$), constituyéndose en el factor con mayor influencia dentro del sistema. Además, se simuló un escenario de peor caso y tres escenarios estratégicos. Las simulaciones evidenciaron que las estrategias modificaron entre el 94,59 % y el 94,74 % de los conceptos PESTEL, siendo la implementación del sistema de monitoreo la alternativa con mayor capacidad para mejorar la generación de información. Como producto final se elaboró un manual comunitario estandarizado para la implementación de sistemas participativos de monitoreo, fundamentado en los principios de ciencia ciudadana y ciencia abierta.

Palabras clave: ciencia ciudadana, ciencia abierta, calidad del agua, mapas cognitivos difusos, monitoreo participativo, gestión comunitaria del agua.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “EVALUATION OF THE IMPLEMENTATION OF A WATER QUALITY MONITORING SYSTEM FOR HUMAN CONSUMPTION BASED ON CITIZEN SCIENCE AND OPEN SCIENCE FOR THE SAN FRANCISCO DE CRUZ LOMA COMMUNITY, PICHINCHA PROVINCE”

Authors:

Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina
Vargas Erazo Carla Lizeth

ABSTRACT

Various communities around the world manage their water autonomously; however, limited coordination with the government hinders the monitoring and resolution of water-related problems due to political, economic, social, technological, environmental, and legal (PESTEL) factors. Consequently, this study evaluated the implementation of a participatory system for monitoring the quality of water for human consumption—based on the principles of open science and citizen science—in the San Francisco de Cruz Loma community, located in the Metropolitan District of Quito, Pichincha Province. This community is part of the community organizations affiliated with the Water Protection Fund (FONAG), an institution that promotes the conservation of water sources and the strengthening of community-based water management. To this end, a mixed-methods approach—combining descriptive and prospective elements—was employed to identify, through PESTEL analysis, the main issues affecting the availability of safe water. Data were collected through participatory workshops using purposive non-probabilistic sampling, involving representatives from the Water Management Board, community leaders, and stakeholders involved in water resource management, selected for their experience and knowledge of the water supply system. Subsequently, solution strategies were evaluated by integrating Fuzzy Cognitive Maps (FCM) and fuzzy inference. As a result, 36 concepts were identified across the political, economic, social, technological, ecological, and legal dimensions, demonstrating that the availability of safe water depends on the systemic interaction of PESTEL factors. The structural analysis yielded a density of 0.93 and identified the concept “Insufficient Control of Water Pollution” (LC2) as the node with the highest centrality ($C_i = 56.73$), making it the most influential factor within the system. Subsequently, a worst-case scenario and three strategic scenarios were simulated: a) implementation of a participatory water quality monitoring system, b) mapping of relevant stakeholders, and c) independence of EPMAPS. The simulations showed that the strategies modified between 94.59% and 94.74% of the model’s PESTEL concepts, with the implementation of the monitoring system being the alternative with the greatest capacity to improve information generation, strengthen regulatory compliance, promote community monitoring, and consolidate water governance. The final product was a standardized community manual for implementing participatory water quality monitoring systems, based on the principles of citizen science and open science, serving as a replicable tool to strengthen sustainable water resource management in rural communities. In conclusion, the results show that the implementation of the participatory water quality monitoring system is technically and socially viable in the San Francisco de Cruz Loma community, thanks to its community organization, the active participation of the Water Management Board, and the support of FONAG—conditions that favor its implementation and long-term sustainability.

KEYWORDS: Citizen science, Open science, water quality, Fuzzy cognitive maps, Participatory monitoring, Community-based water management.

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORIA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA	iii
AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	vii
AGRADECIMIENTO	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INDICE DE CONTENIDO	xv
INDICE DE TABLAS	xix
INDICE DE FIGURAS	xx
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN	2
3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	6
5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	6
6 OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
6.1 Objetivo general	8
6.2 Objetivos específicos.....	8
7 ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	9
8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA	10
8.1 Calidad del agua en los páramos de la sierra norte/centro del ecuador	10
8.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua en páramos	11

8.1.2 Características hidrológicas y ecológicas de los páramos de la sierra centro del Ecuador.....	11
8.1.3 Servicios ecosistémicos	12
8.1.4 Principales amenazas a la calidad del agua	12
8.2 Monitoreo comunitario del recurso hídrico	12
8.2.3 Enfoque de género y rol de las mujeres en la gestión del agua	14
8.2.4 Experiencias exitosas de monitoreo comunitario en ecosistemas de páramo	14
8.3 Ciencia abierta	14
8.3.1 Principios de la ciencia abierta y acceso a datos ambientales	15
8.3.2 Redes colaborativas y plataforma de ciencia abierta en agua	15
8.4 Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua.....	15
8.4.1 Sistema de monitoreo para la calidad del agua destinada al consumo humano	15
8.4.2 Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo	16
8.4.3 Sensores abiertos y hardware libre para medición de parámetros hídricos.....	16
8.4.4 Aplicaciones móviles y sistemas de visualización de datos	16
8.4.5 Internet de las cosas (IoT) y su aplicación en comunidades rurales.....	17
8.4.6 Retos técnicos y logísticos en el monitoreo en zonas remotas	17
8.4.7 Integración de tecnologías abiertas para el monitoreo participativo de la calidad del agua.....	18
8.5 Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua.....	18
8.5.1 Ciencia ciudadana como herramienta para la gestión del recurso hídrico	18
8.5.2 Integración del conocimiento local y saberes tradicionales	19
8.5.3 Validación, ética y calidad de los datos generados por la ciudadanía	19
8.6 Gobernanza del agua bajo el marco PESTEL.	20
8.6.1 Modelo de gobernanza en los páramos	20
8.6.2 Fondos de agua como mecanismo para la conservación de fuentes hídricas	20
8.6.3 Marco legal e institucional de la gestión comunitaria del agua.....	21
8.6.4 Incorporación del monitoreo comunitario en la toma de decisiones	21

8.6.5 Colaboración de actores locales, académicos e institucionales.....	22
8.6.6 Aportes al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 6, 13 y 15)	22
9 HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	23
9.1. Hipótesis alternativa (H_a).....	23
9.2 Hipótesis nula (H_0)	23
Pregunta de investigación.....	23
10 ÁREA DE ESTUDIO	23
10.1 Diseño metodológico.....	24
10.2 Enfoque cualitativo.....	25
10.3 Enfoque cuantitativo.....	25
10.4 Variables de estudio	26
10.5 Métodos	26
10.5.1 Mapas cognitivos difusos	27
10.5.2 Teoría de grafos	27
10.5.3 Inferencia difusa	30
10.6 Técnicas	31
10.6.1 Muestreo no probabilístico de tipo intencional	31
10.7 Fases de investigación	32
10.7.1 Adaptación de los factores PESTEL.....	32
10.7.2 Taller participativo en la comunidad	33
10.7.3 Elaboración de los Mapas Cognitivos Difusos.....	34
10.7.4 Evaluación de los mapas cognitivos difusos	35
10.7.5 Simulación de escenarios mediante mapas cognitivos difusos	35
10.7.6 Diseño y elaboración del manual comunitario de monitoreo de la calidad del agua	36
10.8 Diseño estadístico	38
10.8.1 Estadística descriptiva de los índices de la teoría de grafos	39
10.8.2 Justificación de la selección de participantes	40

10.8.3 Justificación del tamaño muestral.....	40
11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
11.1 Identificación de los conceptos PESTEL generales utilizados como base para la investigación.....	41
11.2 Adaptación de conceptos a la comunidad.....	42
11.3 Validación participativa de los conceptos con la comunidad	44
11.4 Identificación de los conceptos PESTEL que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma.....	44
11.5 Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad	46
11.5.1 Teoría de grafos	46
11.5.2 Análisis del Mapa Cognitivo Difuso.....	54
11.6 Inferencia Difusa	55
11.6.1 Análisis de escenarios: escenario de peor caso (Worst-Case Scenario).....	55
11.7 Identificación de los drivers comunitarios para la implementación del sistema de monitoreo	60
11.7.1 Análisis del escenario de intervención 1: Implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua	61
11.7.2 Análisis del escenario de intervención: Mapeo de actores competentes	65
11.7.3 Análisis del escenario de intervención: Independencia de la EPMAPS	69
11.7.4 Comparación de los escenarios evaluados mediante inferencia difusa	73
11.7.5 Análisis comparativo de los escenarios	74
11.8 Manual comunitario estandarizado para el monitoreo participativo de la calidad del agua.....	75
11.8.1 Propósito del manual	76
11.8.2 Población objetivo del manual.....	76
11.8.3 Organización y contenido del manual	77
11.8.4 Recursos didácticos incorporados.....	78

11.8.5 Aplicabilidad del manual en comunidades rurales	79
12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
12.1 Conclusiones.....	80
12.2 Recomendaciones	81
13 BIBLIOGRAFÍA	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Distribución de los beneficiarios del proyecto</i>	6
Tabla 2. <i>Sistema de tareas para cada objetivo</i>	9
Tabla 3. <i>Factores PESTEL generales utilizados en la investigación</i>	42
Tabla 4. <i>Conceptos adaptados a la comunidad</i>	42
Tabla 5. <i>Conceptos identificados</i>	47
Tabla 6. <i>Indicadores</i>	53
Tabla 8. <i>Estrategias comunitarias incorporadas como drivers para la simulación de escenarios</i>	61
Tabla 9. <i>Escenario de intervención 1: Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua.</i>	62
Tabla 10. <i>Escenario de intervención 2: Mapeo de actores competentes</i>	66
Tabla 11. <i>Escenario de intervención 3: Independencia de la EPMAPS</i>	70
Tabla 12. <i>Comparación de los escenarios evaluados mediante inferencia difusa</i>	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Área de estudio de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, parroquia Lloa Distrito Metropolitano de Quito, provincia de Pichincha.</i>	24
Figura 2: <i>Metodología</i>	32
Figura 3: <i>Árbol de decisiones para el diseño del manual comunitario de la calidad de agua</i>	37
Figura 4: <i>Gráfico de pastel sobre el porcentaje de factores PESTEL</i>	45
Figura 5: <i>Mapa Cognitivo Difuso</i>	47
Figura 6: <i>Relaciones de entrada del nodo LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica.</i>	51
Figura 7: <i>Relaciones de salida del nodo LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica</i>	52
Figura 8: <i>Mapa Cognitivo Difuso: escenario de peor caso (WORST-CASE)</i>	56
Figura 9: <i>Simulación del escenario Worst Case del nodo LC2</i>	59

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto

“Evaluación de la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua para consumo humano basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta para la comunidad San Francisco de Cruz Loma, Provincia de Pichincha”.

Lugar de ejecución:

Comunidad San Francisco de Cruz Loma, Pichincha.

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Carrera que auspicia:

Ingeniería Ambiental.

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de trabajo:

Tutor: Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.

Lector 1(presidente): Lcdo. Juan Pío Salazar Arias, Mg.

Lector 2: Lcdo. Jaime René Lema Pillalaza, Mg.

Lector 3: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

Autores: Jilumbango Gualavisi Sisa Pacarina y Vargas Erazo Carla Lizeth

Área de conocimiento

Servicios y protección del medio ambiente

Línea de investigación

Análisis, conservación y aprovechamiento de la biodiversidad local.

Línea de vinculación

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social

2 INTRODUCCIÓN

El agua constituye uno de los recursos naturales más esenciales para la supervivencia de los seres vivos, el desarrollo de las actividades productivas y el bienestar de las comunidades. La disponibilidad en cantidad y calidad de este recurso es indispensable para garantizar la salud pública, la seguridad alimentaria, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo sostenible (World Health Organization, 2022). No obstante, el incremento poblacional, el crecimiento de la demanda hídrica, la contaminación de las fuentes de agua, los efectos del cambio climático y otras actividades antrópicas representan desafíos que comprometen el acceso al agua segura en numerosas regiones del mundo (Rosińska et al., 2024; Shemer et al., 2023)

En la actualidad, la gestión sostenible del recurso hídrico no solo requiere de infraestructura y tecnologías adecuadas; exige también de mecanismos que promuevan la participación activa de la sociedad. En este contexto la ciencia abierta y la ciencia ciudadana han adquirido relevancia con enfoques que garanticen la generación colaborativa del conocimiento la contribución transparente a la información y la participación de las comunidades en la identificación, monitoreo y solución de problemáticas ambientales. Estas estrategias optimizan la toma de decisiones basada en evidencia y fomentan una gran corresponsabilidad en la conservación de los recursos naturales (Gutiérrez Vilela & León Quispe, 2024; Roldán-Reascos et al., 2024).

En Ecuador, los ecosistemas de páramo ejercen una función esencial en la regulación del ciclo hídrico al captar, almacenar y liberar agua que abastece tanto a comunidades rurales como centros urbanos, estos ecosistemas enfrentan presiones derivadas de la alteración del uso de la tierra, actividades agropecuarias incendios forestales y otros impactos de origen humano que pueden amenazar la disponibilidad y la calidad del agua destinada al consumo humano (Villagómez-Reséndiz, 2026). Por lo tanto, resulta necesario fortalecer los procesos de monitoreo y gestión de base comunitaria que permitan determinar oportunamente posibles alteraciones en las fuentes de abastecimiento y promover acciones preventivas (Flores-Díaz et al., 2021).

La presente investigación se desarrolló en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma, provincia de Pichincha, en consonancia con el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) y la junta administradora del sistema de agua potable de la comunidad. Esta investigación se propone evaluar un sistema de monitoreo para agua de consumo humano basado en los principios de ciencia abierta y ciencia ciudadana, mediante metodologías

participativas como mapas cognitivos difusos (FCM) y el análisis PESTEL se busca comprender los factores sociales, ambientales, políticos, económicos, tecnológicos y legales que influyen en la gestión del agua. Así mismo elaborar un manual estandarizado que facilite su implementación y replicabilidad en otras comunidades rurales del Ecuador.

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La presente investigación se enmarca en uno de los principales desafíos ambientales y sociales a nivel mundial: la gestión sostenible del agua para consumo humano, cuya garantía es fundamental para el bienestar de las poblaciones actuales y futuras. Aunque el acceso al agua potable es reconocido como un derecho humano fundamental, millones de individuos aun enfrentan dificultades relacionadas con la calidad del recurso, la carencia de sistemas permanentes de monitoreo y las limitadas capacidades técnicas para detectar a tiempo procesos de contaminación. En este escenario, las estrategias de monitoreo participativo basadas en ciencia abierta y ciudadana han adquirido importancia internacional al permitir que las comunidades produzcan información ambiental confiable, consoliden la gobernanza local y participen activamente en la conservación de sus recursos hídricos. Estudios actuales demuestran que este tipo de iniciativas incrementan la alfabetización científica, fortalecen la toma de decisiones comunitarias y refuerzan los sistemas convencionales de vigilancia ambiental (Roldán-Reascos et al., 2024).

En el Ecuador, garantizar agua segura persiste como una problemática para numerosas comunidades rurales, donde la gestión del recurso hídrico recae principalmente en las juntas administradoras de agua potable, que, a pesar de sus esfuerzos enfrentan limitaciones, económicas técnicas y operativas para realizar un monitoreo continuo de la calidad de agua (World Health Organization, 2022). Múltiples investigaciones desarrolladas en el país evidencian que la generación sistemática de información sobre parámetros físico-químicos y microbiológicos constituyen uno de los mayores desafíos para mejorar la administración del agua y aproximarse al cumplimiento del objetivo de Desarrollo Sostenible, asociado con el acceso universal al agua limpia y saneamiento. Del mismo modo se ha identificado que disponer de información periódica facilita la planificación institucional y fortalece la toma de decisiones orientadas a proteger la salud de la población (Fritz et al., 2022).

La comunidad San Francisco de Cruz Loma, ubicada en la provincia de Pichincha, constituye un escenario propicio para desarrollar esta investigación en razón de que su abastecimiento de agua se realiza mediante un modelo de gestión comunitario respaldado por

un convenio entre la junta administradora de agua potable y la empresa metropolitana de agua potable y saneamiento (EPMAPS). En el marco del diagnóstico participativo realizado conjuntamente con el Fondo de Protección del Agua (FONAG), se identificó que la comunidad presenta una organización fortalecida, conocimientos sobre conservación del páramo y experiencia en el manejo de su sistema de abastecimiento; no obstante se reflejaron factores que pueden afectar la calidad del agua, entre ellos el incremento de la turbidez ocasionado por derrumbes durante épocas lluviosas, la disminución del caudal en periodo de estiaje, la limitada frecuencia de análisis especializados debido a su elevado costo, la necesidad de fortalecer mecanismos de monitoreo continuo y el déficit de herramientas de gestión comunitaria que posibiliten conocer en tiempo real el comportamiento de los principales parámetros de calidad del agua.

Desde el punto de vista científico, la presente investigación favorece el desarrollo de metodologías interdisciplinarias que forman parte de la ingeniería ambiental, la ciencia abierta y ciudadana mediante la evaluación de un sistema de monitoreo de bajo costo para agua destinada al consumo humano. En contraste con los métodos tradicionales que dependen exclusivamente de análisis de laboratorio con costos significativos y tiempos prolongados de respuesta, implementación de sensores para registrar variables, pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y caudal facilitara la información continua que complementa los análisis convencionales y facilite la detección temprana de posibles alteraciones con respecto a la calidad del agua. Este enfoque ha sido reconocido como una alternativa sostenible para fortalecer el monitoreo ambiental especialmente en comunidades rurales y países de ingresos medios donde los recursos destinados al monitoreo de la calidad del agua son limitados (Bogdan et al., 2023; Ramírez et al., 2023).

Desde el enfoque metodológico, el presente estudio incorpora herramientas de análisis sistemático como los mapas cognitivos difusos (FUZZY COGNITIVE MAPS) y el análisis PESTEL, lo que posibilita comprender de forma integral la interacción entre factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos y legales que inciden en la calidad del agua. La combinación de estas tecnologías con talleres participativos favorece la construcción colectiva del conocimiento, integra la experiencia de los habitantes con el conocimiento científico y posibilita la construcción de escenarios prospectivos para respaldar la toma de decisiones orientadas a la gestión sostenible del recurso hídrico. Este tipo de modelos participativos se ha evidenciado mejoras en la gobernanza del agua y fortalecer la capacidad de adaptación de las

comunidades frente a las problemáticas ambientales complejas (Salberg et al., 2022; Sarmiento et al., 2024).

En el ámbito social la investigación impulsará el fortalecimiento de las capacidades locales mediante la elaboración de un manual estandarizado para la implementación de sistemas comunitarios de monitoreo de calidad del agua, elaborado con lenguaje sencillo, ilustraciones y procedimientos prácticos que permitan su utilización por juntas administradoras de agua potable de diferentes comunidades rurales del Ecuador, la finalidad del manual es favorecer la apropiación del conocimiento por parte de los usuarios del sistema de agua, impulsando procesos permanentes de vigilancia comunitaria, educación ambiental y participación ciudadana, elementos fundamentales para salvaguardar la sostenibilidad de las acciones implementadas y la continuidad del monitoreo más allá del periodo de investigación (Ramírez et al., 2023; Warner et al., 2024).

En el marco institucional, los resultados obtenidos constituirán un insumo técnico para el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), la junta administradora de agua potable de San Francisco de Cruz loma, la Universidad Técnica de Cotopaxi y otras organizaciones vinculadas con la gestión de recursos hídricos, proporcionando evidencia científica que propicie el fortalecimiento de programas de conservación, mantenimiento de infraestructura, educación ambiental, y monitoreo participativo, así mismo la evaluación del sistema hará posible analizar la factibilidad de incorporar tecnologías abiertas y de bajo costo como instrumentos complementarios a los procedimientos establecidos por la normativa ecuatoriana para el control de calidad del agua destinada al consumo humano.

La investigación se enmarca con el marco jurídico ecuatoriano particularmente con la Constitución de la República del Ecuador, la Ley Orgánica de recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, y el Código Orgánico del Ambiente, cuerpos normativos que reconocen al agua como un derecho humano fundamental y promueven la gestión pública y comunitaria de los recursos hídricos. De forma análoga contribuyen directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) mediante el fortalecimiento y la gestión sostenible del agua; al ODS 13 (Acción por el clima) al generar herramientas que aumentan la resiliencia comunitaria frente a cambios climáticos que repercuten en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico; y al ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) al promover la conservación de los ecosistemas altoandinos responsables de la regulación hídrica.

Finalmente, este estudio trasciende la evaluación técnica de un prototipo de monitoreo ya que propone un modelo participativo que incluye innovación tecnológica, conocimiento científico y participación comunitaria para consolidar la gobernanza local del agua. La metodología desarrollada podrá ser adaptada e implementada por otras juntas administradoras de agua potable rurales del Ecuador con rasgos semejantes, constituyéndose en una herramienta replicable para mejorar el monitoreo de la calidad de agua, fortalecer el proceso de decisión comunitaria y contribuir a la protección sostenible de los recursos hídricos.

4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios del presente proyecto se clasifican en directos e indirectos. Los beneficiarios directos corresponden a la población que reside en la zona de intervención del estudio, mientras de los beneficiarios indirectos comprenden a los habitantes de la comunidad donde se encuentra localizado el ecosistema afectado

Tabla 1.

Distribución de los beneficiarios del proyecto

BENEFICIARIOS DIRECTOS	
Comunidad	Cantidad
San Francisco de Cruz	155
Loma	
BENEFICIARIOS INDIRECTOS	
Parroquia	Cantidad
Lloa	1959

Nota: La tabla presenta los beneficiarios directos ubicados en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma y los beneficiarios indirectos correspondientes a la parroquia Lloa.

5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel global, uno de los principales desafíos para garantizar el acceso de agua segura es la ausencia de sistemas de monitoreo continuo, que permitan identificar oportunamente cambios en la calidad del recurso aunque existen metodologías convencionales basadas en análisis de laboratorio, estos procedimientos suelen requerir infraestructura especializada, altos costos económicos y tiempos prolongados para la obtención de resultados, lo que limita su aplicación permanente en comunidades pequeñas, en este escenario, el uso de tecnologías de bajo costo sensores ambientales y herramientas de ciencia abierta representa una alternativa

para fortalecer la vigilancia comunitaria de la calidad del agua (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020; Ramírez et al., 2023)

En América latina con la gestión comunitaria del agua representa uno de los principales mecanismos para garantizar el suministro en zonas rurales, no obstante, muchas juntas administradoras afrontan restricciones económicas, técnicas, e institucionales que dificultan la realización de monitoreos frecuentes y la generación de información confiable sobre el estado del recurso hídrico, a estos se añaden los efectos de la variabilidad climática el incremento de eventos extremos y el deterioro de los ecosistemas reguladores del agua, factores que incrementan la vulnerabilidad de las comunidades abastecidas por fuentes naturales (Alvarez et al., 2024; Zegarra Méndez et al., 2005)

En Ecuador la gestión comunitaria del agua es reconocida por la constitución de la república y por la ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua, como elemento esencial para el ejercicio del derecho humano al agua, sin embargo, numerosas juntas administradoras siguen enfrentando problemáticas para realizar controles permanentes de la calidad del agua a causa del alto valor económico de los análisis especializados la limitada disponibilidad de equipos de monitoreo y la escasa generación de información continua que apoye la toma de decisiones técnicas y comunitarias (Molina et al., 2024)

Esta realidad se evidencia en la comunidad San Francisco de Cruz Loma ubicada en la provincia de Pichincha donde el sistema de distribución de agua potable está a cargo por la junta administradora de agua potable a través de un convenio con la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). En el marco de la fase de diagnóstico desarrollada conjuntamente con el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) se identificó que la comunidad posee una organización comunitaria fortalecida, experiencia en la gestión del recurso hídrico y una cultura orientada a la conservación del páramo, sin embargo también se identificaron factores que pueden comprometer la calidad del agua, como el incremento de la turbidez en época de invierno, la disminución del caudal en épocas de verano la limitada frecuencia de análisis de frecuencia de análisis especializados debido a sus costos elevados, el desconocimiento sobre la calidad final del agua que llega a los hogares y la inexistencia de un sistema comunitario de monitoreo continuo que permita conocer el comportamiento de parámetros fisicoquímicos como pH, turbidez conductividad eléctrica temperatura, oxígeno disuelto y caudal.

Según Sarmiento et al., (2024), el diagnóstico participativo mediante la metodología PESTEL ayudo a identificar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la gestión del recurso hídrico, entre ellos destacan la insuficiencia de recursos económicos para ampliar el monitoreo de calidad del agua, el requerimiento de incorporar tecnologías accesibles para el seguimiento constante del parámetro de calidad, la presencia de turbidez provocada por procesos naturales de erosión y derrumbes, así como la falta de claridad a las obligaciones institucionales ante futuras afectaciones relacionadas con la calidad del agua.

Frente a esta problemática es prioritario implementar alternativas tecnológicas que complementen los métodos tradicionales de control mediante sistemas de monitoreo continuo basados en sensores accesibles y principios de ciencia abierta, permitiendo producir información permanente que fortalezca la gestión comunitaria del recurso hídrico , facilita la detección temprana de alteraciones y contribuya a la toma de decisiones por parte de la Junta Administradora de Agua Potable , FONAG, EPMAPS y las instituciones responsables de la gestión ambiental, en este contexto, la presente investigación propone evaluar un sistema de monitoreo continuo de calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma , incorporando herramientas de ciencia abierta y ciudadana, participación comunitaria, factores PESTEL y mapas cognitivos difusos, con la finalidad de generar información técnico-científica que contribuya al fortalecimiento del agua y resulte útil como una alternativa transferible para otras comunidades rurales del Ecuador, basado en ciencia abierta y ciudadana.

6 OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1 Objetivo general

Evaluar la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua para consumo humano basado en ciencia abierta y con la participación de la comunidad de San Francisco de Cruz Loma para generar información básica y permanente sobre la calidad del agua de la comunidad.

6.2 Objetivos específicos

Identificar los principales conceptos que afectan la calidad del agua en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma desde una perspectiva política, económica, social, tecnológica, ecológica, y legal (PESTEL).

Diseñar un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.

Elaborar un manual para la implementación de sistema de monitoreo de la calidad del agua que integre soluciones para la gestión comunitaria del recurso hídrico y promueva el uso adecuado del sistema en las juntas administradoras de agua potable rurales

7 ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 2.

Sistema de tareas para cada objetivo

OBJETIVOS	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADO
Identificar los principales conceptos que afectan la calidad del agua en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma desde una perspectiva política, económica, social, tecnológico, ecológico y legal (PESTEL).	Adaptación participativa de factores PESTEL y diagnostico comunitario	Presentación de los factores PESTEL previamente identificados. Taller participativo para adaptar los factores al contexto de la comunidad. Identificación de factores locales que influyen en la calidad y disponibilidad del agua. Sistematización de los resultados.	Factores PESTEL adaptados al contexto de San Francisco de Cruz Loma. Matriz PESTEL validada por la comunidad Diagnostico participativo de los factores que influyen en la calidad del agua.
Diseñar un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.	Ciencia ciudadana, ciencia abierta y modelado participativo mediante Mapas Cognitivos Difusos.	Construcción de mapas cognitivos Difusos con la comunidad. Identificación causa - efecto de los factores PESTEL. Digitalización del mapa cognitivo difuso utilizando el software Mental Modeler. Evaluación de escenarios con o sin	Mapa Cognitivo Difuso validado por la comunidad. Sistema de monitoreo participativo diseñado. Escenarios de gestión del agua evaluados.

		sistema de monitoreo comunitario.	
Elaborar un manual para la implementación de sistema de monitoreo de la calidad del agua que integre soluciones para la gestión comunitaria del recurso hídrico y promueva el uso adecuado del sistema en las juntas administradoras de agua potable rurales	Diseño metodológico del manual comunitario basado en ciencia ciudadana, ciencia abierta y los resultados obtenidos durante el diagnóstico participativo, el análisis PESTEL y los Mapas Cognitivos Difusos.	Diseño de la estructura y contenido del manual de acuerdo con las necesidades de la comunidad. Elaboración de módulos, diagramas, ilustraciones, formatos de registro y actividades participativas. Revisión y ajuste del contenido del manual para su aplicación en comunidades rurales.	Manual comunitario para la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua elaborado. Estructura metodológica del manual adaptada al contexto de San Francisco de Cruz Loma.

Nota: resultados esperados para cada objetivo en base a la metodología y actividades planteadas.

8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

8.1 Calidad del agua en los páramos de la sierra norte/centro del ecuador

La calidad del agua corresponde al conjunto de propiedades físicas, químicas, y biológicas que establecen si este recurso es idóneo para el consumo humano y otros usos, además de poner en evidencia el estado de conservación de los ecosistemas donde se origina. En los páramos de la sierra centro del Ecuador, esta condición adquiere especial relevancia debido a que estos ecosistemas funcionan como reguladores naturales del ciclo hidrológico, almacenando agua en sus suelos orgánicos y liberándola hacia ríos quebradas, y sistemas de abastecimiento para las comunidades (Brück et al., 2023; Mosquera et al., 2023). No obstante, diversos estudios señalan que la calidad del agua puede verse afectada por actividades como el cambio de uso del suelo, la expansión agrícola y ganadera, el turismo y los efectos de la variabilidad climática, ocasionando cambios en parámetros como la turbidez, la conductividad eléctrica y la presencia de sedimentos. (Ramírez et al., 2023; Rey-Romero et al., 2022). Por esta razón, el monitoreo permanente de estos parámetros constituye una herramienta fundamental para conocer el estado del recurso hídrico y mejorar su gestión y conservación en las comunidades alto andinas.

8.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua en páramos

La evaluación de la calidad del agua en los ecosistemas de páramo tiene como fundamento el análisis de parámetros físico, químicos y, microbiológicos los cuales permiten detectar alteraciones en las condiciones naturales del recurso hídrico y establecer su aptitud para el consumo humano, entre los parámetros físico químicos más utilizados se encuentran el potencial de hidrogeno (pH), turbidez, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y el caudal, debido a que aportan información sobre las características del agua y permiten detectar cambios ocasionados por proceso biológicos o por actividades antrópicas (Daconte et al., 2024). En los páramos andinos, factores como la erosión del suelo, los derrumbes, la variabilidad climática, el turismo y las actividades agropecuarias pueden modificar estos indicadores afectando la calidad y el recurso hídrico disponible (Armijos-Arcos et al., 2025). Por ello, el monitoreo sistemático del recurso hídrico constituye una herramienta esencial para apoyar la gestión comunitaria de los parámetros, facilitar la detección temprana de posibles problemas de contaminación y recopilar información técnica que favorezca a la toma de decisiones para la conservación de las fuentes de agua destinadas al consumo humano (Mosquera et al., 2023).

8.1.2 Características hidrológicas y ecológicas de los páramos de la sierra centro del Ecuador

Los páramos de la sierra centro del Ecuador constituyen ecosistemas estratégicos por su capacidad para captar, almacenar y regular el agua que abastece a numerosas comunidades y ciudades andinas. Estos ecosistemas se desarrollan generalmente sobre los 3000 msnm. Donde las bajas temperaturas, la alta humedad y los suelos ricos en materia orgánica favorecen una elevada capacidad de retención hídrica, permitiendo mantener el flujo de agua durante gran parte del año (Berrones et al., 2022; Mosquera et al., 2023). Así mismo, la vegetación característica del páramo desempeña un papel fundamental en la protección el suelo, la regulación del ciclo hidrológico y la conservación de la biodiversidad, favorecer la reducción de eventos climáticos extremos como sequías o precipitaciones intensas (Mosquera et al., 2023). Sin embargo, estos ecosistemas se ven afectador por presiones derivadas por el cambio del uso del suelo la expansión de actividades productivas, el turismo, y la variabilidad climática, factores que alteran las dinámicas de la disponibilidad y la calidad del agua destinada al consumo humano (Brück et al., 2023; Rey-Romero et al., 2022). En este contexto la conservación de los páramos representa una estrategia esencial para garantizar la seguridad hídrica favorece la gestión sostenible del recurso en comunidades alto andinas como San Francisco de Cruz Loma.

8.1.3 Servicios ecosistémicos

Los páramos andinos suministran servicios ecosistémicos esenciales que benefician tanto a las comunidades locales como las poblaciones ubicadas agua abajo, siendo el suministro y la regulación del recurso hídrico uno de los más importantes. Estos ecosistemas captan agua originaria de las precipitaciones, la almacenan en sus suelos con alto contenido de materia orgánica y la liberan gradualmente hacia ríos quebradas y sistemas de abastecimiento. Para garantizar la disponibilidad del recurso por actividades humanas, productivas (Mosquera et al., 2022). En Ecuador la conservación de este ecosistema resulta indispensable debido a que abastecen de agua a numerosas comunidades rurales y centros urbanos, razón por la cual su manejo sostenible en monitoreo permanente constituye estrategias fundamentales para garantizar la seguridad hídrica y la continuidad de los beneficios ambientales que proporciona (Fonseca et al., 2022).

8.1.4 Principales amenazas a la calidad del agua

La calidad del agua en los ecosistemas de páramo se encuentra amenazada por diversos factores naturales y antrópicos que alteran sus características físicas, químicas y biológicas. Entre las principales presiones se encuentran el cambio de uso del suelo, la expansión de la frontera agrícola y ganadera, el turismo no planificado y los efectos de la variabilidad climática, los cuales favorecen procesos de erosión, incremento de sedimentos y alteraciones en la disponibilidad del recurso hídrico (Brück et al., 2023; Rey-Romero et al., 2022). Asimismo, eventos como incendios forestales, derrumbes y la pérdida de cobertura vegetal pueden incrementar la turbidez del agua y afectar su calidad para consumo humano. En este contexto, el monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua permite identificar oportunamente estas amenazas y generar información que apoye la conservación de los páramos y la gestión sostenible de las fuentes de abastecimiento para las comunidades andinas (Mosquera et al., 2023).

8.2 Monitoreo comunitario del recurso hídrico

El monitoreo comunitario del recurso hídrico es una estrategia que promueve la participación activa de la población en la recolección, registro e interpretación de información sobre el estado de las fuentes de agua, fortaleciendo la gestión local y la toma de decisiones para su conservación. De acuerdo con (Conrad & Hilchey, 2011) este enfoque no solo complementa los programas tradicionales de monitoreo ambiental, sino que también fomenta el aprendizaje colectivo y el compromiso de las comunidades con la protección de los recursos

naturales. Asimismo, la participación comunitaria permite generar información continua en territorios donde el monitoreo institucional es limitado, facilitando la identificación temprana de problemas que afectan la calidad y disponibilidad del agua (Njue et al., 2019). En este contexto, el monitoreo participativo representa una herramienta fundamental para fortalecer la gobernanza del agua y promover una gestión sostenible del recurso hídrico en comunidades rurales como San Francisco de Cruz Loma.

8.2.1 Concepto y evolución del monitoreo ambiental participativo

El monitoreo ambiental participativo ha evolucionado desde enfoques en los que la comunidad únicamente colaboraba en la recolección de información hacia modelos donde los ciudadanos participan activamente en la identificación de problemas, el monitoreo, el análisis de resultados y la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental. Esta transformación ha fortalecido la generación de conocimiento local y ha incrementado la confianza entre investigadores y comunidades (Danielsen et al., 2022; Dominguez-Rendón et al., 2024). Asimismo, el desarrollo de tecnologías digitales, sensores de bajo costo, aplicaciones móviles y sistemas de información geográfica ha facilitado la participación comunitaria y el seguimiento continuo de variables ambientales, permitiendo obtener información en tiempo real y mejorar la vigilancia de los recursos hídricos (Starkey et al., 2024). En consecuencia, el monitoreo participativo se ha consolidado como una herramienta que integra el conocimiento científico con el conocimiento local, fortaleciendo la gobernanza ambiental y promoviendo una gestión más sostenible de los ecosistemas y de las fuentes de agua (Dominguez-Rendón et al., 2024; Reyes-García et al., 2022).

8.2.2 Participación comunitaria en la gestión del agua

La participación comunitaria es un elemento fundamental para la gestión sostenible del agua, ya que promueve la corresponsabilidad de la población en la protección, administración y vigilancia de este recurso esencial, en las comunidades rurales, las juntas administradoras de agua potable desempeñan un papel clave al coordinar acciones de operación, mantenimiento y conservación de las fuentes hídricas, fortaleciendo la gobernanza local y la toma de decisiones colectivas (Machado et al., 2019; Pinos et al., 2020). Asimismo, la participación activa de los usuarios favorece el intercambio de conocimientos entre la comunidad y las instituciones, facilitando la identificación de problemáticas, la implementación de medidas preventivas y el uso responsable del agua (Dominguez-Rendón et al., 2024; Abarzúa & Glückler, 2023). Este enfoque participativo también fortalece la resiliencia de las comunidades frente a los desafíos

ambientales y contribuye a garantizar una gestión más eficiente, transparente y sostenible de los sistemas comunitarios de abastecimiento de agua (Daniel et al., 2023; Gansauer et al., 2023).

8.2.3 Enfoque de género y rol de las mujeres en la gestión del agua

El enfoque de género en la gestión del agua reconoce el papel fundamental que desempeñan las mujeres en la conservación de los recursos hídricos y en la transmisión de conocimientos relacionados con el cuidado del ambiente (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020). Diversos estudios señalan que la participación equitativa de las mujeres en los procesos de gobernanza fortalece la toma de decisiones, mejora la sostenibilidad de los sistemas comunitarios de agua y promueve una distribución más justa de las responsabilidades y beneficios asociados al recurso hídrico (Brecht Mommen et al., 2017). Asimismo, la inclusión activa de las mujeres en proyectos de monitoreo y gestión ambiental contribuye a incrementar la resiliencia de las comunidades frente a los desafíos socioambientales y climáticos, favoreciendo procesos de desarrollo más inclusivos y sostenibles (Figueiredo & Perkins, 2013).

8.2.4 Experiencias exitosas de monitoreo comunitario en ecosistemas de páramo

Diversas experiencias desarrolladas en ecosistemas de páramo han demostrado que el monitoreo comunitario refuerza la conservación de las fuentes hídricas al incorporar el conocimiento local con herramientas científicas para la vigilancia ambiental (Ochoa-Tocachi et al., 2018). En estas áreas críticas como las comunidades indígenas y campesinas han establecido sistemas para mejorar la gestión del recurso, para promover la restauración de zonas de recarga y fortalecer la gobernanza comunitaria frente a las presiones ambientales, estas iniciativas han evidenciado que la colaboración entre instituciones, academia y comunidades favorece la generación de información confiable para la toma de decisiones y la protección sostenible de los ecosistemas de alta montaña (Gallardo et al., 2013).

8.3 Ciencia abierta

La ciencia abierta representa un enfoque que promueve el acceso libre al conocimiento científico, la cooperación entre investigadores y la participación activa de la sociedad en la generación y uso de la información esta propuesta busca que los datos, metodologías y resultados de las investigaciones estén disponibles, transparentes y reutilizables, favoreciendo la innovación y la toma de decisiones basada en evidencia (Serbe-Kamp et al., 2023). Del mismo modo la ciencia abierta fomenta la integración de distintos actores, como universidades, instituciones públicas y comunidades locales, consolidando la producción colectiva del

conocimiento y contribuyendo a resolver problemáticas ambientales y sociales de manera más inclusiva y sostenible (Vicente-Saez & Martinez-Fuentes et al., 2018).

8.3.1 Principios de la ciencia abierta y acceso a datos ambientales

Los principios de la ciencia abierta fomentan que la información científica sea accesible, transparente y reutilizable, contribuyendo al intercambio de investigadores instituciones y comunidades, favoreciendo al acceso de datos abiertos en el monitoreo de recursos naturales, especialmente cuando la información es generada de forma colaborativa (Higman et al., 2019). Sin embargo, la apertura de datos también requieren asegurara principios éticos relacionados con la protección de la información, del conocimiento de las comunidades y el uso responsable de los datos ambientales, en zonas donde se requieren recursos estratégicos como las fuentes de agua (Carroll et al., 2021).

8.3.2 Redes colaborativas y plataforma de ciencia abierta en agua

Las redes colaborativas y la plataforma de ciencia abierta han fortalecido el monitoreo de los recursos hídricos al facilitar el intercambio de información mediante el uso de dispositivos móviles sin necesidad de equipamiento físico costoso e internet de las cosas (IoT) (Amador-Castro et al., 2024). Igualmente, la colaboración entre actores locales y científicos facilita la generación de información confiable para la toma de decisiones y contribuye a la formulación de estrategias más eficientes para la conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos (Carlson & Cohen, 2018).

8.4 Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua

8.4.1 Sistema de monitoreo para la calidad del agua destinada al consumo humano

Un sistema de monitoreo de la calidad del agua es un conjunto integrado de equipos, sensores, dispositivos de procesamiento y herramientas de almacenamiento que permiten registrar de manera continua variables físicas y químicas del recurso hídrico para apoyar su evaluación y gestión. estos sistemas facilitan la detección temprana de alteraciones en parámetro como pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto proporcionando información oportuna para la deliberación relacionada con el abastecimiento de agua para consumo humano (Amador-Castro et al., 2024). En los últimos años, el desarrollo de tecnologías de bajo costo y plataformas de código abierto a favorecido la implementación de sistemas de monitoreo en comunidades rurales, al reducir los costos de operación y permitir

la participación activa de los usuarios en la generación y seguimiento de información ambiental (Lal et al., 2024).

8.4.2 Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo

Las técnicas de monitoreo de bajo costo han adquirido una importancia ascendente en la evaluación de la calidad del agua, ya que permiten acceder a información continua mediante el uso de sensores accesibles y tecnologías de código abierto reduciendo significativamente los costos asociados a los análisis convencionales del laboratorio, cuyo costo total de implementación puede ser inferior a los 80 dólares estadounidenses. De acuerdo con Sharma et al.. (2026) estos sistemas facilitan la medición de parámetros físico químicos como pH, turbidez, temperatura y conductividad eléctrica con alta precisión adecuada para aplicaciones comunitarias y problemas de vigilancia ambiental. Por otra parte, De Camargo et al.. (2023) señalan que la integración de equipos de bajo costo con plataformas digitales favorece la monitoreo en tiempo real y fortalece la detección temprana de cambios en la calidad del agua especialmente en zonas rurales donde el acceso a infraestructura realizada es limitado.

8.4.3 Sensores abiertos y hardware libre para medición de parámetros hídricos

Los sensores de monitoreo de la calidad de agua basados en hardware libre se han convertido en una alternativa tecnológica eficiente y bajo costo para el seguimiento de recursos hídricos. Entre las plataformas más utilizadas se encuentra el microcontrolador este p32, el cual destaca por su capacidad de procesamiento bajo consumo de energía y conectividad integrada mediante wifi y bluetooth, facilitando la adquisición y transmisión de datos ambientales en tiempo real (Sharma et al., 2026). Sobre esta plataforma pueden incorporarse diversos sensores para medir parámetros fisicoquímicos, pH, turbidez, temperatura, y solidos disueltos totales (TDS), lo que permite obtener información confiable sobre el estado el agua. Según Sharma et al. (2026), estos dispositivos se rigen por principios específicos de medición, electrodos de vidrio para el pH, conductividad eléctrica, para los TDS y tecnologías de dispersión de luz infrarroja para determinar la turbidez. Para la temperatura, suele registrarse mediante sensores digitales como el DS18B20 lo cuales ofrecen mediciones precisas y un procesamiento sencillo de la señal, facilitando su aplicación en sistemas de monitoreo ambiental de código abierto (De Camargo et al., 2023; Sharma et al., 2026).

8.4.4 Aplicaciones móviles y sistemas de visualización de datos

Las aplicaciones móviles y las plataformas de visualización de datos ejercen un papel fundamental en los sistemas de monitoreo de la calidad del agua, ya que permiten modificar los

registros obtenidos por los sensores en información clara y fácil interpretación para los usuarios. De acuerdo con Sharma et al. (2026), servicios en la nube como Google firebase facilitan el almacenamiento y la sincronización de datos mediante bases d datos NoSQL, dando acceso remoto a la información de tiempo real de manera complementaria, plataformas como de ThingSpeak y node-RED suministran herramientas para la creación de paneles de control interactivos, donde, es posible visualizar gráficos de tendencia, indicadores del estado del agua y mapa de georreferenciación que favorecen el seguimiento continuo de las variables monitoreadas (Jan et al., 2021; Mohamad et al., 2024). Además, pueden generar alertas automáticas cuando parameros como el pH, turbidez o la conductividad superan los límites establecidos, facilitando una respuesta inmediata a eventos que comprometan la calidad del recurso hídrico

8.4.5 Internet de las cosas (IoT) y su aplicación en comunidades rurales

El internet d las cosas (IoT) ha transformado la forma en que se realiza el monitoreo ambiental al garantizar la interconexión de sensores, dispositivos y plataforma digitales para recolectar y transmitir información en tiempo real. En territorios rurales esta tecnología representa una alternativa eficiente para controlar la calidad del agua, principalmente en lugares donde el acceso a infraestructura de comunicación es limitado. Las redes inalámbricas de bajo costo y largo alcance, como LoRaWAN, permiten la transmisión de datos a varios kilómetros de distancia con un mínimo requerimiento energético lo que favorece su implementación en zonas de difícil acceso. Por otro lado, Awais et al. (2023), señalan que la integración de sensores IOT permite monitorear continuamente variables ambientales y difundir alertas tempranas cuando se detectan cambios en los parámetros establecidos. Estas herramientas también refuerzan la participación comunitaria al proporcionar información confiable para la toma de decisiones y optimizar el manejo sostenible del agua en comunidades rurales (Khan et al., 2024).

8.4.6 Retos técnicos y logísticos en el monitoreo en zonas remotas

La implementación de sistemas de monitoreo de la calidad del agua en zonas remotas presenta diversos desafíos técnicos y operativos que puedes afectar la continuidad y confiabilidad de la información recolectada. De acuerdo con Naloufi et al. (2024) y De Camargo et al. (2023) los sensores instalados en cuerpos de agua están expuestos a incorporación biológica (biofouling), acumulación de sedimentos y variaciones ambientales que disminuyen la precisión de las mediciones y justifican su limpieza y calibración periódica.

Así mismo, (Trevathan & Schmidtke, 2022), evidencian que la disponibilidad de energía y las limitaciones en la actividad simbolizan uno de los principales obstáculos para el monitoreo continuo en comunidades rurales, por lo que es conveniente incorporar dispositivos de bajo consumo energético y sistemas de transmisión de datos adaptados a estas condiciones. Del mismo modo, la protección física de los equipos mediante carcasas resistentes al agua, la humedad, y el polvo contribuye a prolongar su vida útil y garantizar su funcionamiento estable en ambientes de alta montaña, donde las condiciones climáticas suelen ser variables y exigentes (Lal et al., 2024; Trevathan & Schmidtke, 2022).

8.4.7 Integración de tecnologías abiertas para el monitoreo participativo de la calidad del agua

Las tecnologías abiertas han permitido desarrollar sistemas de monitoreo ambiental accesibles, adaptables y de bajo presupuesto capaces de responder a las necesidades de comunidades rurales responsables de la gestión del recurso hídrico. La combinación de plataformas de hardware libre, sensores para la medición de parámetros físico químicos, redes de comunicación (IoT) y aplicaciones de visualización facilita la obtención y el análisis continuo de información sobre la calidad del agua (Trevathan & Schmidtke, 2022). De acuerdo con Amador-Castro et al. (2024) la interoperabilidad entre estos componentes tecnológicos favorece la construcción de sistemas orientados al monitoreo ambiental en tiempo real, en este contexto, la utilización de tecnologías abiertas no solo reduce los costos de implementación y mantenimiento, sino que también promueve la apropiación del conocimiento por parte de las comunidades, estableciéndose en una herramienta clave para fomentar el monitoreo participativo y la conservación de fuentes de agua destinados al consumo humano (Ramírez et al. 2023).

8.5 Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua

8.5.1 Ciencia ciudadana como herramienta para la gestión del recurso hídrico

Ciencia ciudadana se ha consolidado como una estrategia que promueve la participación activa de la población en los procesos de investigación científica, impulsando la reacción de información útil para la gestión sostenible de los recursos naturales (Dominguez-Rendón et al., 2024). En el área de recursos hídricos, este enfoque brinda la posibilidad de recolección de análisis de datos sobre la calidad de agua fortaleciendo la vigilancia ambiental por parte de comunidades, instituciones académicas (Amador-Castro et al., 2024). Según Ramírez et al. (2023), la integración de los habitantes locales en el monitoreo de fuentes hídricas incrementa

la cobertura espacial de la información e impulsa al fortalecimiento de la gobernanza del agua, especialmente en territorios rurales donde el monitoreo institucional suele ser limitado. Amador-Castro et al. (2024) destacan que la participación comunitaria favorece la apropiación del conocimiento, intensifica las capacidades locales y promueve una mayor corresponsabilidad en la conservación del recurso hídrico, convirtiendo a la ciencia ciudadana en una herramienta clave para la gestión ambiental participativa.

8.5.2 Integración del conocimiento local y saberes tradicionales

La integración del conocimiento local con el conocimiento científico constituye un enfoque cada vez más utilizado para mejorar la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en comunidades rurales donde los habitantes presentan un amplio entendimiento sobre el comportamiento de las fuentes de agua y los cambios ambientales de su territorio. De acuerdo con (Yanou et al., 2023), los saberes tradicionales complementan la información técnica al aportar experiencias recopiladas durante generaciones, incentivando la identificación de problemáticas y el diseño de estrategias de conservación adaptadas al contexto local. En este sentido, Zvobgo et al. (2022) señalan que la articulación entre ambos tipos de conocimiento mejora la calidad de la información generada y fortalece la participación de las comunidades en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua (Yanou et al., 2023; Zvobgo et al., 2022). Asimismo, el reconocer e incorporar estos conocimientos contribuye a la conservación de los ecosistemas, refuerza la identidad cultural y promueve procesos de gobernanza más inclusivos y sostenibles, aspectos fundamentales para garantizar la protección de las fuentes hídricas en territorios andinos (Yanou et al., 2023).

8.5.3 Validación, ética y calidad de los datos generados por la ciudadanía

La confiabilidad de la información obtenida mediante ciencia ciudadana depende de la aplicación de protocolos estandarizados, la capacitación de los participantes y la verificación continua de los datos recolectados (Babiso et al., 2023). La implementación de procedimientos de control de calidad permite que la información generada por la ciudadanía alcance niveles de precisión comparables con los obtenidos en programas de monitoreo científico (Stankiewicz et al., 2023). La formación de los participantes y el acompañamiento de investigadores fortalece la calidad de registros que aumentan la confianza de los resultados obtenidos (Ramírez et al., 2023). Desde una perspectiva ética la recopilación y uso de la información debe desarrollarse desde principios de transparencia consentimiento y respeto hacia las comunidades participantes garantizando que los datos generados contribuyan al beneficio colectivo y apoyen la toma de

decisiones del recurso hídrico especialmente en territorios donde la participación comunitaria representa un elemento fundamental de la gobernanza del agua (Ozolinčiūtė et al., 2022; Thuermer et al., 2023).

8.6 Gobernanza del agua bajo el marco PESTEL.

La gobernanza del agua requiere comprender los múltiples factores externos que influyen en la gestión del recurso hídrico, especialmente en comunidades rurales donde intervienen aspectos institucionales sociales, ambientales en este contexto el análisis PESTEL constituye una herramienta útil para identificar y evaluar de manera integral las dimensiones políticas económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales que condicionan la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua (Herrera-Franco et al., 2025). Según Pacheco Peña et al., (2023), este enfoque facilita el análisis del entorno y permite reconocer oportunidades y riesgos que pueden afectar la toma de decisiones. La incorporación de herramientas de análisis estratégicos en la gestión del agua favorece a la gobernanza mejora la planificación y fortalece la adaptación de las comunidades frente a los desafíos ambientales y sociales, así lo destacan (Herrera-Franco et al., 2025)

8.6.1 Modelo de gobernanza en los páramos

En los ecosistemas de páramo ecuatorianos, la gobernanza del agua se fundamenta en la participación de las comunidades, las juntas administradoras y las instituciones responsables de la conservación de las fuentes hídricas, este modelo promueve la corresponsabilidad entre los actores locales para proteger los ecosistemas de recarga hídrica y garantizar el abastecimiento de agua para consumo humano (Cartuche et al., 2021). La gestión comunitaria fortalece la sostenibilidad del recurso al incorporar conocimientos locales como mecanismos de organización y procesos de vigilancia ambiental, en este sentido se señala que la articulación entre organizaciones comunitarias e instituciones públicas favorece la conservación de los páramos y potencia la capacidad de respuesta frente a amenazas que afectan la disponibilidad y calidad el agua (Perugachi Cachimuel & Cachipundo Ulcuango, 2020).

8.6.2 Fondos de agua como mecanismo para la conservación de fuentes hídricas

Los fondos de agua representan mecanismos financieros y de gobernanza orientados a garantizar la conservación de los ecosistemas que abastecen de agua a las poblaciones por medio de la participación coordinada de instituciones públicas, empresas privadas, organizaciones sociales y comunidades (Roldán-Reascos et al., 2024). En Ecuador el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), fundado en el año 2000, fue el primer fondo del agua

del mundo y ha consolidado un modelo basado en la corresponsabilidad entre los usuarios del recurso hídrico y quienes habitan las zonas d carga impulsando acciones de conservación, restauración de páramos, monitoreo ambiental y mejoramiento de la gestión comunitaria del agua (FONAG et al., 2022). Esta propuesta permite asegurar la disponibilidad del recurso hídrico a largo plazo, fortaleciendo la gobernanza territorial y dando como resultado beneficios ambientales y sociales para las comunidades vinculadas a las fuentes de agua(Villagómez-Reséndiz, 2026).

8.6.3 Marco legal e institucional de la gestión comunitaria del agua

En el Ecuador, la gestión comunitaria del agua se encuentra respaldada por un marco jurídico que reconoce el agua como un derecho humano fundamental y un patrimonio estratégico de uso público, asegurando que su administración se realice bajo criterios de sostenibilidad, participación y equidad en este contexto las juntas administradoras de agua potable y saneamiento (JAAPS) desempeñan un papel fundamental en la restauración del servicio de agua en las zonas rurales, impulsando la organización comunitaria y la protección de las fuentes hídricas mediante una gestión autónoma de carácter no lucrativo (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014, arts. 43–46; ARCA, 2025). No obstante, se mantienen desafíos relacionados con el fortalecimiento institucional, la disponibilidad de recursos técnicos y financieros, así como la inclusión que garanticen una participación justa de mujeres y hombres en la toma de decisiones estratégicas para la gestión sostenible del recurso hídrico (Cartuche et al., 2021).

8.6.4 Incorporación del monitoreo comunitario en la toma de decisiones

Corporación del monitoreo comunitario en la gestión del agua permite generar información confiable sobre el estado del recurso hídrico, favoreciendo la determinación de problemas y la planificación de acciones orientadas a su conservación. La participación activa de las comunidades en la recolección e interpretación de datos fortalece la transparencia, mejora la comunicación entre factores locales y promueve decisiones sustentadas en evidencia científica y conocimiento territorial (FONAG et al., 2022; Brück et al., 2023)De igual manera, la información obtenida a través de procesos participativos puede constituirse en un insumo técnico para formulación y actualización de instrumentos de planificación, como los planes de desarrollo y ordenamiento territorial (PDOT), contribuyendo a fortalecer la gobernanza del agua y la gestión sostenible de las fuentes hídricas en el ámbito local (Pacheco Peña et al., 2023) ,la información obtenida mediante el monitoreo comunitario requiere herramientas que faciliten

su interpretación y aplicación en la gestión del recurso hídrico. En este contexto, la elaboración de manual constituye un instrumento de apoyo para disponibilidad del agua, reconocer posibles problemáticas, plantear soluciones y entender los beneficios que ofrece un sistema de monitoreo. En este tipo de documentos incrementa las capacidades locales y contribuye a la continuidad de las actividades de vigilancia y conservación de recurso hídrico (Fonseca et al., 2022)

8.6.5 Colaboración de actores locales, académicos e institucionales

La gestión sostenible del recurso hídrico requiere la articulación entre comunidades, instituciones públicas como universidades y organizaciones vinculadas con la conservación ambiental, favoreciendo el intercambio de desarrollo de soluciones y conocimientos adaptadas a las necesidades del territorio para la protección de las fuentes de agua (Pacheco Peña et al., 2023). Además, el trabajo conjunto entre la academia y las organizaciones comunitarias promueve al fortalecimiento de capacidades locales, impulsa la innovación tecnológica e incrementa la implementación de estrategias orientadas a mejorar la gestión comunitaria del agua y la conservación de los ecosistemas de páramo (Brück et al., 2023).

8.6.6 Aportes al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 6, 13 y 15)

La presente investigación contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible al fortalecer la gestión comunitaria del agua mediante herramientas de monitoreo participativo y tecnologías de bajo costo que aumentan la generación de información para la toma de decisiones (Amador-Castro et al., 2024; Fonseca et al., 2022). Estas acciones ayudan al acceso de agua segura y promueven una gestión sostenible del recurso, en concordancia con el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) (Naciones Unidas, 2015). Asimismo, el monitoreo de las fuentes de agua y la participación de la comunidad incrementa la capacidad de adaptación frente a los efectos de la variabilidad climática, aportando al ODS 13 (acción por el clima) (Fonseca et al., 2022). De la misma manera la protección de los ecosistemas de páramo como áreas estratégicas de regulación hídrica contribuye a la conservación de la biodiversidad y al uso sostenible de los ecosistemas terrestres, objetivos establecidos en el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres) (Brück et al., 2023; Fonseca et al., 2022)

9 HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

9.1. Hipótesis alternativa (Ha)

La implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta es viable en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma.

9.2 Hipótesis nula (H₀)

La implementación de un sistema de monitoreo de la calidad de agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta no es viable en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma.

Pregunta de investigación

¿Cómo influye la implementación de un sistema de monitoreo comunitario de calidad del agua, sustentado en tecnologías de código abierto, sobre los factores PESTEL que determinan el acceso al agua segura en la comunidad San Francisco de Cruz Loma?

10 ÁREA DE ESTUDIO

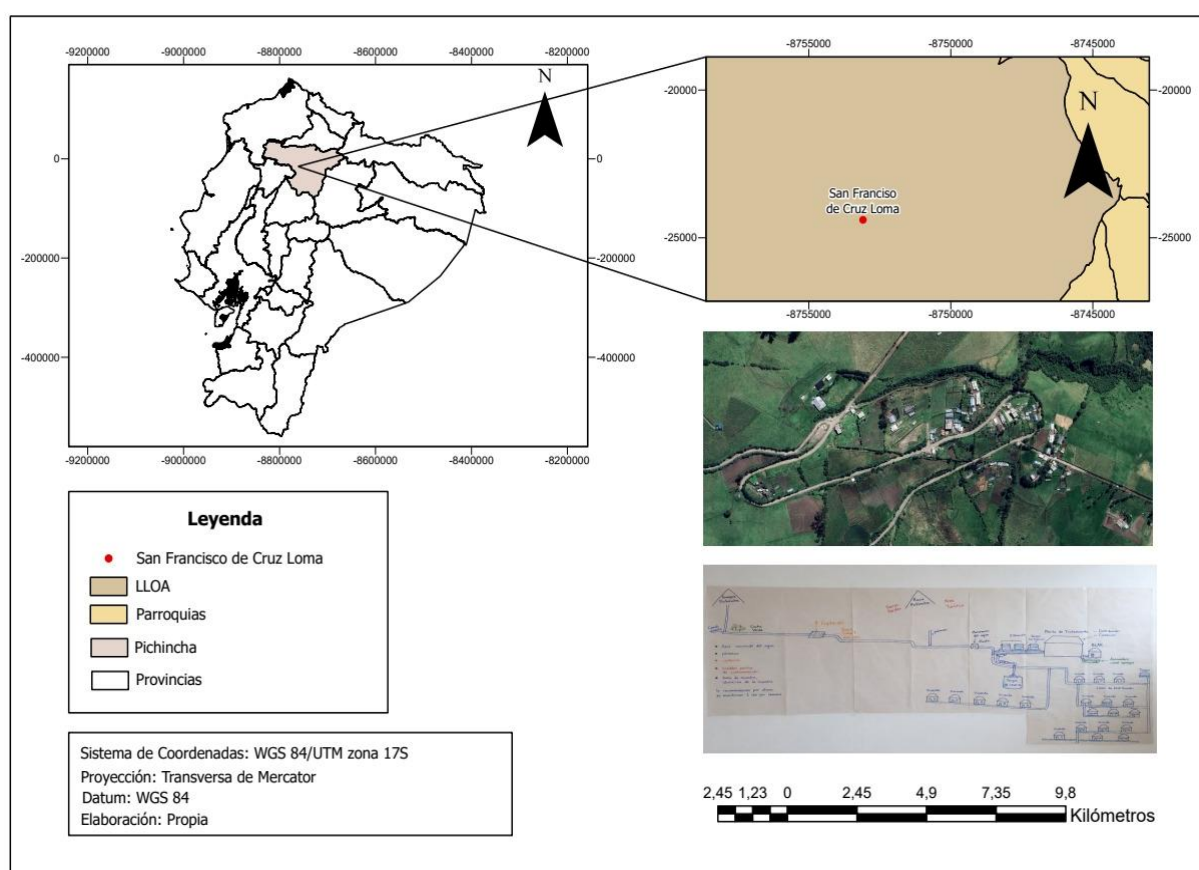
La presente investigación se desarrolló en la comunidad de San Francisco de Cruz Loma, ubicada en la provincia de Pichincha, Ecuador, la comunidad se encuentra a una altitud que varía entre los 3.945 y 4.000 msnm. (figura1). La comunidad se localiza dentro de un ecosistema de páramo, considerado estratégico por su capacidad para captar, almacenar y regular el recurso hídrico que abastece a diferentes poblaciones de la región (Mosquera et al., 2022). Este territorio forma parte de una zona de conservación donde predominan coberturas vegetales propias de los ecosistemas andinos, desempeñando un papel fundamental en la regulación de los caudales y el mantenimiento de la calidad del agua destinada al consumo humano.

El sistema de abastecimiento de agua es administrado por la Junta Administradora de Agua Potable de San Francisco de Cruz Loma, la cual presta el servicio a 55 acometidas que corresponden tanto a viviendas habitadas como a predios sin construcción, beneficiando aproximadamente a 155 habitantes (comunicación personal, D. Cajamarca, 2026). La comunidad mantiene un convenio de gestión con la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) para el abastecimiento de agua y desarrolla acciones de conservación en concordancia con el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), fortaleciendo la protección de fuentes hídricas y del ecosistema del páramo.

La comunidad fue seleccionada como área de estudio debido a su organización comunitaria, su experiencia en la gestión del recurso hídrico y su interés en fortalecer el monitoreo participativo mediante herramientas de ciencia abierta y ciencia ciudadana. Estas características la convierten en un escenario adecuado para evaluar un sistema de monitoreo de bajo costo orientado a mejorar la calidad del agua destinada al consumo humano.

Figura 1:

Área de estudio de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, parroquia Lloa Distrito Metropolitano de Quito, provincia de Pichincha.



Nota: La figura presenta la ubicación geográfica de la comunidad San Francisco de Cruz Loma a escala nacional, provincial y parroquial, complementada con una imagen satelital y el mapa comunitario del sistema de abastecimiento de agua. Sistemas de coordenadas WGS 84/UTM zona 17s.

10.1 Diseño metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, al fusionar métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar un sistema de monitoreo de calidad de agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, provincia de Pichincha

(Alvarado et al., 2022). El módulo cualitativo permitió identificar, mediante talleres participativos los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales (PESTEL) que influyen en la gestión del recurso hídrico, incorporando la percepción y el conocimiento de los actores locales (Shahvi et al., 2021). En lo que respecta al componente cuantitativo se orientó el análisis de la información obtenida a través de la clasificación de factores, la construcción de matrices de interacción y la aplicación de los Mapas Cognitivos Difusos (MCD) como herramienta para representar las relaciones entre los diferentes factores que inciden en la disponibilidad y la calidad del agua (Fonseca et al., 2022)

La investigación se fundamentó en los principios de la ciencia ciudadana, promoviendo la participación activa en la identificación de problemáticas, el análisis de los factores que afectan el recurso hídrico y la construcción colectiva del conocimiento para fortalecer la gestión comunitaria del agua (Neale et al., 2024). A su vez, el estudio contempló la adaptación de conceptos PESTEL previamente estructurados para su validación mediante talleres participativos, haciendo posible la incorporación de las particularidades de la comunidad San Francisco de Cruz Loma y generar una base conceptual para el desarrollo del sistema de monitoreo y la elaboración del manual de implementación (Starkey et al., 2024).

10.2 Enfoque cualitativo

El enfoque cualitativo hizo posible la comprensión de factores que influyen en la gestión y disponibilidad del recurso hídrico desde la experiencia e interpretación de los autores de la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Yanou et al., 2023). Para ello se desarrollaron talleres participativos en los que se ajustaron conceptos generales del análisis PESTEL al contexto local, favoreciendo la identificación y validación de los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que afectan la calidad del agua. Este enfoque facilitó la recopilación de información basada en el conocimiento comunitario e impulsó la construcción colectiva de propuestas orientadas al empoderamiento de la gestión del recurso hídrico mediante la participación activa de la comunidad (Alvarado et al., 2022; Yanou et al., 2023).

10.3 Enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo permitió representar y analizar las relaciones existentes entre los factores identificados durante los talleres participativos mediante la aplicación de los mapas cognitivos difusos (FCM), herramienta utilizada para modelar sistemas complejos y apoyar la toma de decisiones en problemáticas socioambientales (Sarmiento et al., 2024; Schuerkamp & Giabbanelli, 2024). Las relaciones entre los conceptos fueron expresadas mediante valores

comprendido entre $[-1 \text{ y } 1]$ indicando la dirección e intensidad de la influencia entre los factores. Posteriormente la información fue organizada en matrices de interacción y analizada mediante indicadores de teoría de grafos, como el grado de salida, grado de entrada y centralidad permitiendo identificar los factores con mayor influencia dentro del sistema estudiado (Karatzinis & Boutalis, 2025; Sarmiento et al., 2024)

10.4 Variables de estudio

las variables de estudio fueron definidas en función del objetivo general de la investigación, con el propósito de analizar los factores que influyen en la gestión comunitaria del recurso hídrico y su relación con el diseño de un sistema de monitoreo de la calidad de agua basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana para la comunidad San Francisco de Cruz Loma

- **Variable dependiente**
 - Implementación del sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana.
- **Variable independiente**
 - Factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales (PESTEL) que influyen en la gestión del recurso hídrico en la comunidad San Francisco de Cruz Loma.

10.5 Métodos

La investigación se desarrolló mediante un proceso participativo con la junta administradora de agua potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma. El acercamiento a la comunidad fue coordinado con el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), a través de su equipo técnico que estableció el contacto con el presidente de la junta para organizar una asamblea comunitaria. Durante esta reunión se presentaron los objetivos del estudio y se invitó a los usuarios a participar de manera voluntaria en los talleres. La selección de los participantes correspondió a un muestreo no probabilístico de tipo intencional, debido a que se trabajó con actores directamente relacionados con la gestión del recurso hídrico, cuyo conocimiento fue indispensable para el desarrollo de la investigación (Campbell et al., 2020)

10.5.1 Mapas cognitivos difusos

Los mapas cognitivos difusos (FCM) constituyeron el principal método de análisis empleado para representar las relaciones causales entre los factores que influyen en la gestión de la calidad del agua en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. A partir de la información obtenida durante los talleres participativos, los conceptos identificados fueron organizados en una matriz de interacción que permitió establecer la dirección e intensidad de las relaciones existentes entre ellos mediante valores de lógica difusa comprendidos entre $[-1, 1]$. Posteriormente, esta información fue utilizada para construir el modelo cognitivo, facilitando el análisis de escenarios, la identificación de factores, con mayor influencia y el apoyo en la selección de alternativas para el diseño del sistema de monitoreo participativo del recurso hídrico (Fonseca et al., 2022; Shahvi et al., 2021).

10.5.2 Teoría de grafos

La teoría de grafos se empleó para analizar la estructura del mapa cognitivo difuso construido a partir de los conceptos identificados durante los talleres participativos desarrollados en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, esta herramienta permitió representar matemáticamente las relaciones de influencia existentes entre los factores PESTEL y comunitarios que inciden en la disponibilidad de agua para consumo humano (Giabbanelli & Nápoles, 2024). A partir de la matriz de relaciones elaborada por los participantes se calcularon diferentes índices estructurales que permitieron identificar los conceptos con mayor influencia dentro del sistema y comprender el comportamiento global del modelo cognitivo (Fonseca et al., 2022; Shahvi et al., 2021).

Para el análisis estructural del mapa cognitivo difuso se calcularon diversos índices derivados de la teoría de grafos. Estos indicadores permiten cuantificar el comportamiento de cada concepto dentro de la red de relaciones causales y evaluar la conectividad general del sistema (Fonseca et al., 2022b). Entre los principales índices utilizados se encuentran el grado de salida (outdegree), el grado de entrada (indegree), la centralidad, la densidad, y el índice de jerarquía, los cuales permiten reconocer los conceptos con mayor capacidad de influencia, dependencia e interacción dentro de la red de relaciones representada por el mapa cognitivo (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

10.5.2.1 Grado de salida (outdegree)

El grado de salida (outdegree) representa la suma de todas las influencias que un concepto ejerce sobre los demás conceptos del sistema. (Ec. 1)

$$od(v_i) = \sum_{k=1}^N a_{ik}$$

donde:

$od(v_i)$ = grado de salida del concepto i

a_{ik} = peso de la relación causal desde el concepto i hacia el concepto k

N = Número total de conceptos del mapa

Este índice permite identificar aquellos factores que generan mayor impacto dentro del mapa cognitivo siendo considerados como variables impulsoras del comportamiento del sistema (Özesmi & Özesmi, 2004).

10.5.2.2 Grado de entrada (indegree)

El grado de entrada (indegree) corresponde a la suma de todas las influencias que recibe un concepto desde el resto de variables del sistema. (Ec. 2)

Donde:

$$id(v_i) = \sum_{k=1}^N a_{ik}$$

$id(v_i)$ = grado de entrada del concepto i

a_{ik} = peso de la relación causal desde el concepto i hacia el concepto k

N = Número total de conceptos del mapa

Este indicador permite identificar aquellos factores que representan mayor dependencia respecto a las demás variables analizadas (Özesmi & Özesmi, 2004).

10.5.2.3 Centralidad

La centralidad se obtiene mediante la suma del grado de salida y el grado de entrada de cada concepto. (Ec. 3)

$$c_i = od(v_i) + id(v_i)$$

Donde:

c_i = centralidad del concepto i

$od(v_i)$ = grado de salida.

$id(v_i)$ = grado de entrada

Este índice refleja la importancia total de cada variable dentro del sistema, ya que considera simultáneamente la influencia que ejerce y la influencia que recibe (White et al., 2021).

10.5.2.4 Densidad

La densidad expresa el nivel de conectividad dentro del mapa cognitivo difuso. (Ec. 4)

$$D = \frac{C}{N(N-1)}$$

Donde:

D = densidad del mapa

C= número total de conexiones existentes.

N = número total de conceptos.

Este índice se calcula dividiendo el número de conexiones, permitiendo conocer que tan interrelacionados se encuentran los conceptos identificados por la comunidad (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

10.5.2.5 Índice de jerarquía

El índice de jerarquía permite determinar el nivel de organización estructural del mapa cognitivo. (Ec. 5)

$$h = \frac{12}{(N-1)N(N+1)} \sum_{i=1}^N \left[od(v_i) - \frac{\sum_{i=1}^N od(v_i)}{N} \right]^2$$

Donde

h = índice de jerarquía

$od(v_i)$ = grado de salida del concepto i

N = número total de conceptos

Valores cercanos a 1 indican una estructura jerárquica, mientras que valores próximos a 0 representan sistemas más democráticos donde la influencias distribuye de manera equilibrada entre los diferentes conceptos (Shahvi et al., 2021).

10.5.3 Inferencia difusa

Una vez obtenidos los índices estructurales del mapa cognitivo difuso mediante la teoría de grafos se aplicó la inferencia difusa para analizar el comportamiento dinámico representado por los factores PESTEL y comunitarios relacionados con la implementación con el sistema de monitoreo de la calidad del agua en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Este procedimiento permite simular la interacción entre los conceptos identificados durante los talleres participativos y evaluar como una modificación en una variable puede influir el resto del sistema, incluso cuando las relaciones presentan incertidumbre o subjetividad (Concepcion et al., 2021; Nápoles et al., 2023).

La inferencia difusa conlleva un proceso iterativo mediante el cual el estado de cada concepto se actualiza continuamente de acuerdo con la intensidad de las relaciones causales definidas por la comunidad, el nuevo valor de una variable depende de la influencia ejercida por los demás conceptos conectados con el mapa cognitivo, permitiendo representar el comportamiento colectivo del sistema hasta alcanzar un estado de equilibrio, este enfoque resulta especialmente útil en investigaciones socioambientales donde intervienen procesos complejos, como la gestión comunitaria del recurso hídrico debido a que integra conocimiento técnico y percepciones locales dentro de un mismo modelo de análisis (Fonseca et al., 2022; Nápoles et al., 2023).

(Ec. 6)

$$A_i^{t+1} = f \left(\sum_{j=1}^n A_j^t \cdot W_{ji} \right)$$

Donde:

A_i^{t+1} = valor del concepto i en la siguiente iteración.

A_j^t = estado del concepto j en la iteración actual.

W_{ji} = peso de la relación causal entre los conceptos j e i.

n = numero total de conceptos del mapa cognitivo

f = función de activación

Posteriormente, el modelo permitió evaluar distintos escenarios de intervención mediante la activación de variables estratégicas(drivers), las cuales representan acciones con capacidad de influir positivamente sobre el comportamiento del sistema. En esta investigación,

los escenarios están orientados a partir de los drivers identificados durante el proceso participativo, entre ellos la administración del agua de consumo humano por la Junta Administradora de Agua y Saneamiento, EPMAPS y FONAG, así como los programas permanentes de educación y conciencia ambiental con participación comunitaria. la activación de estos conceptos permitirá analizar su influencia sobre los demás factores del mapa cognitivo y estimar su potencial para fortalecer la implementación del sistema comunitario de la calidad del agua (Giabbanelli & Nápoles, 2024; Shahvi et al., 2021).

Para evitar que los valores del modelo crezcan indefinidamente durante el proceso iterativo, se empleó una función sigmoidea (Ec. 7) como mecanismo de normalización. Esta función restringe los resultados a un intervalo comprendido entre 0 y 1, garantizando la estabilidad matemática del modelo y favoreciendo la convergencia hacia un estado estacionario. Dicho estado representa el comportamiento esperado del sistema una vez que las relaciones entre los conceptos alcanzan un equilibrio constituyéndose en la base para comparar diferentes escenarios de análisis (Fonseca et al., 2022; Shahvi et al., 2021).

(Ec. 7)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

10.6 Técnicas

10.6.1 Muestreo no probabilístico de tipo intencional

Para el desarrollo de la investigación se empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional debido a que la selección de los participantes respondió a criterios previamente establecidos y relacionados con el objetivo del estudio, esta técnica permite incluir a personas que poseen conocimientos, experiencias o participación directa en el fenómeno investigado favoreciendo la obtención de información pertinente para comprender sistemas socioambientales complejos (Ahmad & Wilkins, 2025; Campbell et al., 2020).

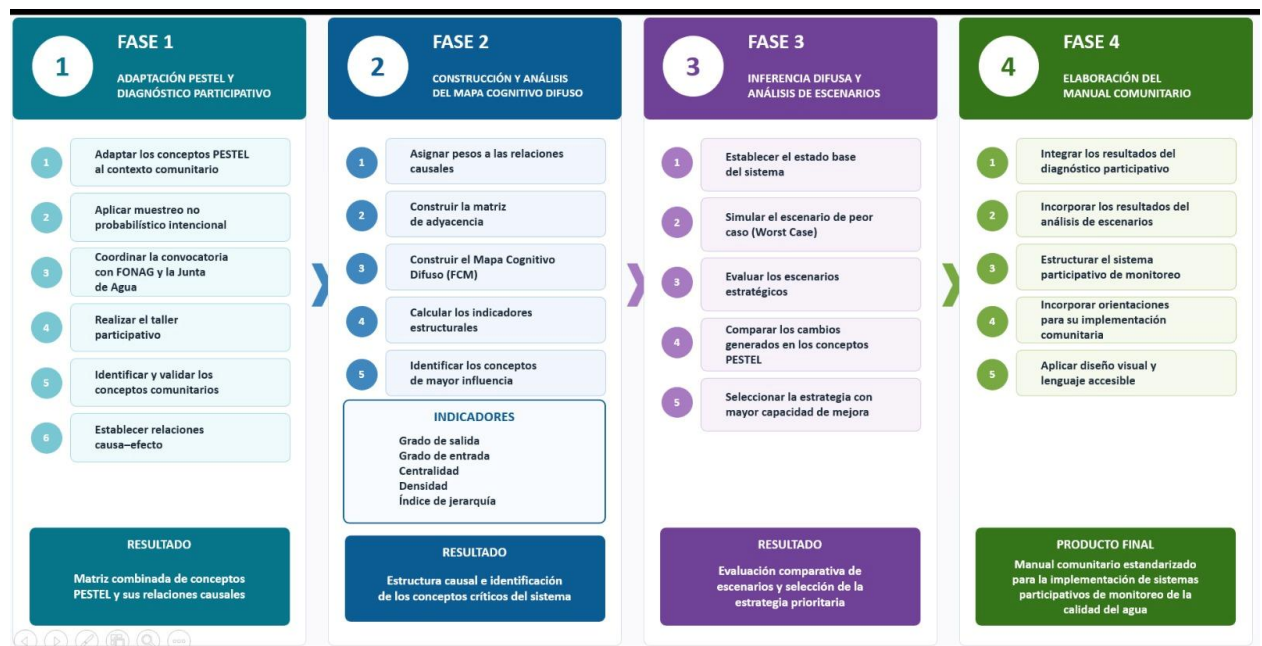
En la presente investigación la convocatoria fue coordinada entre el Fondo Para la Protección del Agua (FONAG) y la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma inicialmente, el equipo técnico del FONAG socializó los objetivos del estudio con el presidente de la junta de agua, quien posteriormente convocó a una asamblea comunitaria en la que los usuarios aceptaron participar de manera libre y voluntaria en el desarrollo de los talleres participativos, este procedimiento permitió contar con la participación de actores vinculados con la gestión del recurso hídrico, favoreciendo la obtención de

información contextualizada para la construcción del modelo participativo (Campbell et al., 2020; Sarmiento et al., 2024).

La aplicación del muestreo intencional facilitó la identificación de participantes con conocimientos sobre el abastecimiento, administración y conservación del agua para consumo humano, aspectos fundamentales para la identificación de los factores políticos, económicos sociales tecnológicos ecológicos y legales y comunitaria incorporados posteriormente en los mapas cognitivo difusos. En investigaciones de ciencia ciudadana y gestión participativa, este tipo de selección fortalece la calidad de la información obtenida al integrar la experiencia local en los procesos de análisis y toma de decisiones (Fraisl et al., 2022; Shahvi et al., 2021; Tengö et al., 2021).

Figura 2:

Metodología



10.7 Fases de investigación

10.7.1 Adaptación de los factores PESTEL

La primera fase de la investigación consistió en la adaptación de los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales (PESTEL) previamente identificados en estudios relacionados con la gobernanza hídrica y la disponibilidad de agua segura. Estos factores fueron utilizados como base conceptual para el desarrollo de los talleres participativos, permitiendo contextualizar el análisis a las condiciones específicas de la comunidad San

Francisco de Cruz Loma. La adaptación de conceptos constituye una estrategia metodológica útil para transferir marcos analíticos previamente validados hacia nuevos contextos territoriales, manteniendo la consistencia del análisis sin perder la particularidad local (Gansauer et al., 2023).

Posteriormente, los factores generales fueron revisados y organizados para facilitar su comprensión durante el proceso participativo. Esta adaptación permitió transformar conceptos técnicos en elementos comprensibles para los miembros de la Junta Administradora de Agua Potable, favoreciendo la discusión colectiva y la identificación de relaciones entre los distintos componentes que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano. La utilización de categorías PESTEL facilitó además una visión integral del sistema hídrico al considerar simultáneamente aspectos institucionales, sociales, económicos, ambientales y tecnológicos (Roldán-Reascos et al., 2024).

Como resultado de esta fase se obtuvo una matriz inicial de factores generales que sirvió como insumo para el taller participativo comunitario. Dichos factores fueron posteriormente contrastados con la experiencia y conocimientos de los participantes, permitiendo incorporar nuevos conceptos derivados de la realidad local y fortalecer la representación del sistema socio ecológico asociado a la gestión del agua en la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Gansauer et al., 2023).

10.7.2 Taller participativo en la comunidad

Con el propósito de incorporar el conocimiento local en la identificación de los factores que influyen en la disponibilidad de agua para consumo humano, se desarrolló un taller participativo en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. La convocatoria fue coordinada entre el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) y la Junta Administradora de Agua Potable, permitiendo la participación voluntaria de los miembros de la comunidad interesados en aportar al proceso de investigación. Este tipo de espacios favorece la construcción colectiva del conocimiento y fortalece la integración entre la experiencia comunitaria y los procesos de análisis técnico asociados a la gestión del recurso hídrico (Andrade, 2021).

Durante el taller se presentaron los factores PESTEL previamente adaptados para el estudio, los cuales fueron explicados y discutidos con los participantes para facilitar su comprensión. Posteriormente, los asistentes analizaron cada concepto desde su experiencia cotidiana y aportaron nuevos factores relacionados con la realidad local de la comunidad. Los conceptos incorporados por los participantes fueron diferenciados de los factores generales

mediante una codificación específica, permitiendo identificar claramente los aportes generados desde el conocimiento comunitario. Este procedimiento facilitó la construcción de una visión compartida sobre los principales desafíos asociados a la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano (Carroll et al., 2021).

El taller se desarrolló bajo una metodología participativa orientada a promover el diálogo, el consenso y la reflexión colectiva. A partir de las discusiones grupales se identificaron relaciones de causa y efecto entre los distintos factores, información que posteriormente sirvió como base para la construcción del Mapa Cognitivo Difuso. Este enfoque permitió representar de manera estructurada las percepciones de la comunidad sobre el funcionamiento del sistema hídrico local y las interacciones existentes entre sus componentes sociales, ambientales, institucionales y tecnológicos (Fritz et al., 2022).

La comunidad San Francisco de Cruz Loma está conformada principalmente por usuarios vinculados a la Junta Administradora de Agua Potable, quienes poseen un amplio conocimiento empírico sobre el abastecimiento, tratamiento y distribución del agua en el territorio. Si bien los participantes presentan diferentes niveles de formación académica, su experiencia directa en la gestión comunitaria del recurso hídrico constituyó una fuente fundamental de información para el desarrollo de la investigación. Estas características justifican la utilización de herramientas participativas de fácil comprensión y fomentan la elaboración de materiales didácticos accesibles para la implementación futura del sistema de monitoreo comunitario (Brück et al., 2023).

10.7.3 Elaboración de los Mapas Cognitivos Difusos

Una vez adaptados los 36 conceptos al contexto de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, durante el mismo taller participativo se desarrolló la construcción del Mapa Cognitivo Difuso (MCD). En esta actividad, el equipo investigador explicó previamente el significado de cada uno de los conceptos y de las estrategias consideradas dentro de la investigación, con el propósito de que todos los participantes comprendieran el procedimiento antes de iniciar el ejercicio. Posteriormente, los 36 conceptos fueron organizados en un papelote en un orden aleatorio para evitar sesgos durante el análisis, permitiendo que los miembros de la Junta Administradora de Agua Potable identificaran las relaciones de causa y efecto existentes entre ellos a partir de su experiencia y conocimiento del territorio.

Para representar dichas relaciones se utilizaron flechas direccionales que indicaban el sentido de la influencia entre conceptos, mientras que la intensidad de cada relación fue

expresada mediante stickers de colores neón. Las relaciones identificadas fueron valoradas utilizando una escala difusa de siete niveles, comprendida entre -1 (influencia fuertemente negativa) y $+1$ (influencia fuertemente positiva), incluyendo valores intermedios para representar diferentes grados de influencia entre los conceptos. Posteriormente, la información obtenida durante el taller fue organizada en una matriz de adyacencia de 36×36 , la cual constituyó la base para el análisis del modelo.

Las valoraciones obtenidas fueron normalizadas mediante una regla de tres para convertir la escala utilizada durante el taller a valores comprendidos entre -1 y $+1$, formato requerido para el procesamiento de la información en el software de análisis. Finalmente, la matriz fue incorporada al software Mental Modeler, herramienta desarrollada para construir y analizar Mapas Cognitivos Difusos, permitiendo calcular indicadores estructurales del modelo y ejecutar simulaciones de escenarios para evaluar el comportamiento del sistema frente a diferentes condiciones de intervención. Este tipo de herramientas facilita la representación de sistemas socioecológicos complejos y apoya la toma de decisiones participativa bajo condiciones de incertidumbre (Fonseca et al., 2022)

10.7.4 Evaluación de los mapas cognitivos difusos

La evaluación del Mapa Cognitivo Difuso (MCD) se realizó mediante el análisis de los índices estructurales obtenidos a partir de la teoría de grafos y de los resultados de la inferencia difusa. Este procedimiento permitió identificar los conceptos con mayor capacidad de influencia dentro del sistema, los factores con mayor dependencia y el nivel de conectividad existente entre los componentes que intervienen en la disponibilidad de agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Asimismo, se evaluó el comportamiento de los drivers identificados durante el proceso participativo y su contribución potencial a la implementación de las estrategias propuestas para fortalecer el sistema comunitario de monitoreo de la calidad del agua (Danielsen et al., 2022)

10.7.5 Simulación de escenarios mediante mapas cognitivos difusos

Una vez evaluada la estructura del mapa cognitivo difuso, se procedió a la simulación de escenarios con el propósito de analizar el comportamiento del sistema frente a diferentes condiciones de intervención. Para ello, se empleó la herramienta Mental Modeler, la cual permitió ejecutar procesos de inferencia difusa a partir de la matriz de la relación construida durante los talleres participativos.

Como escenario inicial se consideró el estado base del sistema, el cual sirvió como referencia para comparar los cambios generados durante las simulaciones posteriores. A partir de este escenario se desarrolló un escenario crítico (Worst Case Scenario), activando el concepto con mayor centralidad identificado durante el análisis estructural. Posteriormente, se simularon tres escenarios adicionales mediante la activación individual de las estrategias propuestas en la investigación, con el propósito de evaluar su efecto sobre el comportamiento del sistema y analizar los cambios producidos en los diferentes conceptos.

La comparación entre escenarios permitió identificar las variaciones generadas en cada uno de los conceptos del modelo, facilitando la evaluación del alcance potencial de las estrategias planteadas para fortalecer el monitoreo comunitario de la calidad del agua y apoyar la toma de decisiones dentro de la comunidad. La simulación de escenarios mediante Mapas Cognitivos Difusos constituye una herramienta ampliamente utilizada para explorar diferentes alternativas de intervención y comprender el comportamiento de sistemas complejos bajo condiciones de incertidumbre (Fonseca et al., 2022; Gray et al., 2013).

10.7.6 Diseño y elaboración del manual comunitario de monitoreo de la calidad del agua

Como uno de los productos de transferencia del conocimiento derivados de la investigación se diseñó y elaboró un manual comunitario de monitoreo de la calidad del agua, concebido como una herramienta de apoyo para fortalecer las capacidades de las comunidades en la implementación de sistemas de monitoreo basados en los principios de la Ciencia Ciudadana y la Ciencia Abierta. Su elaboración tuvo como propósito facilitar la apropiación del conocimiento mediante un lenguaje accesible, recursos gráficos, actividades participativas y ejemplos contextualizados, permitiendo que los usuarios comprendan de manera progresiva el funcionamiento del sistema de monitoreo y la importancia de la vigilancia comunitaria del recurso hídrico (Dominguez-Rendón et al., 2024; Fraisl et al., 2022).

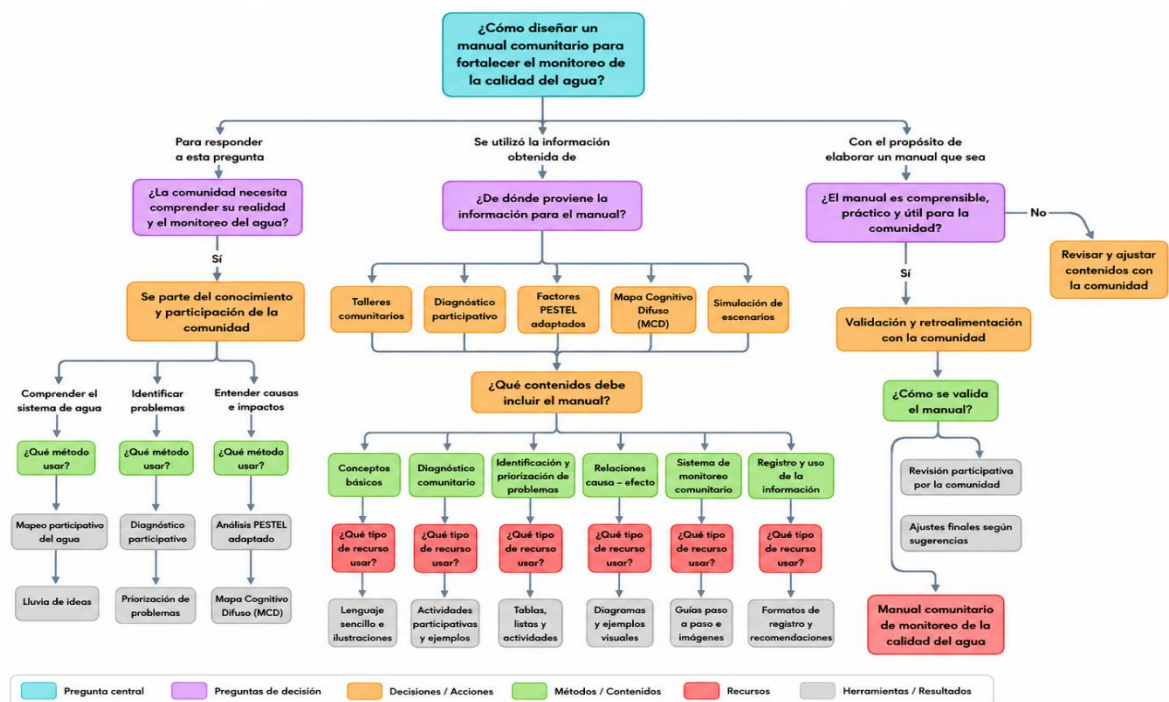
El contenido del manual fue construido a partir de la información obtenida durante las diferentes etapas de la investigación. Para su elaboración se consideraron los resultados del diagnóstico participativo, la adaptación de los factores PESTEL, la construcción y evaluación del Mapa Cognitivo Difuso, así como el análisis de los escenarios obtenidos mediante inferencia difusa. De esta manera, el manual responde a las condiciones ambientales, sociales y organizativas identificadas en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, constituyéndose en un material elaborado con un enfoque estandarizado y flexible para facilitar su adaptación a otras comunidades rurales. (Robinson et al., 2024; Tengö et al., 2021).

La estructura del manual fue organizada siguiendo una secuencia lógica de aprendizaje, iniciando con la introducción a los conceptos básicos de Ciencia Ciudadana, Ciencia Abierta y monitoreo de la calidad del agua. Posteriormente, incorpora actividades orientadas al diagnóstico comunitario, la elaboración del mapa del agua, la identificación y priorización de problemas, el análisis de las relaciones causa–efecto y, finalmente, la implementación del sistema comunitario de monitoreo, integrando ejercicios prácticos y formatos de registro que facilitan la participación activa de los usuarios durante todo el proceso. Esta organización responde a los principios del aprendizaje participativo, promoviendo que la comunidad construya el conocimiento a partir de su propia experiencia y fortalezca sus capacidades para la gestión del recurso hídrico (Ballard et al., 2024; Starkey et al., 2024).

Finalmente, el manual incorpora ilustraciones, diagramas, actividades didácticas y herramientas de registro diseñadas para facilitar su aplicación en futuras jornadas de capacitación y monitoreo. La integración de recursos visuales y actividades participativas favorece la apropiación del conocimiento, fortalece el aprendizaje significativo y contribuye a la sostenibilidad de los procesos de monitoreo comunitario, promoviendo una mayor participación de la población en la protección de la calidad del agua (Ballard et al., 2024; Robinson et al., 2024).

Figura 3:

Árbol de decisiones para el diseño del manual comunitario de la calidad de agua



El árbol de decisiones permitió organizar de manera secuencial el proceso metodológico seguido para el diseño del manual comunitario de monitoreo de la calidad de agua, integrando la información obtenida durante las diferentes etapas de la investigación, su construcción facilitó la identificación de las actividades y herramientas necesarias para definir el contenido del manual, considerando los resultados del diagnóstico participativo, la adaptación de los factores PESTEL, la elaboración y evaluación del Mapa cognitivo Difuso y la simulación de escenarios. De esta manera, el árbol permitió establecer una ruta lógica para estructurar un material didáctico orientado a las necesidades de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, promoviendo la apropiación del conocimiento y fortaleciendo la participación comunitaria en el monitoreo de la calidad del agua, la utilización de herramientas de planificación y organización metodológica contribuye a integrar la información obtenida durante la investigación y facilita el diseño de materiales educativos adaptados al contexto local, fortaleciendo los procesos de ciencia ciudadana y monitoreo comunitario.(Conrad & Hilchey, 2011; Fonseca et al., 2022)

10.8 Diseño estadístico

El diseño estadístico de la presente investigación se estructuró como un complemento al análisis realizado mediante Mapas Cognitivos Difusos (MCD), permitiendo fortalecer la interpretación de las relaciones identificadas durante el proceso participativo. Este diseño se fundamentó en el análisis de los índices derivados de la teoría de grafos y en la caracterización de la participación comunitaria, con el propósito de proporcionar una evaluación estructurada del sistema asociado a la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

Los procedimientos estadísticos aplicados no sustituyen la metodología de los Mapas Cognitivos Difusos, sino que complementan su capacidad analítica mediante la cuantificación de la estructura de las relaciones causales identificadas por los participantes. A través de indicadores como centralidad, densidad e índice de jerarquía, es posible describir la importancia relativa de los factores evaluados y comprender la organización interna del sistema representado en el mapa cognitivo. Este enfoque resulta especialmente útil en investigaciones participativas donde se integran conocimientos locales y percepciones comunitarias para analizar sistemas socio ecológicos complejos (Giabbanelli & Nápoles, 2024).

Asimismo, la utilización de herramientas estadísticas descriptivas permite resumir y comparar los resultados obtenidos durante la construcción del MCD, facilitando la

identificación de patrones, relaciones dominantes y posibles puntos de intervención para fortalecer la gestión comunitaria del agua. De esta manera, el diseño estadístico contribuye a dotar de mayor rigor analítico a la investigación y a respaldar la posterior evaluación de escenarios mediante inferencia difusa (Concepcion et al., 2021; Kottas et al., 2007).

10.8.1 Estadística descriptiva de los índices de la teoría de grafos

Con el propósito de complementar la evaluación estructural del Mapa Cognitivo Difuso, se realizó un análisis descriptivo de los principales índices derivados de la teoría de grafos, incluyendo el grado de entrada (id), el grado de salida (od) y la centralidad (ci) de los conceptos que conforman el sistema. Este análisis permitió identificar los factores con mayor influencia, dependencia e importancia dentro de la red causal construida participativamente. Asimismo, se calcularon medidas descriptivas que faciliten la interpretación de la estructura general del mapa y contribuyan al análisis de los resultados obtenidos mediante inferencia difusa, fortaleciendo la comprensión del comportamiento del sistema asociado a la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Fonseca et al., 2022; Laureano-Cruces et al., 2004).

Para caracterizar la estructura del mapa cognitivo Difuso y fundamentar la identificación de los conceptos con mayor relevancia dentro del sistema, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión sobre los tres índices derivados de la teoría de grafos: centralidad (ci), grado de salida (od) y grado de entrada (id), considerando los 36 conceptos que conformaron el modelo ($N = 36$). Los estadísticos calculados fueron la media aritmética ($\bar{x}$; ci = 45,06; od = 22,53; id = 22,53), la desviación estándar poblacional (σ ; ci = 7,55; od = 3,40; id = 4,87), los valores mínimos (ci = 21,93; od = 10,32; id = 11,61) y los valores máximos (ci = 56,73; od = 28,04; id = 28,69). Asimismo, los rangos obtenidos fueron de 36,81 para la centralidad, 18,05 para el grado de salida y 19,08 para el grado de entrada. Estas medidas permitieron analizar la distribución de la influencia y dependencia entre los conceptos e identificar la existencia de nodos con una participación estructural diferenciada dentro de la red causal construida por la comunidad. Una mayor dispersión de los valores de centralidad evidencia diferencias en la importancia estructural de los conceptos, mientras que valores más homogéneos reflejan una distribución más equilibrada de las relaciones dentro del modelo (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

10.8.2 Justificación de la selección de participantes

La selección de los participantes se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, considerando la necesidad de incorporar actores con experiencia, responsabilidad y conocimiento directo sobre la gestión del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Este tipo de muestreo es apropiado en investigaciones participativas desarrolladas bajo los enfoques de Ciencia Ciudadana y Ciencia Abierta, donde el interés principal radica en la calidad, pertinencia y profundidad de la información aportada por los participantes, más que en la representatividad estadística de la población (Campbell et al., 2020; Palinkas et al., 2015).

Los participantes fueron convocados mediante un proceso coordinado entre el Fondo para la Protección del Agua (FONAG) y la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Inicialmente, el equipo técnico del FONAG socializó los objetivos de la investigación con el presidente de la Junta Administradora de Agua Potable, quien posteriormente convocó a los usuarios y miembros de la organización comunitaria para participar en los talleres desarrollados durante el estudio. La participación fue voluntaria y estuvo conformada por actores directamente vinculados con la administración, operación, conservación y uso del recurso hídrico, garantizando la incorporación del conocimiento local durante todas las etapas de la investigación. Asimismo, se respetaron los principios éticos de participación voluntaria, colaboración e inclusión comunitaria (Campbell et al., 2020).

La participación de los actores comunitarios permitió recopilar conocimientos locales relacionados con los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad. Además, favoreció la identificación y validación de los factores PESTEL, la construcción participativa del Mapa Cognitivo Difuso, el establecimiento de las relaciones causa–efecto entre los conceptos y la posterior simulación de escenarios mediante inferencia difusa. De esta manera, el conocimiento aportado por la comunidad constituyó la base para el análisis del sistema y para el diseño del manual comunitario de monitoreo de la calidad del agua, fortaleciendo la integración entre el conocimiento científico y la experiencia local (Andrade, 2021; Etikan, 2016).

10.8.3 Justificación del tamaño muestral

La investigación se desarrolló mediante una serie de talleres participativos en los que la asistencia de los participantes varió entre cada sesión, debido a la disponibilidad de los

miembros de la comunidad y de la Junta Administradora de Agua Potable. Por esta razón, el tamaño muestral no se definió a partir de un número fijo de participantes, sino mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, priorizando la participación de actores con conocimiento directo sobre la gestión del sistema de agua potable y la conservación del recurso hídrico (Hennink & Kaiser, 2022).

En investigaciones basadas en Mapas Cognitivos Difusos, Ciencia Ciudadana y procesos participativos, el criterio para definir el tamaño de la muestra no se fundamenta en la representatividad estadística, sino en la incorporación de participantes capaces de aportar conocimientos relevantes y en la saturación de perspectivas, entendida como el momento en que las nuevas sesiones dejan de incorporar conceptos o relaciones causales significativamente diferentes dentro del modelo (Guest et al., 2020; Sarmiento et al., 2024).

Durante el desarrollo de la investigación participaron de manera voluntaria miembros de la Junta Administradora de Agua Potable, operadores del sistema y usuarios de la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Aunque el número de asistentes varió entre los diferentes talleres, la continuidad del proceso participativo permitió recopilar información suficiente para la identificación de los factores PESTEL, la construcción del Mapa Cognitivo Difuso, la simulación de escenarios y el diseño del manual comunitario de monitoreo de la calidad del agua. En consecuencia, la suficiencia del tamaño muestral estuvo determinada por la calidad y consistencia de la información obtenida durante el proceso participativo, más que por el número de participantes presentes en cada sesión (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.1 Identificación de los conceptos PESTEL generales utilizados como base para la investigación.

Los factores PESTEL utilizados en la investigación fueron adaptados de una metodología previamente validada para el análisis de disponibilidad de agua segura mediante mapas cognitivos difusos. Dichos factores constituyeron la base conceptual utilizada durante el taller participativo desarrollado en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. La clasificación de conceptos se presenta en la *tabla 3*, la cual fue adaptada de la propuesta desarrollada por Alvarado Peralta y De la Cruz Minda (2026).

Tabla 3.*Factores PESTEL generales utilizados en la investigación*

DIMENSIÓN	NÚMERO CONCEPTOS	DE	CÓDIGOS
POLÍTICA	4		P1 -P4
ECONÓMICA	5		Ec1-Ec5
SOCIAL	5		S1-S5
TECNOLÓGICO	4		T1-T4
ECOLÓGICO	5		E11-E15
LEGAL	3		L1-L3
TOTAL	26		P1-L3

Fuente: Adaptado de Alvarado Peralta, J.P., Y De La Cruz Minda, K. S. (2026), Evaluación de la Viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de la calidad de agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta para la comunidad Ponce Quilotoa, Provincia de Cotopaxi, Universidad Técnica de Cotopaxi.

11.2 Adaptación de conceptos a la comunidad.

Tabla 4.*Conceptos adaptados a la comunidad*

POLÍTICO	
Conceptos	ID
Información limitada sobre la calidad del agua	PC3
ECONÓMICO	
Conceptos	ID
Adecuaciones de infraestructura del agua	EcC1
Limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema	EcC2

Recursos comunitarios insuficientes	EcC3
-------------------------------------	------

Costos elevados para el monitoreo	EcC5
-----------------------------------	------

SOCIAL

Conceptos	ID
------------------	-----------

Prácticas inadecuadas en el uso del agua	SC2
--	-----

Interrupciones del servicio por eventos hidrometeorológicos y obstrucción del sistema	SC4
---	-----

TECNOLOGICO

Conceptos	ID
------------------	-----------

Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	TC2
---	-----

Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada	TC3
---	-----

Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles	TC4
---	-----

ECOLÓGICO

Conceptos	ID
------------------	-----------

Impacto en la disponibilidad de agua en época seca	EIC2
--	------

Presencia de turbidez por lluvias intensas y derrumbes	EIC3
--	------

Contaminación hídrica por turismo y perros ferales	EIC4
--	------

Sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua	EIC5
---	------

LEGAL

Conceptos	ID
Cumplimiento normativo	LC1
Control insuficiente de la contaminación hídrica	LC2
Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud	LC3
Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	LC4

Nota: Los conceptos presentados fueron identificados mediante el taller participativo desarrollado con miembros de la comunidad San Francisco de Cruz Loma.

11.3 Validación participativa de los conceptos con la comunidad

Durante los talleres participativos desarrollados con los miembros de la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, se identificaron y validaron 36 conceptos relacionados con los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano. Para ello, se utilizó la metodología de Mapas Cognitivos Difusos, empleando materiales didácticos como papelotes, tarjetas y stickers de colores, que facilitaron la identificación de las relaciones de causa–efecto entre los conceptos a partir del conocimiento y la experiencia de los participantes. Este proceso permitió representar de manera participativa la realidad de la comunidad y establecer la base conceptual utilizada posteriormente para la construcción del modelo y la simulación de escenarios.

11.4 Identificación de los conceptos PESTEL que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma

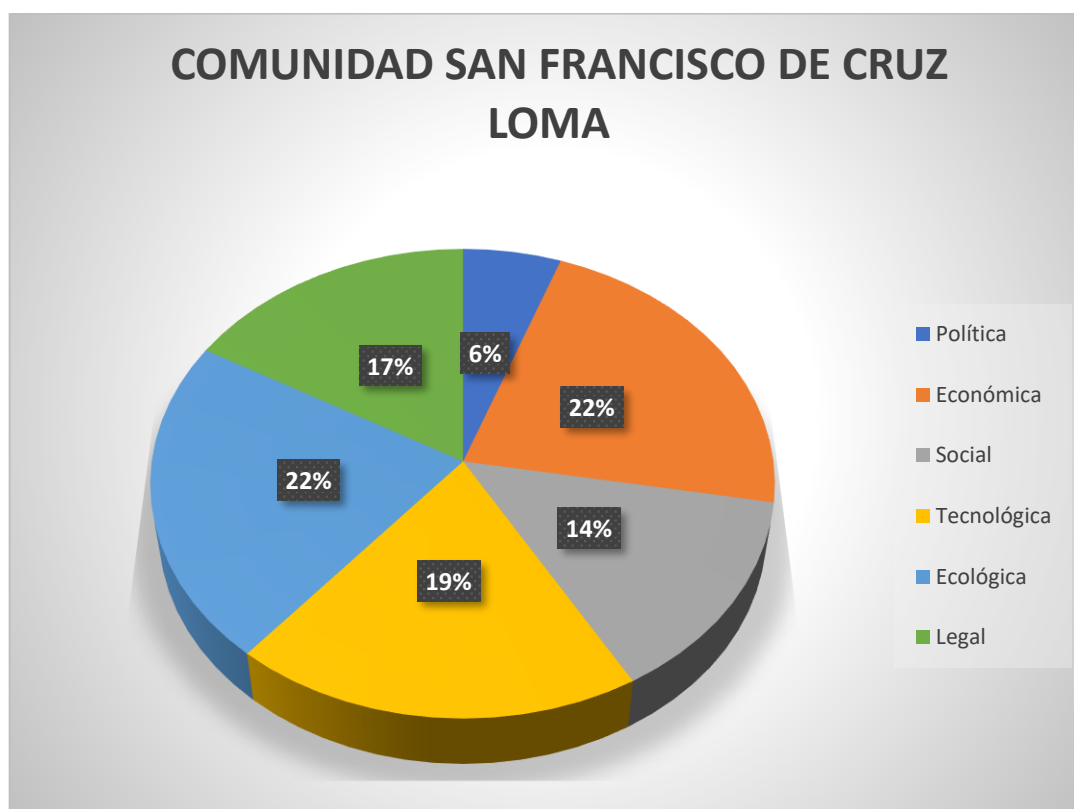
Durante los talleres participativos desarrollados con los miembros de la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma, se presentaron los 26 conceptos previamente identificados y utilizados como base para su adaptación al contexto de la investigación. A partir de la experiencia y el conocimiento de los participantes, estos conceptos fueron analizados, validados y complementados mediante la incorporación de nuevos elementos considerados relevantes para representar la realidad local. Como resultado del proceso participativo se obtuvo un modelo conceptual definitivo conformado por 36 conceptos, los cuales constituyeron la base para la construcción del Mapa Cognitivo Difuso

(ver Tabla 4). De los 26 conceptos utilizados inicialmente como base para la investigación, la comunidad validó 18 y complementó el modelo con nuevos conceptos surgidos durante los talleres participativos, hasta conformar un total de 36 conceptos.

Los 36 conceptos fueron organizados de acuerdo con las seis dimensiones del análisis PESTEL, obteniéndose 2 conceptos políticos (5,56 %), 8 económicos (22,22 %), 5 sociales (13,89 %), 7 tecnológicos (19,44 %), 8 ecológicos (22,22 %) y 6 legales (16,67 %). La mayor proporción de conceptos se concentró en las dimensiones económica y ecológica, representando cada una el 22,22 % del total de conceptos identificados, lo que refleja una mayor representación de factores económicos y ecológicos dentro de la problemática percibida por la comunidad respecto a la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano. Por su parte, la dimensión política presentó la menor cantidad de conceptos (5,56 %), reflejando una menor cantidad de factores identificados por la comunidad dentro de esta dimensión durante el proceso participativo dentro de la problemática analizada (Figura 4).

Figura 4:

Gráfico de pastel sobre el porcentaje de factores PESTEL



Nota: Distribución porcentual de factores PESTEL.

11.5 Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad

Con base en los resultados obtenidos durante el diagnóstico participativo y el análisis mediante Mapas Cognitivos Difusos (FCM), se diseñó un sistema de monitoreo participativo de la calidad del agua empleando tecnologías de código abierto, adaptado a las condiciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales identificadas en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. La información generada durante el proceso permitió reconocer los factores con mayor influencia dentro del sistema, las relaciones causa–efecto entre los conceptos y los principales puntos de intervención para fortalecer la gestión comunitaria del recurso hídrico.

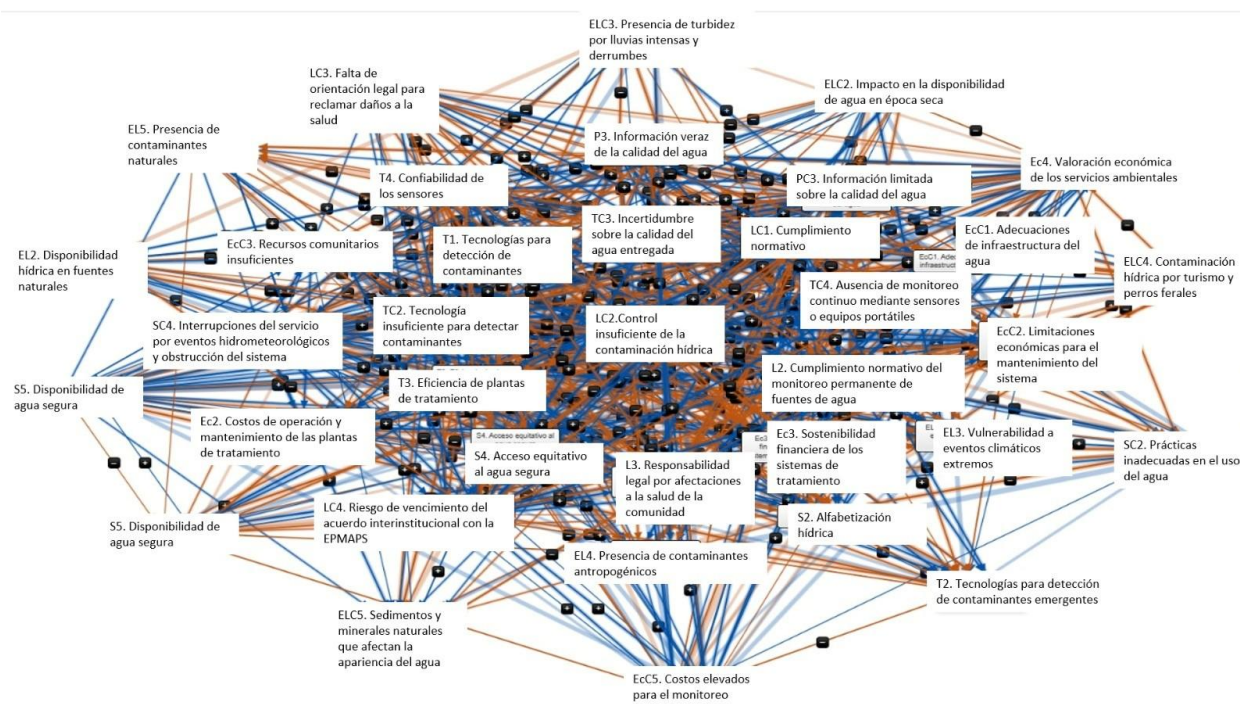
Los resultados de los FCM constituyeron un insumo fundamental para la definición de la estructura y funcionamiento del sistema de monitoreo, ya que permitieron evaluar el comportamiento del sistema mediante la simulación de escenarios y priorizar las estrategias con mayor potencial de intervención. En consecuencia, el diseño propuesto no se fundamentó únicamente en criterios técnicos, sino también en el conocimiento local generado por la comunidad, favoreciendo la implementación de un sistema de monitoreo acorde con la realidad y necesidades del territorio.

11.5.1 Teoría de grafos

El análisis estructural del Mapa Cognitivo Difuso se realizó mediante la aplicación de los principales índices derivados de la teoría de grafos, utilizando la matriz de relaciones construida durante los talleres participativos desarrollados con la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Este procedimiento permitió caracterizar la estructura de la red causal conformada por los 36 conceptos identificados durante la investigación y evaluar el comportamiento de cada uno de ellos dentro del sistema.

Figura 5:

Mapa Cognitivo Difuso



A partir del análisis se obtuvieron los valores correspondientes al grado de entrada (id), grado de salida (od) y centralidad (ci) para cada uno de los conceptos que integran el modelo. Estos indicadores permitieron identificar los conceptos con mayor capacidad de influencia y dependencia dentro de la red, así como reconocer aquellos que desempeñan un papel estratégico en el funcionamiento del sistema. Los resultados obtenidos constituyeron la base para la identificación del principal driver del modelo y para el posterior desarrollo de los escenarios de simulación empleados en la investigación.

Tabla 5.

Conceptos identificados

POLÍTICO				
Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
P3. Información veraz de la calidad del agua	27,41	19,35	46,76	Ordinario

PC3. Información limitada sobre la calidad del agua	27,07	19,36	46,43	Ordinario
---	-------	-------	-------	-----------

ECONÓMICO

Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	21,04	20,69	41,73	Ordinario
Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	26,06	26,05	52,11	Ordinario
Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	18,34	21,37	39,71	Ordinario
Ec5. Costos de tecnologías de medición	14,31	18,31	32,62	Ordinario
EcC1. Adecuaciones de infraestructura del agua	23,74	22,38	46,12	Ordinario
EcC2. Limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema	22,69	23,03	45,72	Ordinario
EcC3. Recursos comunitarios insuficientes	20,34	21,36	41,70	Ordinario
EcC5. Costos elevados para el monitoreo	18,36	18,99	37,35	Ordinario

SOCIAL

Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
S2. Alfabetización hídrica	21,70	21,66	43,36	Ordinario
S4. Acceso equitativo al agua segura	29,70	22,04	51,74	Ordinario
S5. Disponibilidad de agua segura	21,37	13,33	34,70	Ordinario
SC2. Prácticas inadecuadas en el uso del agua	18,66	19,36	38,02	Ordinario

SC4. Interrupciones del servicio por eventos hidrometeorológicos y obstrucción del sistema	20,35	21,36	41,71	Ordinario
--	-------	-------	-------	-----------

TECNOLOGICO

Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	24,40	24,70	49,10	Ordinario
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	18,36	19,35	37,71	Ordinario
T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	27,03	24,04	51,07	Ordinario
T4. Confiabilidad de los sensores	19,72	21,68	41,40	Ordinario
TC2.Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	25,37	25,02	50,39	Ordinario
TC3.Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada	30,69	25,71	56,40	Ordinario
TC4.Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles	25,04	27,38	52,42	Ordinario

ECOLOGICO

Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
El2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	15,62	16,33	31,95	Ordinario
El3.Vulnerabilidad a eventos climáticos extremo	17,68	26,04	43,72	Ordinario
El4.Presencia de contaminantes antropogénicos	20,02	23,04	43,06	Ordinario
El5. Presencia de contaminantes naturales	11,94	19,69	31,63	Ordinario

ElC2.Impacto en la disponibilidad de agua en época seca	17,33	23,36	40,69	Ordinario
ElC3.Presencia de turbidez por lluvias intensas y derrumbes	16,34	24,69	41,03	Ordinario
ElC4.Contaminación hídrica por turismo y perros ferales	17,69	20,37	38,06	Ordinario
ElC5.Sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua	15,65	20,36	36,01	Ordinario

LEGAL

Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	28,05	24,35	52,40	Ordinario
L3. Responsabilidad Legal por afectaciones a la salud de la comunidad	28,72	23,35	52,07	Ordinario
LC1.Cumplimiento normativo	29,05	25,35	54,40	Ordinario
LC2.Control insuficiente de la contaminación hídrica	28,69	28,04	56,73	Ordinario
LC3.Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud	10,28	8,33	18,61	Ordinario
LC4. Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	21,73	20,72	42,45	Ordinario

Los resultados obtenidos evidencian que LC2 “Control insuficiente de la contaminación hídrica” presentó el valor más elevado de centralidad (ci = 56,73) y de grado de salida (od = 28,04), además de registrar un elevado grado de entrada (id = 28,69), estos valores posicionan a LC2 como el concepto de mayor relevancia estructural dentro del Mapa Cognitivo Difuso,

eficiencia tecnológica y las responsabilidades institucionales asociadas a la gestión del recurso hídrico.

En contraste, LC3 “Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud” presentó los valores más bajos de centralidad ($ci = 18,61$), grado de salida ($od = 8,33$) y grado de entrada ($id = 10,28$). Esto indica que, aunque el concepto forma parte del sistema, mantiene un menor nivel de interacción con el resto de variables y una participación estructural inferior dentro de la red causal. La diferencia observada entre los valores máximos y mínimos confirma que los conceptos no poseen la misma importancia dentro del modelo y que un grupo reducido concentra la mayor capacidad de influencia, dependencia e interacción estructural (Fonseca et al., 2022; Schuerkamp & Giabbanelli, 2024)

Los indicadores estructurales obtenidos mediante la teoría de grafos permitieron caracterizar la configuración general del Mapa Cognitivo Difuso construido para la comunidad San Francisco de Cruz Loma, el sistema quedó conformado por 36 conceptos interrelacionados mediante 1176 conexiones, lo que evidencia un elevado nivel de interacción entre las variables consideradas durante el proceso participativo. Asimismo, el modelo presentó una densidad de 0,93, indicando una red altamente conectada, en la que la mayoría de los conceptos mantienen relaciones directas e indirectas entre sí. (Tabla 6). (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024)

De igual manera, el análisis estructural identificó que la totalidad de los conceptos corresponden a conceptos ordinarios ($n = 36$), el modelo presentó un promedio de 32,67 conexiones por concepto, lo que refleja una elevada complejidad estructural y evidencia que los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales interactúan de manera conjunta en la dinámica de la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad.

Tabla 6.

Indicadores

Indicador	Comunidad San Francisco de Cruz Loma
Número de conceptos (N)	36
Número de conexiones (C)	1176
Numero de conceptos receptores	0
Numero de conceptos ordinarios	36
Numero de conceptos impulsores	3
Densidad (D)	0.93

Promedio de conexiones por concepto	32.67
Centralidad (ci)	56,73
Grado de entrada / Indegree (id)	28,69
Grado de salida / Outdegree (od)	28,04
Índice de jerarquía (h)	0,13

11.5.2 Análisis del Mapa Cognitivo Difuso

El índice de jerarquía presentó un valor de 0,13, lo que indica una estructura poco jerárquica, en la que la influencia se distribuye entre diversos conceptos del sistema y no se encuentra exclusivamente en unos pocos nodos.

El análisis estructural del Mapa Cognitivo Difuso permitió identificar que LC2 “Control insuficiente de la contaminación hídrica” constituye el concepto con mayor relevancia dentro de la red causal construida participativamente, al registrar el valor más alto de centralidad (ci = 56,73) y de grado de salida (od = 28,04). Este resultado evidencia que dicho concepto mantiene el mayor nivel de interacción con los demás componentes del sistema y desempeña un papel fundamental en la dinámica de los factores que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Figura 6). De acuerdo con Schuerkamp & Giabbanelli (2024), los conceptos con mayor centralidad representan los nodos estratégicos dentro de un Mapa Cognitivo Difuso, ya que su posición estructural les permite influir significativamente en el comportamiento general del sistema.

Asimismo, el concepto LC2 “Control insuficiente de la contaminación hídrica” presentó un grado de entrada elevado (id = 28,69), lo que indica que no solo ejerce influencia sobre un amplio número de variables, sino que también recibe los efectos generados por múltiples conceptos del modelo. En contraste, TC3 “Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada” registró el mayor grado de entrada (id = 30,69), evidenciando que constituye el concepto con mayor dependencia estructural dentro de la red causal, estos resultados indican que la problemática asociada al control de la contaminación hídrica y la incertidumbre sobre la calidad del agua depende de la interacción conjunta de factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales, consolidándose como elementos críticos para la gestión comunitaria del recurso hídrico (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

Los resultados obtenidos demuestran que la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano no dependen de un único componente aislado, sino de la interacción permanente entre los distintos factores que conforman el sistema, en este contexto, la elevada centralidad

alcanzada por LC2 justificó su selección como concepto prioritario para el desarrollo de los escenarios de simulación, debido a que cualquier modificación sobre este factor tiene el potencial de generar cambios importantes en el comportamiento global del modelo, esta característica permitió orientar el diseño de sistema de monitoreo participativo hacia aquellos componentes con mayor capacidad de incidencia dentro de la red causal.

11.6 Inferencia Difusa

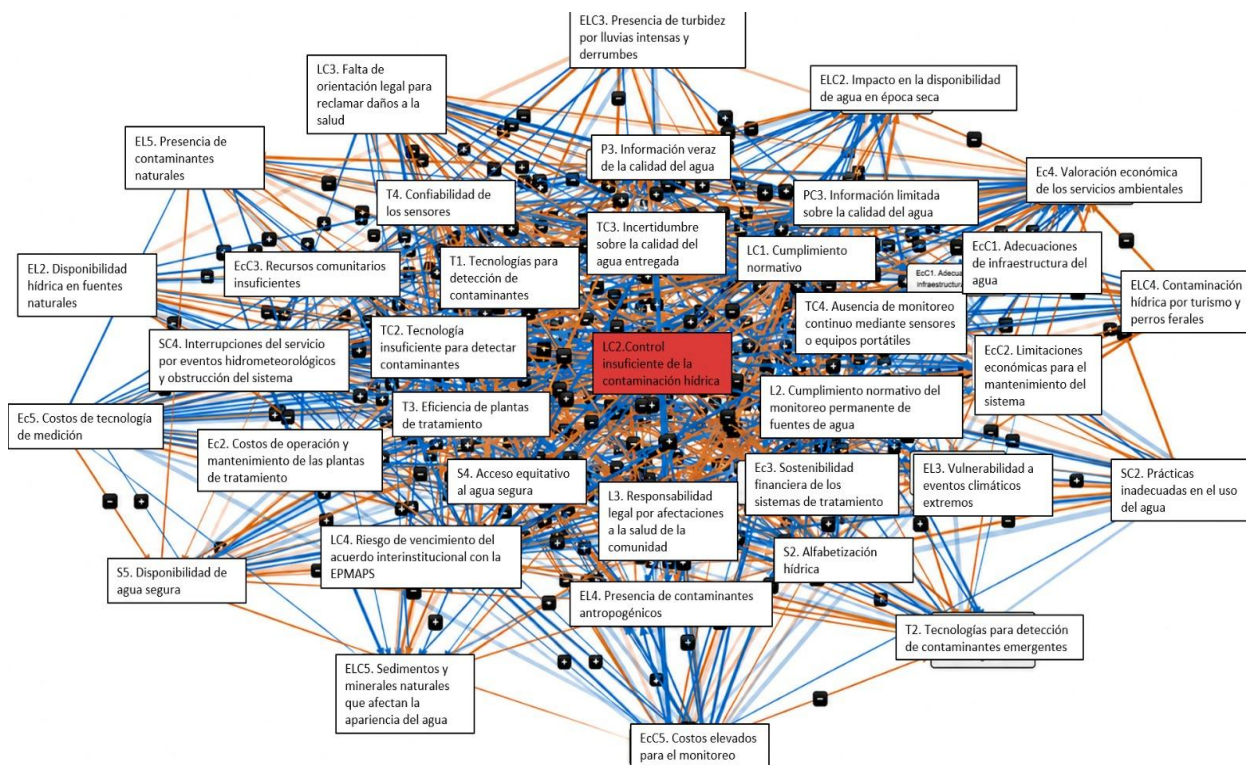
11.6.1 Análisis de escenarios: escenario de peor caso (Worst-Case Scenario)

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema ante una condición crítica, se desarrolló el escenario de peor caso (Worst-Case Scenario) mediante la simulación realizada en Mental Modeler, utilizando la matriz del Mapa Cognitivo Difuso obtenida durante el proceso participativo. Para ello, se activó el concepto LC2 “Control insuficiente de la contaminación hídrica”, identificado previamente como el nodo de mayor centralidad dentro del sistema ($ci = 56,73$), la activación de este concepto permitió analizar la respuesta del resto de los factores que conforman la red causal y determinar las variaciones producidas en cada uno de ellos como consecuencia de la propagación de sus efectos (Tabla 7).

Los resultados obtenidos muestran que la intensificación del concepto LC2 genera modificaciones tanto positivas como negativas sobre los demás componentes del modelo, evidenciando la elevada interdependencia existente entre los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, este comportamiento confirma que los conceptos con mayor centralidad poseen una elevada capacidad para propagar cambios a través de la red causal, permitiendo identificar las variables más sensibles frente a escenarios críticos y facilitando la priorización de estrategias de intervención (Schuerkamp & Giabbanelli, 2024).

Figura 8:

Mapa Cognitivo Difuso: escenario de peor caso (WORST-CASE)

**Tabla 7.**

Escenario de peor de los casos (WORST-CASE).

POLITICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
Pc3. Información limitada sobre la calidad del agua.	+4	P3. Información veraz de la calidad del agua	-4
ECONÓMICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.	+4	Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	-4
Ec5. Costos de tecnologías de medición.	+4	Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	-4

EcC1. Adecuaciones e
infraestructura +4

EcC2. Limitaciones
económicas para el +4
mantenimiento el sistema.

EcC3. Recursos comunitarios
insuficientes. +4

EcC5. Recursos comunitarios
insuficientes. +4

SOCIAL

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
SC2. Practicas inadecuadas en el uso del agua.	+4	S2. Alfabetización hídrica	-4
SC4. Interrupciones del servicio por eventos hidrometereológicos y obstrucción del sistema	+4	S4. Acceso equitativo al agua segura	-4
		S5. Disponibilidad de agua segura	-4

TECNÓLOGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
TC2. Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	+4	T1. Tecnologías para detección de contaminantes	-4
TC3. Incertidumbre sobresobre la calidad del agua entregada.	+4	T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	-4
TC4. Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles.	+4	T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	-4
		T4. Confiabilidad de los sensores	-4

ECOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
El3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	+4	El2. Disponibilidad hídrica de fuentes naturales	-4
El4. Presencia de contaminantes antropogénicos.	+4		
El5. Presencia de contaminantes naturales.	+4		

LEGAL

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud	+4	L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	-4
LC3. Falta de orientación legal por afectaciones a la salud de la comunidad	+4	LC. Cumplimiento normativo	-4
Lc4. Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	+4		

Los resultados obtenidos en el escenario de peor caso evidencian que la intensificación del concepto LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica, identificado como el nodo de mayor centralidad del sistema ($ci = 56,73$), genera cambios en el 94,59 % de los conceptos que conforman el Mapa Cognitivo Difuso, reflejando la elevada interdependencia existente entre las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal (Tabla 7). Este comportamiento confirma que el control insuficiente de la contaminación hídrica constituye un factor con una elevada capacidad para propagar cambios a través de la red causal, modificando el comportamiento general del sistema cuando su intensidad aumenta.

(ELC5). Finalmente, en la dimensión legal aumentan la responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad (L3), la falta de orientación legal para reclamar daños a la salud (LC3) y el riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS (LC4).

Por el contrario, el escenario de peor caso evidencia una disminución en variables asociadas al fortalecimiento de la gestión del recurso hídrico. Entre ellas destacan la información veraz sobre la calidad del agua (P3), la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento (Ec3), la valoración económica de los servicios ambientales (Ec4), la alfabetización hídrica (S2), el acceso equitativo al agua segura (S4) y la disponibilidad de agua segura (S5). De igual manera, disminuyen las tecnologías para la detección de contaminantes (T1), las tecnologías para la detección de contaminantes emergentes (T2), la eficiencia de las plantas de tratamiento (T3), la confiabilidad de los sensores (T4), la disponibilidad hídrica en fuentes naturales (EL2), el cumplimiento normativo del monitoreo permanente de las fuentes de agua (L2) y el cumplimiento normativo (LC1). En conjunto, estos resultados evidencian que el incremento del control insuficiente de la contaminación hídrica afecta simultáneamente la capacidad técnica, económica, institucional, ambiental y social del sistema, reduciendo las condiciones necesarias para garantizar la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma (Tabla 7).

11.7 Identificación de los drivers comunitarios para la implementación del sistema de monitoreo

Durante el proceso participativo desarrollado en la comunidad San Francisco de Cruz Loma se definieron tres estrategias orientadas a intervenir sobre los factores que condicionan la calidad y disponibilidad del agua para consumo humano. Estas propuestas fueron incorporadas posteriormente al Mapa Cognitivo Difuso como variables impulsoras o drivers, con el propósito de simular individualmente sus posibles efectos sobre los 36 conceptos del sistema. El uso de estrategias como variables de intervención permite desarrollar análisis de tipo «qué pasaría si» y comparar la respuesta del modelo frente a distintas alternativas antes de su aplicación en el territorio (Fonseca et al., 2022; Nápoles et al., 2023).

Las estrategias establecidas fueron: la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua, orientada a generar información continua y reducir la incertidumbre sobre las condiciones del recurso; el mapeo de actores competentes, dirigido a reconocer las responsabilidades y posibilidades de coordinación entre la Junta Administradora de Agua Potable, FONAG, EPMAPS y otras entidades relacionadas con la gestión hídrica; y la

independencia de la EPMAPS, planteada como una alternativa para analizar las implicaciones de una mayor autonomía comunitaria en la administración del sistema. Cada estrategia fue activada de manera individual para construir los escenarios de intervención y comparar sus efectos con el escenario de peor caso.

Tabla 7.

Estrategias comunitarias incorporadas como drivers para la simulación de escenarios

Estrategia comunitaria	Identificación en el modelo	Escenario evaluado
Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua	Estrategia 1	Escenario 2
Mapeo de actores competentes	Estrategia 2	Escenario 3
Independencia de la EPMAPS	Estrategia 3	Escenario 4

Nota: Drivers identificados conjuntamente con los miembros de la comunidad San Francisco de Cruz Loma por medio del taller participativo y de la matriz de escenarios.

11.7.1 Análisis del escenario de intervención 1: Implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua

Para evaluar el efecto de la implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua sobre la dinámica del sistema, esta estrategia fue incorporada como variable impulsora (driver) dentro del Mapa Cognitivo Difuso y analizada mediante inferencia difusa utilizando el software Mental Modeler. La simulación permitió estimar el comportamiento de los 36 conceptos que conforman el modelo, identificando aquellos que presentaron cambios positivos y negativos como respuesta a la activación de la estrategia. Los resultados muestran que la implementación del sistema de monitoreo modificó el 94,74 % de los conceptos, evidenciando una amplia capacidad de influencia sobre las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal consideradas en el estudio. Los cambios observados se presentan en la Tabla 9 y constituyen la base para analizar el potencial de esta estrategia en el fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua (Giabbanelli & Nápoles, 2024).

Tabla 8.

Escenario de intervención 1: Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua.

POLÍTICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
P3. Información veraz de la calidad del agua	+4	PC3. Información limitada sobre la calidad del agua	-4
ECONÓMICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	+4	Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	-4
Ec5. Costos de tecnologías de medición	+3	Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	-1
EcC2. Limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema	+4	EcC1. Adecuaciones de infraestructura del agua	-3
EcC3. Recursos comunitarios insuficientes	+4		
EcC5. Costos elevados para el monitoreo	+4		
SOCIAL			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
SC2. Prácticas inadecuadas en el uso del agua	+4	S2. Alfabetización hídrica	-2
		S4. Acceso equitativo al agua segura	-4
		S5. Disponibilidad de agua segura	-3

SC4. Interrupciones del servicio
por eventos hidrometeorológicos -4
y obstrucción del sistema

TECNOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	+2	T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	-4
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	+2	T4. Confiabilidad de los sensores	-3
		TC2. Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	-4
		TC3. Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada	-4
		TC4. Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles	-4

ECOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
EL3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	+4	EL2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	-3
EL5. Presencia de contaminantes naturales	+4	EL4. Presencia de contaminantes antropogénicos	-2
EIC2. Impacto en la disponibilidad de agua en época seca	+4		
EIC3. Presencia de turbidez por lluvias intensas y derrumbes	+3		
EIC5. Sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua	+3		

LEGAL

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	+4	L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	-4
LC1. Cumplimiento normativo	+4	LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica	-4
LC3. Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud	+2		
LC4. Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	+4		

Los resultados evidencian que la implementación del sistema participativo de monitoreo genera cambios positivos en variables relacionadas con la disponibilidad de información, el fortalecimiento institucional y la gestión del recurso hídrico, entre los principales incrementos se encuentran la información veraz sobre la calidad del agua (P3), la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento (Ec3), el cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua (L2) y el cumplimiento normativo (LC1), todos con una intensidad de +4, asimismo, se observan incrementos en los costos de tecnologías de medición (Ec5), las tecnologías para la detección de contaminantes (T1), las tecnologías para la detección de contaminantes emergentes (T2) y otros factores asociados con la gestión comunitaria del recurso hídrico, lo que evidencia que la implementación del sistema de monitoreo promueve el fortalecimiento de las capacidades técnicas e institucionales necesarias para mejorar el seguimiento de la calidad del agua.

Por otra parte, la simulación también evidencia disminuciones en variables que representan limitaciones o problemáticas para la comunidad. Entre los principales cambios negativos se encuentran la información limitada sobre la calidad del agua (PC3), el control insuficiente de la contaminación hídrica (LC2), la incertidumbre sobre la calidad del agua entregada (TC3) y la ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles (TC4), todas con una intensidad de -4, reflejando una reducción de las condiciones que dificultan la gestión del recurso hídrico. De igual manera, disminuyen los costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento (Ec2), las interrupciones del servicio por eventos hidrometeorológicos y

obstrucción del sistema (SC4) y la responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad (L3), mientras que otros conceptos presentan reducciones de menor magnitud, como la valoración económica de los servicios ambientales (Ec4), la alfabetización hídrica (S2), la confiabilidad de los sensores (T4) y la presencia de contaminantes antropogénicos (EL4).

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la implementación de un sistema participativo de monitoreo produce cambios importantes sobre la dinámica del modelo al modificar el 94,74 % de los conceptos evaluados, la simulación evidencia que esta estrategia favorece principalmente la generación de información confiable sobre la calidad del agua, fortalece el cumplimiento normativo y reduce factores críticos asociados con la incertidumbre y el control insuficiente de la contaminación hídrica, no obstante, también pone de manifiesto la necesidad de acompañar su implementación con mecanismos que garanticen la sostenibilidad técnica, económica e institucional del sistema, de manera que sus beneficios puedan mantenerse a largo plazo (Barbosa et al., 2023; Nápoles & Giabbanelli, 2024).

11.7.2 Análisis del escenario de intervención: Mapeo de actores competentes

La estrategia correspondiente al mapeo de actores competentes fue incorporada al Mapa Cognitivo Difuso como una variable impulsora (driver) con el propósito de evaluar su influencia sobre los factores que determinan la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, esta estrategia plantea fortalecer la articulación entre las instituciones y actores vinculados con la gestión del recurso hídrico, promoviendo una mejor coordinación entre la Junta Administradora de Agua Potable, el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) y demás organizaciones relacionadas con el sistema de abastecimiento, la simulación fue desarrollada mediante inferencia difusa utilizando Mental Modeler, obteniéndose modificaciones en el 94,74 % de los conceptos del modelo. Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 10 (Nápoles & Giabbanelli, 2024).

Tabla 9.*Escenario de intervención 2: Mapeo de actores competentes*

POLÍTICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
P3. Información veraz de la calidad del agua	+4	PC3. Información limitada sobre la calidad del agua	-4
ECONÓMICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	+4	Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	-4
		Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	-1
		Ec5. Costos de tecnologías de medición	-2
		EcC1. Adecuaciones de infraestructura del agua	-3
		EcC2. Limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema	-4
		EcC3. Recursos comunitarios insuficientes	-4
		EcC5. Costos elevados para el monitoreo	-4
SOCIAL			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
S4. Acceso equitativo al agua segura	+4	S2. Alfabetización hídrica	-1

S5. Disponibilidad de agua segura	-3
SC2. Prácticas inadecuadas en el uso del agua	-3
SC4. Interrupciones del servicio por eventos hidrometeorológicos y obstrucción del sistema	-4

TECNOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	+3	T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	-4
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	+1	TC2. Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	-4
T4. Confiabilidad de los sensores	+3	TC3. Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada	-4
		TC4. Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles	-4

ECOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
EL3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	+4	EL2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	-3
EL4. Presencia de contaminantes antropogénicos	+3	EIC4. Contaminación hídrica por turismo y perros ferales	-3
EL5. Presencia de contaminantes naturales	+4	EIC5. Sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua	-4
EIC2. Impacto en la disponibilidad de agua en época seca	+4		

EIC3. Presencia de turbidez por
lluvias intensas y derrumbes +4

LEGAL

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	+4	L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	-4
LC1. Cumplimiento normativo	+4	LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica	-4
LC4. Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	+4	LC3. Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud	-2

Los resultados obtenidos muestran que el mapeo de actores competentes produce cambios positivos principalmente en variables relacionadas con la gestión institucional, el acceso a la información y el fortalecimiento del monitoreo ambiental. Entre los incrementos más relevantes destacan la información veraz sobre la calidad del agua (P3), la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento (Ec3), el acceso equitativo al agua segura (S4), el cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua (L2) y el cumplimiento normativo (LC1), los cuales presentan las mayores intensidades positivas dentro de la simulación. Asimismo, se observan incrementos en las tecnologías para la detección de contaminantes (T1), las tecnologías para la detección de contaminantes emergentes (T2), la confiabilidad de los sensores (T4) y en variables ecológicas como la vulnerabilidad a eventos climáticos extremos (EL3), la presencia de contaminantes antropogénicos (EL4), la presencia de contaminantes naturales (EL5) y el impacto en la disponibilidad de agua durante la época seca (ELC2). En conjunto, estos resultados evidencian que una mejor articulación entre las instituciones fortalece las capacidades de coordinación y monitoreo para la gestión comunitaria del recurso hídrico.

Por otra parte, la simulación evidencia una disminución en variables asociadas con limitaciones económicas, operativas y sociales. Se observa una reducción de la información limitada sobre la calidad del agua (PC3), los costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento (Ec2), los costos de tecnologías de medición (Ec5), las limitaciones económicas para el

mantenimiento del sistema (EcC2), los recursos comunitarios insuficientes (EcC3) y los costos elevados para el monitoreo (EcC5). Del mismo modo, disminuyen la incertidumbre sobre la calidad del agua entregada (TC3), la ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles (TC4), el control insuficiente de la contaminación hídrica (LC2) y la falta de orientación legal para reclamar daños a la salud (LC3). Estas variaciones indican que el fortalecimiento de la coordinación entre los actores competentes contribuye a reducir diversos factores que limitan la gestión eficiente del recurso hídrico en la comunidad.

En conjunto, los resultados muestran que el fortalecimiento de la coordinación entre los actores responsables de la gestión del recurso hídrico modificó el 94,74 % de los conceptos del modelo, favoreciendo el intercambio de información, el cumplimiento de las responsabilidades institucionales y el desarrollo de acciones coordinadas para el monitoreo comunitario. Aunque la estrategia mantiene efectos sobre variables económicas y sociales que requieren atención, la simulación evidencia que la articulación entre instituciones constituye un elemento clave para fortalecer la gobernanza del agua y mejorar la capacidad de respuesta frente a los problemas que afectan la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano (Fonseca et al., 2022; Schuerkamp & Giabbanelli, 2024)

11.7.3 Análisis del escenario de intervención: Independencia de la EPMAPS

La estrategia correspondiente a la independencia de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) fue incorporada al Mapa Cognitivo Difuso como una variable impulsora (driver) con el propósito de evaluar el efecto que tendría una gestión del sistema de abastecimiento sin el apoyo directo de esta institución sobre la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, la simulación fue desarrollada mediante inferencia difusa utilizando el software Mental Modeler, permitiendo analizar la respuesta del sistema frente a este escenario. Los resultados evidencian modificaciones en el 90 % de los conceptos del modelo, cuyos cambios positivos y negativos se presentan en la Tabla 11 (Giabbanelli & Nápoles, 2024).

Tabla 10.*Escenario de intervención 3: Independencia de la EPMAPS*

POLÍTICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
PC3. Información limitada sobre la calidad del agua	+4	P3. Información veraz de la calidad del agua	-4
ECONÓMICO			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	+4	Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	-4
Ec5. Costos de tecnologías de medición	+4	Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	-1
EcC2. Limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema	+4	EcC1. Adecuaciones de infraestructura del agua	-3
EcC3. Recursos comunitarios insuficientes	+4		
EcC5. Costos elevados para el monitoreo	+4		
SOCIAL			
Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
SC2. Prácticas inadecuadas en el uso del agua	+3	S2. Alfabetización hídrica	-1
SC4. Interrupciones del servicio por eventos hidrometeorológicos y obstrucción del sistema	+4	S4. Acceso equitativo al agua segura	-4
		S5. Disponibilidad de agua segura	-3
TECNOLÓGICO			

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
TC2. Tecnología insuficiente para detectar contaminantes	+4	T1. Tecnologías para detección de contaminantes	-1
TC3. Incertidumbre sobre la calidad del agua entregada	+4	T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	-1
TC4. Ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles	+4	T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	-4
		T4. Confiabilidad de los sensores	-2

ECOLÓGICO

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
EL3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	+4	EL2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	-3
EL4. Presencia de contaminantes antropogénicos	+3		
EL5. Presencia de contaminantes naturales	+3		
ELC2. Impacto en la disponibilidad de agua en época seca	+3		
ELC3. Presencia de turbidez por lluvias intensas y derrumbes	+4		
ELC4. Contaminación hídrica por turismo y perros ferales	+2		
ELC5. Sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua	+4		

LEGAL

Componente	Fuerza positiva	Componente	Fuerza negativa
-------------------	------------------------	-------------------	------------------------

L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	+4	L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	-4
LC2. Control insuficiente de la contaminación hídrica	+4	LC1. Cumplimiento normativo	-4
LC3. Falta de orientación legal para reclamar daños a la salud	+2		
LC4. Riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS	+4		

Los resultados obtenidos muestran que el escenario de independencia de la EPMAPS incrementa principalmente variables asociadas con limitaciones técnicas, económicas y operativas del sistema de abastecimiento. Entre los principales aumentos se encuentran la información limitada sobre la calidad del agua (PC3), los costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento (Ec2), los costos de tecnologías de medición (Ec5), las limitaciones económicas para el mantenimiento del sistema (EcC2), los recursos comunitarios insuficientes (EcC3) y los costos elevados para el monitoreo (EcC5). Asimismo, se incrementan la tecnología insuficiente para detectar contaminantes (TC2), la incertidumbre sobre la calidad del agua entregada (TC3), la ausencia de monitoreo continuo mediante sensores o equipos portátiles (TC4) y la vulnerabilidad a eventos climáticos extremos (EL3), evidenciando un deterioro en las condiciones necesarias para garantizar un monitoreo efectivo y una adecuada gestión del recurso hídrico.

De igual manera, el escenario incrementa variables relacionadas con la presencia de contaminantes antropogénicos (EL4), la presencia de contaminantes naturales (EL5), el impacto en la disponibilidad de agua durante la época seca (ELC2), la presencia de turbidez por lluvias intensas y derrumbes (ELC3), la contaminación hídrica por turismo y perros ferales (ELC4), los sedimentos y minerales naturales que afectan la apariencia del agua (ELC5), así como la responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad (L3), el control insuficiente de la contaminación hídrica (LC2), la falta de orientación legal para reclamar daños a la salud (LC3) y el riesgo de vencimiento del acuerdo interinstitucional con la EPMAPS (LC4), estos resultados reflejan que la ausencia del apoyo institucional incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a factores ambientales, legales y de gestión.

Por el contrario, la simulación muestra una disminución en variables favorables para la gestión comunitaria del agua, entre ellas la información veraz sobre la calidad del agua (P3), la sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento (Ec3), la valoración económica de los servicios ambientales (Ec4), la alfabetización hídrica (S2), el acceso equitativo al agua segura (S4) y la disponibilidad de agua segura (S5). asimismo, disminuyen las tecnologías para la detección de contaminantes (T1), las tecnologías para la detección de contaminantes emergentes (T2), la eficiencia de las plantas de tratamiento (T3), la confiabilidad de los sensores (T4), la disponibilidad hídrica en fuentes naturales (EL2), el cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua (L2) y el cumplimiento normativo (LC1), en conjunto, estos resultados indican que la independencia de la EPMAPS debilita los procesos técnicos, financieros e institucionales que actualmente contribuyen al funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua en la comunidad.

El comportamiento observado evidencia que la cooperación interinstitucional constituye un componente fundamental para fortalecer la gestión comunitaria del agua. La disminución de variables relacionadas con la información, el monitoreo y el cumplimiento normativo, junto con el incremento de factores que representan limitaciones económicas y operativas, sugiere que una gestión completamente independiente de la EPMAPS podría reducir la capacidad de respuesta frente a los problemas asociados con la calidad y disponibilidad del agua para consumo humano, estos resultados resaltan la importancia de mantener mecanismos de coordinación entre la comunidad y las instituciones que apoyan la gestión del recurso hídrico (Giabbanelli & Nápoles, 2024)

11.7.4 Comparación de los escenarios evaluados mediante inferencia difusa

Con el propósito de sintetizar el comportamiento del sistema frente a los diferentes escenarios evaluados, se realizó una comparación de los resultados obtenidos mediante inferencia difusa para el escenario de peor caso y las tres estrategias de intervención propuestas por la comunidad. Esta comparación permitió identificar la tendencia general de cada escenario y reconocer cuáles estrategias presentan un mayor potencial para fortalecer la disponibilidad y calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma. Los resultados se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11.*Comparación de los escenarios evaluados mediante inferencia difusa*

Escenario	Variable impulsora evaluada	% de variables modificadas	Tendencia general del sistema
Escenario de peor caso	Gestión deficiente y fragmentada del recurso hídrico	94,59 %	Incremento de factores que afectan la disponibilidad y calidad del agua; disminución de las capacidades institucionales, tecnológicas y sociales del sistema.
Estrategia 1	Implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua	94,74 %	Fortalecimiento del monitoreo, generación de información, cumplimiento normativo y capacidades comunitarias para la gestión del recurso hídrico.
Estrategia 2	Mapeo de actores competentes	94,74 %	Mejora de la coordinación institucional, acceso a información y gobernanza del agua, favoreciendo la gestión participativa del sistema.
Estrategia 3	Independencia de la EPMAPS	94,74 %	Incremento de limitaciones económicas, operativas y técnicas, acompañado por la disminución de variables relacionadas con el monitoreo y el fortalecimiento institucional.

*Nota: La tabla compara los escenarios evaluados y las estrategias mediante inferencia difusa.***11.7.5 Análisis comparativo de los escenarios**

La comparación de los escenarios obtenidos mediante inferencia difusa evidencia que las cuatro simulaciones modificaron una elevada proporción de los conceptos que conforman el Mapa Cognitivo Difuso (94,59 % en el escenario de peor caso y 94,74 % en las tres estrategias de intervención); sin embargo, la dirección de los cambios fue diferente según la estrategia evaluada. Mientras el escenario de peor caso y el escenario de independencia de la EPMAPS presentaron un predominio de modificaciones asociadas al incremento de limitaciones económicas, operativas, ambientales e institucionales, las estrategias relacionadas con la implementación del sistema participativo de monitoreo y el mapeo de actores competentes favorecieron principalmente variables vinculadas con el fortalecimiento de la gestión del agua, el acceso a información y el cumplimiento normativo.

La implementación del sistema participativo de monitoreo produjo mejoras importantes en la disponibilidad de información sobre la calidad del agua, el fortalecimiento de las

tecnologías de monitoreo y la sostenibilidad del sistema, demostrando que la generación continua de información constituye un elemento clave para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico. Por su parte, el mapeo de actores competentes mostró un comportamiento más equilibrado al fortalecer la coordinación entre las instituciones involucradas en la gestión del agua, favoreciendo la gobernanza local y la articulación entre los diferentes actores responsables del monitoreo y la protección de las fuentes hídricas.

En contraste, el escenario de independencia de la EPMAPS evidenció una disminución de variables relacionadas con el acceso a información, la sostenibilidad financiera, el cumplimiento normativo y el uso de tecnologías de monitoreo, acompañada por un incremento de limitaciones económicas, técnicas y operativas. Estos resultados indican que el apoyo institucional constituye un componente importante para mantener la operatividad del sistema y garantizar la continuidad de las actividades de monitoreo participativo desarrolladas por la comunidad.

De manera general, la comparación de los escenarios permite establecer que las estrategias basadas en el fortalecimiento del monitoreo comunitario y la articulación entre los diferentes actores institucionales presentan un comportamiento más favorable para mejorar la gestión del recurso hídrico que los escenarios caracterizados por una gestión deficiente o por la reducción del apoyo institucional. En conjunto, los resultados ponen de manifiesto la importancia de promover procesos colaborativos que integren la participación comunitaria, el acompañamiento técnico y la generación continua de información para fortalecer la gestión sostenible del agua (Fonseca et al., 2022; Salberg et al., 2022)

11.8 Manual comunitario estandarizado para el monitoreo participativo de la calidad del agua

Como resultado de la presente investigación se desarrolló un manual comunitario estandarizado orientado a facilitar la implementación de sistemas de monitoreo participativo de la calidad del agua en comunidades rurales. El manual fue construido a partir de los resultados obtenidos durante el diagnóstico participativo, el análisis de los factores PESTEL, la construcción del Mapa Cognitivo Difuso y la evaluación de escenarios mediante inferencia difusa. Su contenido integra principios de ciencia ciudadana y ciencia abierta, empleando un lenguaje accesible, recursos gráficos y actividades didácticas que favorecen la participación comunitaria y la apropiación del conocimiento (Trevathan & Schmidtke, 2022). A diferencia de un manual diseñado para una comunidad específica, este documento fue concebido con un

enfoque estandarizado que permite su adaptación a diferentes comunidades rurales interesadas en implementar sistemas participativos de monitoreo de la calidad del agua (Warner et al., 2024).

11.8.1 Propósito del manual

El manual comunitario estandarizado para el monitoreo participativo de la calidad del agua fue desarrollado como uno de los principales productos de la presente investigación, con el propósito de proporcionar una herramienta práctica que facilite la implementación de sistemas de monitoreo participativo en comunidades rurales. Su diseño busca fortalecer la participación comunitaria en la gestión del recurso hídrico mediante orientaciones claras sobre el uso del sistema de monitoreo, el registro e interpretación de la información obtenida y la toma de decisiones orientadas a la protección de la calidad del agua (Dominguez-Rendón et al., 2024; Warner et al., 2024).

A diferencia de un manual elaborado para una comunidad específica, este documento fue concebido con un enfoque estandarizado y replicable, permitiendo su adaptación a diferentes contextos comunitarios que desarrollen iniciativas de monitoreo participativo de la calidad del agua. Para ello, integra principios de ciencia ciudadana y ciencia abierta, promoviendo que los propios habitantes participen activamente en la generación, comprensión y utilización de la información para apoyar la gestión sostenible del recurso hídrico (O'Connor et al., 2025; Robinson et al., 2024).

Asimismo, el manual fue estructurado utilizando un lenguaje sencillo, ilustraciones, diagramas y actividades secuenciales que facilitan la comprensión de los contenidos por parte de usuarios con distintos niveles de escolaridad y experiencia técnica. Esta organización favorece el aprendizaje progresivo, fortalece la apropiación del conocimiento y contribuye a que el monitoreo comunitario pueda mantenerse en el tiempo mediante la participación organizada de la comunidad, constituyéndose en un instrumento de apoyo para futuras investigaciones y proyectos relacionados con la gestión participativa del agua.

11.8.2 Población objetivo del manual

El manual comunitario estandarizado fue diseñado para ser utilizado por comunidades rurales interesadas en implementar procesos participativos de monitoreo de la calidad del agua, independientemente de su ubicación geográfica o de la organización responsable de su gestión. Su contenido está orientado principalmente a miembros de juntas administradoras de agua potable, operadores comunitarios, líderes locales, estudiantes, docentes y demás actores que

participen en actividades relacionadas con la protección y monitoreo del recurso hídrico (Shao & Bishop, 2025; Warner et al., 2024).

Durante su elaboración se consideró que los potenciales usuarios pueden presentar diferentes niveles de escolaridad, experiencia técnica y acceso a tecnologías de monitoreo. Por esta razón, el manual incorpora un lenguaje claro, instrucciones secuenciales y recursos visuales que facilitan la comprensión de los procedimientos descritos, favoreciendo que cualquier integrante de la comunidad pueda participar activamente en las actividades de monitoreo sin requerir conocimientos técnicos especializados. Diversos estudios sobre comunicación para el desarrollo rural destacan que la utilización de materiales educativos adaptados a las características socioculturales de los usuarios mejora los procesos de aprendizaje, fortalece la apropiación del conocimiento y facilita la participación comunitaria en proyectos de gestión local (Robinson et al., 2024). Asimismo, el carácter estandarizado del manual permite que su contenido pueda adaptarse a diferentes contextos sociales, ambientales e institucionales, conservando la metodología participativa desarrollada en esta investigación. De esta manera, el documento constituye una herramienta de apoyo para futuras investigaciones, programas de ciencia ciudadana y proyectos de monitoreo participativo de la calidad del agua impulsados por universidades, organizaciones comunitarias e instituciones públicas (Dominguez-Rendón et al., 2024).

11.8.3 Organización y contenido del manual

El manual comunitario estandarizado fue organizado siguiendo una secuencia lógica, progresiva y didáctica, con el propósito de facilitar el aprendizaje de los usuarios desde la comprensión de conceptos básicos hasta la aplicación práctica del sistema de monitoreo participativo de la calidad del agua. La estructura del documento fue definida a partir de los resultados obtenidos durante la investigación, integrando el diagnóstico participativo, los factores identificados mediante el análisis PESTEL, la construcción de los Mapas Cognitivos Difusos y la evaluación de escenarios, de manera que cada sección responda a las necesidades identificadas durante el trabajo desarrollado con la comunidad.

El contenido del manual inicia con una introducción sobre la importancia del monitoreo participativo, la ciencia ciudadana y la ciencia abierta como herramientas para fortalecer la gestión comunitaria del recurso hídrico. Posteriormente, se presentan conceptos básicos relacionados con la calidad del agua y el funcionamiento del sistema de monitoreo, utilizando un lenguaje sencillo e ilustraciones que facilitan la comprensión de los contenidos. A

continuación, el manual incorpora actividades orientadas a la identificación de problemas, el reconocimiento de los factores que influyen en la calidad del agua, la construcción de relaciones causa–efecto y la interpretación de la información obtenida mediante el monitoreo, promoviendo el aprendizaje activo y la participación de los usuarios (O’Connor et al., 2025; Shao & Bishop, 2025).

Finalmente, el manual incluye orientaciones para el uso del sistema de monitoreo, el registro de la información generada, la interpretación de resultados, el mantenimiento básico de los equipos y recomendaciones para fortalecer la organización comunitaria durante el desarrollo de las actividades de monitoreo. Esta organización permite que el documento funcione no solo como una guía de consulta, sino también como un recurso educativo que facilita la apropiación del conocimiento y favorece la continuidad de los procesos de monitoreo participativo en diferentes comunidades rurales (Starkey et al., 2024; Warner et al., 2024).

11.8.4 Recursos didácticos incorporados

Con el propósito de facilitar el aprendizaje y promover la participación activa de los usuarios, el manual comunitario estandarizado incorpora una variedad de recursos didácticos diseñados para fortalecer la comprensión de los contenidos y favorecer la apropiación del conocimiento durante el proceso de monitoreo participativo de la calidad del agua. Entre estos recursos se incluyen ilustraciones, iconografía, diagramas, organizadores gráficos, flujogramas, cuadros informativos y ejemplos contextualizados que acompañan el desarrollo de cada temática, permitiendo comprender la información de forma clara, secuencial y visual.

Además de los recursos gráficos, el manual incorpora actividades participativas orientadas al aprendizaje mediante la práctica. Para ello, se incluyeron espacios destinados al registro de observaciones, resolución de ejercicios, elaboración de dibujos, actividades para colorear, preguntas de reflexión y hojas en blanco destinadas a que los participantes representen gráficamente las características de su comunidad, identifiquen problemáticas relacionadas con el agua y registren la información obtenida durante las actividades de monitoreo. La incorporación de actividades prácticas y materiales interactivos favorece la participación de los usuarios, fortalece la construcción colectiva del conocimiento y mejora la comprensión de los contenidos en procesos de educación ambiental comunitaria (Dominguez-Rendón et al., 2024; Robinson et al., 2024).

La integración de estos recursos responde al enfoque pedagógico adoptado durante el diseño del manual, el cual busca que los usuarios no sean únicamente lectores del documento,

sino participantes activos en el proceso de aprendizaje. De esta manera, el manual combina información técnica con actividades educativas que estimulan la observación, el análisis, la participación grupal y la reflexión sobre la gestión del recurso hídrico, favoreciendo el desarrollo de capacidades que puedan ser replicadas en diferentes comunidades rurales interesadas en implementar sistemas participativos de monitoreo de la calidad del agua (O'Connor et al., 2025; Warner et al., 2024).

11.8.5 Aplicabilidad del manual en comunidades rurales

El manual comunitario estandarizado fue concebido para ser implementado en comunidades rurales interesadas en desarrollar procesos participativos de monitoreo de la calidad del agua, manteniendo una estructura flexible que facilita su adaptación a diferentes contextos sociales, ambientales e institucionales. Aunque su diseño se fundamentó en la experiencia obtenida durante el trabajo realizado en la comunidad San Francisco de Cruz Loma, su contenido fue organizado de manera que pueda ser utilizado en otras comunidades que compartan características similares en cuanto a la gestión comunitaria del recurso hídrico y el interés por fortalecer los procesos de monitoreo participativo.

Su carácter estandarizado permite incorporar particularidades propias de cada territorio, como las condiciones de las fuentes de agua, las formas de organización comunitaria, las problemáticas ambientales identificadas y los actores locales involucrados en la gestión del recurso. Esta flexibilidad favorece que el manual pueda utilizarse como material de apoyo en programas de educación ambiental, proyectos de ciencia ciudadana, iniciativas de ciencia abierta y procesos de fortalecimiento de capacidades impulsados por instituciones públicas, universidades, organizaciones comunitarias y entidades vinculadas con la gestión sostenible del agua. La disponibilidad de materiales educativos adaptables constituye un elemento clave para facilitar la transferencia de metodologías entre diferentes comunidades y fortalecer la participación local en la gestión de los recursos naturales (Dominguez-Rendón et al., 2024; Shao & Bishop, 2025)

Asimismo, el manual representa una herramienta de consulta que puede contribuir a la continuidad de futuros procesos de monitoreo comunitario, promoviendo que las comunidades generen información sobre la calidad del agua, fortalezcan sus capacidades organizativas y participen activamente en la toma de decisiones relacionadas con la protección del recurso hídrico. En este sentido, el documento trasciende el alcance de la presente investigación y constituye un aporte metodológico que podrá servir como referencia para el desarrollo de

iniciativas similares en otros territorios (Starkey et al., 2024; Warner et al., 2024). El producto final correspondiente al Manual comunitario estandarizado para el monitoreo participativo de la calidad del agua se presenta en el Anexo 13 para su consulta.

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

La investigación evidenció que la calidad del agua para consumo humano en la comunidad San Francisco de Cruz Loma responde a la interacción de múltiples factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales. La integración del conocimiento científico con el conocimiento aportado por la comunidad permitió identificar 36 conceptos que representan la realidad del territorio, demostrando que la gestión del recurso hídrico no depende exclusivamente de variables ambientales, sino también de aspectos relacionados con la gobernanza, la disponibilidad de información, la participación comunitaria, el cumplimiento normativo y la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento. La aplicación del enfoque PESTEL permitió comprender que las dimensiones económica y ecológica concentraron el mayor número de factores identificados (22,22 % cada una), permitiendo analizar estas interrelaciones desde una perspectiva integral y constituyéndose en una herramienta útil para el diagnóstico de problemáticas asociadas con la calidad del agua en comunidades rurales.

La aplicación de los Mapas Cognitivos Difusos permitió representar la complejidad del sistema mediante una estructura de relaciones causales construida de forma participativa entre la comunidad y el equipo investigador. El análisis mediante teoría de grafos facilitó la identificación de los conceptos con mayor influencia, dependencia e importancia dentro de la red, proporcionando criterios estructurales para priorizar estrategias orientadas al fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua. De esta manera, el modelo desarrollado demostró que la incorporación del conocimiento local dentro de herramientas de modelación sistémica fortalece la comprensión de problemas complejos y mejora el análisis de los factores que condicionan la calidad del agua para consumo humano.

La evaluación de escenarios mediante inferencia difusa permitió analizar el comportamiento del sistema frente a diferentes alternativas de intervención, evidenciando que los escenarios evaluados modificaron entre el 94,59 % y el 94,74 % de los conceptos del modelo. Las estrategias orientadas al fortalecimiento del monitoreo participativo y a la articulación entre los actores responsables de la gestión del recurso hídrico presentaron los cambios más favorables sobre la generación de información, el cumplimiento normativo y la toma de decisiones

comunitarias. En contraste, los escenarios caracterizados por una menor articulación institucional incrementaron limitaciones técnicas, económicas y organizativas, confirmando que la coordinación entre las instituciones y la comunidad constituye un elemento fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de monitoreo.

Como resultado de la investigación se elaboró un manual comunitario estandarizado para la implementación de sistemas participativos de monitoreo de la calidad del agua, diseñado para ser utilizado por juntas administradoras de agua potable rurales y adaptable a diferentes comunidades interesadas en fortalecer la gestión del recurso hídrico. El manual integra principios de ciencia ciudadana y ciencia abierta mediante un lenguaje accesible, recursos didácticos y actividades participativas que facilitan la apropiación del conocimiento y promueven la participación activa de la comunidad en los procesos de monitoreo, constituyéndose en un producto metodológico derivado de la investigación con potencial de aplicación en futuros proyectos relacionados con la gestión comunitaria del agua.

En conjunto, la investigación permitió evaluar la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y participación comunitaria, demostrando que la integración de metodologías participativas, herramientas de modelación sistémica y tecnologías de código abierto constituye una alternativa técnicamente viable para fortalecer la gestión del agua en comunidades rurales. Además de generar información permanente para apoyar la toma de decisiones, la metodología desarrollada aporta un modelo de trabajo replicable que puede ser adaptado por otras juntas administradoras de agua potable rurales y por proyectos de investigación orientados al monitoreo participativo de la calidad del agua.

12.2 Recomendaciones

Se recomienda a la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad San Francisco de Cruz Loma mantener la implementación del sistema de monitoreo participativo mediante un programa permanente de seguimiento y registro de la información generada. Asimismo, se sugiere utilizar la información obtenida para fortalecer la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento del sistema, la prevención de riesgos y la protección de la calidad del agua para consumo humano, favoreciendo la gestión sostenible del recurso hídrico.

Es conveniente que el Fondo para la Protección del Agua (FONAG), la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) y las demás instituciones vinculadas con la gestión del recurso hídrico fortalezcan los procesos de cooperación técnica y

acompañamiento que contribuyan a la sostenibilidad del sistema de monitoreo y al fortalecimiento de las capacidades locales.

Se considera pertinente que la Universidad Técnica de Cotopaxi continúe desarrollando investigaciones que apliquen y validen la metodología propuesta en diferentes comunidades rurales, con el propósito de comparar resultados, fortalecer el modelo participativo e incorporar nuevas herramientas tecnológicas y escenarios de análisis mediante Mapas Cognitivos Difusos que contribuyan al monitoreo de la calidad del agua y a la toma de decisiones comunitarias.

Se sugiere que las juntas administradoras de agua potable rurales utilicen el manual comunitario elaborado en esta investigación como una herramienta de apoyo para los procesos de capacitación, organización y monitoreo del recurso hídrico, adaptando sus contenidos a las características sociales, ambientales y organizativas de cada comunidad, pero respetando los principios de ciencia ciudadana y ciencia abierta que fundamentan la metodología participativa propuesta.

Para futuras investigaciones, se plantea incorporar períodos más amplios de seguimiento al sistema de monitoreo, así como nuevas variables relacionadas con la calidad del agua, el cambio climático, la participación comunitaria y el desempeño de tecnologías emergentes. De igual manera, se propone evaluar nuevos escenarios mediante inferencia difusa y Mapas Cognitivos Difusos, con el fin de fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico y generar información que apoye la toma de decisiones a largo plazo.

Finalmente, se recomienda a las instituciones públicas, organizaciones no gubernamentales y entidades vinculadas con la gestión comunitaria del agua considerar la metodología desarrollada en esta investigación como una herramienta de apoyo para el diseño e implementación de programas de monitoreo participativo en otras comunidades rurales. La integración de la ciencia ciudadana, la ciencia abierta y la modelación mediante Mapas Cognitivos Difusos constituye una alternativa que puede fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico y favorecer procesos de toma de decisiones basados en la participación comunitaria y la generación colaborativa de conocimiento.

13 BIBLIOGRAFÍA

- Abarzúa, G. E. B., & Glückler, J. (2023). Network Governance at the Margin of the State: Rural Drinking Water Communities in Chile. *Environmental Management*, 71(2), 451-464. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01760-2>
- Ahmad, M., & Wilkins, S. (2025). Purposive sampling in qualitative research: A framework for the entire journey. *Quality & Quantity*, 59(2), 1461-1479. <https://doi.org/10.1007/s11135-024-02022-5>
- Alvarado, J., Siqueiros-García, J. M., Ramos-Fernández, G., García-Meneses, P. M., & Mazari-Hiriart, M. (2022). Barriers and bridges on water management in rural Mexico: From water-quality monitoring to water management at the community level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(12), 912. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10616-5>
- Alvarez, L., Vargas, L., & Jimenez, A. (2024). Priorities for the rural water and sanitation services regulation in Latin America. *Frontiers in Water*, 6, 1406301. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1406301>
- Amador-Castro, F., González-López, M. E., Lopez-Gonzalez, G., Garcia-Gonzalez, A., Díaz-Torres, O., Carbajal-Espinosa, O., & Gradilla-Hernández, M. S. (2024). Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. *Journal of Environmental Management*, 352, 119959. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119959>
- Andrade, C. (2021). The Inconvenient Truth About Convenience and Purposive Samples. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 43(1), 86-88. <https://doi.org/10.1177/0253717620977000>
- Armijos-Arcos, F., Salazar, C., Beltrán-Dávalos, A. A., Kurbatova, A. I., & Savenkova, E. V. (2025). Assessment of Water Quality and Ecological Integrity in an Ecuadorian Andean Watershed. *Sustainability*, 17(8), 3684. <https://doi.org/10.3390/su17083684>
- Babiso, W. Z., Ayano, K. K., Haile, A. T., Keche, D. D., Acharya, K., & Werner, D. (2023). Citizen Science for Water Quality Monitoring in the Meki River, Ethiopia: Quality Assurance and Comparison with Conventional Methods. *Water*, 15(2), 238. <https://doi.org/10.3390/w15020238>

- Ballard, H. L., Lindell, A. J., & Jadallah, C. C. (2024). Environmental education outcomes of community and citizen science: A systematic review of empirical research. *Environmental Education Research*, 30(6), 1007-1040. <https://doi.org/10.1080/13504622.2024.2348702>
- Berrones, G., Crespo, P., Ochoa-Sánchez, A., Wilcox, B. P., & Céleri, R. (2022). Importance of Fog and Cloud Water Contributions to Soil Moisture in the Andean Páramo. *Hydrology*, 9(4), 54. <https://doi.org/10.3390/hydrology9040054>
- Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan-Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas. *Sensors*, 23(8), 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>
- Brecht Mommen, B. M., Karen Humphries-Waa, K. H.-W., & Stanley Gwavuya, S. G. (2017). Does women's participation in water committees affect management and water system performance in rural Vanuatu? *Waterlines*, 36(3), 216-232. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.16-00026>
- Brück, S. A., Torres, B. D. M., & De Moraes Polizeli, M. D. L. T. (2023). The Ecuadorian paramo in danger: What we know and what might be learned from northern wetlands. *Global Ecology and Conservation*, 47, e02639. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02639>
- Campbell, S., Greenwood, M., Prior, S., Shearer, T., Walkem, K., Young, S., Bywaters, D., & Walker, K. (2020). Purposive sampling: Complex or simple? Research case examples. *Journal of Research in Nursing*, 25(8), 652-661. <https://doi.org/10.1177/1744987120927206>
- Carlson, T., & Cohen, A. (2018). Linking community-based monitoring to water policy: Perceptions of citizen scientists. *Journal of Environmental Management*, 219, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.077>
- Carroll, S. R., Herczog, E., Hudson, M., Russell, K., & Stall, S. (2021). Operationalizing the CARE and FAIR Principles for Indigenous data futures. *Scientific Data*, 8(1), 108. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00892-0>
- Cartuche, V., Cartuche, D., Neira, C., & González, L. (2021). La gobernanza y la gestión integrada de los recursos hídricos: Un desafío para las comunidades indígenas. *CEDAMAZ*, 11(2), 107-114. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v11i2.1178>

- Concepcion, L., Napoles, G., Falcon, R., Vanhoof, K., & Bello, R. (2021). Unveiling the Dynamic Behavior of Fuzzy Cognitive Maps. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 29(5), 1252-1261. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2973853>
- Conrad, C. C., & Hilchey, K. G. (2011a). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: Issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1-4), 273-291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Conrad, C. C., & Hilchey, K. G. (2011b). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: Issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1-4), 273-291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Daconte, A., Sierra, M., Noguera, J., & Rodriguez, N. (2024). Preliminary results of an IoT-based prototype monitoring system for physicochemical parameters and water level in an aquifer: Case of Santa Marta, Colombia. *Procedia Computer Science*, 231, 478-483. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.237>
- Daniel, D., Al Djono, T. P., & Iswarani, W. P. (2023). Factors related to the functionality of community-based rural water supply and sanitation program in Indonesia. *Geography and Sustainability*, 4(1), 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.12.002>
- Danielsen, F., Eicken, H., Funder, M., Johnson, N., Lee, O., Theilade, I., Argyriou, D., & Burgess, N. D. (2022). Community Monitoring of Natural Resource Systems and the Environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 637-670. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-022325>
- De Camargo, E. T., Spanhol, F. A., Slongo, J. S., Da Silva, M. V. R., Pazinato, J., De Lima Lobo, A. V., Coutinho, F. R., Pfrimer, F. W. D., Lindino, C. A., Oyamada, M. S., & Martins, L. D. (2023). Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review. *Sensors*, 23(9), 4424. <https://doi.org/10.3390/s23094424>
- Dominguez-Rendón, E., Villada-Canela, M., & Muñoz-Pizza, D. M. (2024). “Community strengthening through citizen monitoring of water quality: A systematic review”. *PLOS ONE*, 19(7), e0305723. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305723>
- Etikan, I. (2016). Comparison of Convenience Sampling and Purposive Sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20160501.11>

- Figueiredo, P., & Perkins, P. E. (2013). Women and water management in times of climate change: Participatory and inclusive processes. *Journal of Cleaner Production*, 60, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.025>
- Flores-Díaz, A. C., Ramos-Escobedo, M. G., Ruiz-Córdova, S. S., Manson, R., Aranda, E., & Deutsch, W. G. (2021). *MONITOREO COMUNITARIO DEL AGUA: RETOS Y APRENDIZAJE DESDE LA PERSPECTIVA DE GLOBAL WATER WATCH-MÉXICO*.
- Fonseca, K., Espitia, E., Breuer, L., & Correa, A. (2022a). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Fonseca, K., Espitia, E., Breuer, L., & Correa, A. (2022b). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Fonseca, K., Espitia, E., Breuer, L., & Correa, A. (2022c). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Fonseca, K., Espitia, E., Breuer, L., & Correa, A. (2022d). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>
- Fraisl, D., Hager, G., Bedessem, B., Gold, M., Hsing, P.-Y., Danielsen, F., Hitchcock, C. B., Hulbert, J. M., Piera, J., Spiers, H., Thiel, M., & Haklay, M. (2022). Citizen science in environmental and ecological sciences. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 64. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00144-4>
- Fritz, S., See, L., & Grey, F. (2022). The grand challenges facing environmental citizen science. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1019628. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1019628>
- Gallardo, M. V. I., Helsley, J., Pinel, S., Ammon, J., Rodríguez, F. V. L., & Wendland, K. (2013). Collaborative Community-based Governance in a Transboundary Wetland System in

- the Ecuadorian Andes: Opportunities and Challenges at a Proposed Ramsar Site. *Mountain Research and Development*, 33(3), 269-279. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00120.1>
- Gansauer, G., Haggerty, J., & Dunn, J. (2023). Public Water System Governance in Rural Montana, USA: A ‘Slow drip’ on Community Resilience. *Society & Natural Resources*, 36(10), 1257-1276. <https://doi.org/10.1080/08941920.2023.2212363>
- Giabbanelli, P. J., & Nápoles, G. (Eds.). (2024). *Fuzzy Cognitive Maps: Best Practices and Modern Methods*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-48963-1>
- Gray, S. A., Gray, S., Cox, L. J., & Henly-Shepard, S. (2013). Mental Modeler: A Fuzzy-Logic Cognitive Mapping Modeling Tool for Adaptive Environmental Management. *2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences*, 965-973. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2013.399>
- Guest, G., Namey, E., & Chen, M. (2020). A simple method to assess and report thematic saturation in qualitative research. *PLOS ONE*, 15(5), e0232076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232076>
- Gutiérrez Vilela, M., & Ldeón Quispe, W. C. (2024). EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LAS SUBCUENCAS ACHAMAYO Y SHULLCAS (JUNÍN-PERÚ) UTILIZANDO EL ÍNDICE DE CALIDAD CCME. *Ecología Aplicada*, 23(1), 87-101. <https://doi.org/10.21704/rea.v23i1.2168>
- Hennink, M., & Kaiser, B. N. (2022). Sample sizes for saturation in qualitative research: A systematic review of empirical tests. *Social Science & Medicine*, 292, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114523>
- Herrera-Franco, G., Fornés, J. M., Bravo-Montero, Lady, Montalván, F. J., & Carrión-Mero, P. (2025). Water governance PESTEL/SWOT-TOWS analysis in the Andean Community of Nations (ACN). *Environmental Challenges*, 20, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101249>
- Higman, R., Bangert, D., & Jones, S. (2019). Three camps, one destination: The intersections of research data management, FAIR and Open. *Insights the UKSG Journal*, 32, 18. <https://doi.org/10.1629/uksg.468>

- Jan, F., Min-Allah, N., & Düşteğör, D. (2021). IoT Based Smart Water Quality Monitoring: Recent Techniques, Trends and Challenges for Domestic Applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- Karatzinis, G. D., & Boutalis, Y. S. (2025). A Review Study of Fuzzy Cognitive Maps in Engineering: Applications, Insights, and Future Directions. *Eng*, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/eng6020037>
- Kottas, T. L., Boutalis, Y. S., & Christodoulou, M. A. (2007). Fuzzy cognitive network: A general framework. *Intelligent Decision Technologies*, 1(4), 183-196. <https://doi.org/10.3233/IDT-2007-1402>
- Lal, K., Menon, S., Noble, F., & Arif, K. M. (2024). Low-cost IoT based system for lake water quality monitoring. *PLOS ONE*, 19(3), e0299089. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299089>
- Laureano-Cruces, A. L., Ramírez-Rodríguez, J., & Terán-Gilmore, A. (2004). Evaluation of the Teaching-Learning Process with Fuzzy Cognitive Maps. En C. Lemaître, C. A. Reyes, & J. A. González (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA 2004* (Vol. 3315, pp. 922-931). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30498-2_92
- Machado, A. V. M., Dos Santos, J. A. N., Alves, L. M. C., & Quindeler, N. D. S. (2019). Contributions of Organizational Levels in Community Management Models of Water Supply in Rural Communities: Cases from Brazil and Ecuador. *Water*, 11(3), 537. <https://doi.org/10.3390/w11030537>
- Martínez-Moscoso, A., & Abril Ortiz, A. (2020). Las guardianas del agua y su participación en la gestión comunitaria de los recursos hídricos. Un análisis de la normativa ecuatoriana. *Foro: Revista de Derecho*, (34), 61-84. <https://doi.org/10.32719/26312484.2020.34.4>
- Mohamad, M. H. B., Rahman, S. M. B. A., & Ahmad, A. A. (2024). Smart Water Quality Monitoring with the Implementation of IoT. En N. A. S. Abdullah, T. Sian Hoon, N. Md Shamsudin, & R. Legino (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Innovation & Entrepreneurship in Computing, Engineering & Science Education (InvENT 2024)* (Vol. 117, pp. 276-286). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-589-8_25

- Molina, C. A., Quiroz-Moreno, C., Jarrín-V., P., Díaz, M., Yugsi, E., Pérez-Galarza, J., & Baldeón-Rojas, L. (2024). Bacterial community assessment of drinking water and downstream distribution systems in highland localities of Ecuador. *Journal of Water and Health*, 22(3), 536-549. <https://doi.org/10.2166/wh.2024.290>
- Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Célleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásquez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023a). Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary assessment. *Science of The Total Environment*, 892, 164373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164373>
- Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Célleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásquez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023b). Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary assessment. *Science of The Total Environment*, 892, 164373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164373>
- Mosquera, G. M., Hofstede, R., Bremer, L. L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Célleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásquez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023c). Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary assessment. *Science of The Total Environment*, 892, 164373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164373>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of The Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- Najar, N., & Persson, K. M. (2022). Assessing Climate Adaptation and Flood Security Using a Benchmark System: Some Swedish Water Utilities as Good Learning Examples. *Water*, 14(18), 2865. <https://doi.org/10.3390/w14182865>
- Naloufi, M., Abreu, T., Souihi, S., Therial, C., Rodrigues, N. A. D. P., Le Goff, A. G., Saad, M., Vinçon-Leite, B., Dubois, P., Delarbre, M., Kennouche, P., & Lucas, F. S. (2024). Long-

- Term Stability of Low-Cost IoT System for Monitoring Water Quality in Urban Rivers. *Water*, 16(12), 1708. <https://doi.org/10.3390/w16121708>
- Nápoles, G., Ranković, N., & Salgueiro, Y. (2023). On the interpretability of Fuzzy Cognitive Maps. *Knowledge-Based Systems*, 281, 111078. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111078>
- Neale, P., Brown, S., Sill, T., Cawood, A., Tzortziou, M., Park, J., Lee, M.-S., & Paquette, B. (2024). Participatory science methods to monitor water quality and ground truth remote sensing of the Chesapeake Bay. *PLOS ONE*, 19(10), e0305505. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305505>
- Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L., & Rufino, M. C. (2019). Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *Science of The Total Environment*, 693, 133531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J. D., Céleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P., & De Bièvre, B. (2018). High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5(1), 180080. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>
- O'Connor, R. J., De Leo, G. A., & Ardoin, N. M. (2025). Community scientists provide knowledge and public education and help enforce environmental regulations in social-ecological systems. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 91. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02066-x>
- Özesmi, U., & Özesmi, S. L. (2004). Ecological models based on people's knowledge: A multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological Modelling*, 176(1-2), 43-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027>
- Ozolinčiūtė, E., Bülow, W., Bjelobaba, S., Gaižauskaitė, I., Krásničan, V., Dlabolová, D., & Umbrasaitė, J. (2022). Guidelines for Research Ethics and Research Integrity in Citizen Science. *Research Ideas and Outcomes*, 8, e97122. <https://doi.org/10.3897/rio.8.e97122>
- Pacheco Peña, D., Lema Quinga, L., & Yáñez Moretta, P. (2023). Cogestión del agua entre actores públicos y comunitarios como herramienta de adaptación al cambio climático

- global: El caso de la Comuna Santa Clara de San Millán, DM Quito. *La Granja*, 37(1), 44-57. <https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.04>
- Palinkas, L. A., Horwitz, S. M., Green, C. A., Wisdom, J. P., Duan, N., & Hoagwood, K. (2015). Purposeful Sampling for Qualitative Data Collection and Analysis in Mixed Method Implementation Research. *Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research*, 42(5), 533-544. <https://doi.org/10.1007/s10488-013-0528-y>
- Perugachi Cachimuel, J. M., & Cachipuendo Ulcuango, C. (2020). *La lucha por el agua: Gestión Comunitaria del Proyecto de Agua Potable Pesillo-Imbabura*. Editorial Abya-Yala. <https://doi.org/10.7476/9789978105764>
- Pinos, J. (2020). Multiple water governance models: Ecuador as a case study. *MASKANA*, 11(1), 74-80. <https://doi.org/10.18537/mskn.11.01.08>
- Ramírez, S. B., Van Meerveld, I., & Seibert, J. (2023a). Citizen science approaches for water quality measurements. *Science of The Total Environment*, 897, 165436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165436>
- Ramírez, S. B., Van Meerveld, I., & Seibert, J. (2023b). Citizen science approaches for water quality measurements. *Science of The Total Environment*, 897, 165436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165436>
- Ramírez, S. B., Van Meerveld, I., & Seibert, J. (2023c). Citizen science approaches for water quality measurements. *Science of The Total Environment*, 897, 165436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165436>
- Reyes-García, V., Tofighi-Niaki, A., Austin, B. J., Benyei, P., Danielsen, F., Fernández-Llamazares, Á., Sharma, A., Soleymani-Fard, R., & Tengö, M. (2022). Data Sovereignty in Community-Based Environmental Monitoring: Toward Equitable Environmental Data Governance. *BioScience*, 72(8), 714-717. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac048>
- Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55), 83169-83190. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21709-6>
- Robinson, D., Delany, J., & Sugden, H. (2024). Beyond Science: Exploring the Value of Co-created Citizen Science for Diverse Community Groups. *Citizen Science: Theory and Practice*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.5334/cstp.682>

- Roldán-Reascos, G., Pérez-Lamela, C., De Blas, E., & Simal-Gandara, J. (2024). Water quality indexes and water quality population perception in a rural area in Ecuador. *Water Practice & Technology*, 19(2), 580-593. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.021>
- Rosińska, W., Jurasz, J., Przestrzelska, K., Wartalska, K., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate change's ripple effect on water supply systems and the water-energy nexus – A review. *Water Resources and Industry*, 32, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100266>
- Salberg, V. M., Booth, A. M., Jahren, S., & Novo, P. (2022). Assessing Fuzzy Cognitive Mapping as a participatory and interdisciplinary approach to explore marine microfiber pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 179, 113713. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113713>
- Sarmiento, I., Cockcroft, A., Dion, A., Belaid, L., Silver, H., Pizarro, K., Pimentel, J., Tratt, E., Skerritt, L., Ghadirian, M. Z., Gagnon-Dufresne, M.-C., & Andersson, N. (2024a). Fuzzy cognitive mapping in participatory research and decision making: A practice review. *Archives of Public Health*, 82(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s13690-024-01303-7>
- Sarmiento, I., Cockcroft, A., Dion, A., Belaid, L., Silver, H., Pizarro, K., Pimentel, J., Tratt, E., Skerritt, L., Ghadirian, M. Z., Gagnon-Dufresne, M.-C., & Andersson, N. (2024b). Fuzzy cognitive mapping in participatory research and decision making: A practice review. *Archives of Public Health*, 82(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s13690-024-01303-7>
- Sarmiento, I., Dion, A., Šajna, M., & Andersson, N. (2024). Four analysis moments for fuzzy cognitive mapping in participatory research. *Global Health Action*, 17(1), 2430024. <https://doi.org/10.1080/16549716.2024.2430024>
- Schuerkamp, R., & Giabbanelli, P. J. (2024). Analysis of Fuzzy Cognitive Maps. En P. J. Giabbanelli & G. Nápoles (Eds.), *Fuzzy Cognitive Maps* (pp. 87-104). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48963-1_5
- Serbe-Kamp, É., Bemme, J., Pollak, D., & Mayer, K. (2023). Open Citizen Science: Fostering open knowledge with participation. *Research Ideas and Outcomes*, 9, e96476. <https://doi.org/10.3897/rio.9.e96476>
- Shahvi, S., Mellander, P.-E., Jordan, P., & Fenton, O. (2021). A Fuzzy Cognitive Map method for integrated and participatory water governance and indicators affecting drinking

- water supplies. *Science of The Total Environment*, 750, 142193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142193>
- Shao, G. P., & Bishop, I. J. (2025). Citizen science in river monitoring: A systematic literature review of the whys and hows. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1609084. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1609084>
- Sharma, S., Mishra, D., Yadav, A., Gami, B., & Madhan, E. S. (2026). An Intelligent, low-cost water quality monitoring system with on-device machine learning and cloud integration. *Scientific Reports*, 16(1), 11106. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37287-3>
- Shemer, H., Wald, S., & Semiat, R. (2023). Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. *Membranes*, 13(6), 612. <https://doi.org/10.3390/membranes13060612>
- Stankiewicz, J., König, A., Pickar, K., & Weiss, S. (2023). How Certain is Good Enough? Managing Data Quality and Uncertainty in Ordinal Citizen Science Data Sets for Evidence-Based Policies on Fresh Water. *Citizen Science: Theory and Practice*, 8(1), 39. <https://doi.org/10.5334/cstp.592>
- Starkey, E., Jones, A., Ochoa-Rodriguez, S., Mahajan, S., Wei, C.-L., Chen, P.-C., Liu, S.-Y., Wang, L.-P., & Walsh, C. L. (2024). Practicalities of community-led continuous water quality monitoring: Lessons from Taiwan and UK pilots. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1371048. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1371048>
- Tengö, M., Austin, B. J., Danielsen, F., & Fernández-Llamazares, Á. (2021). Creating Synergies between Citizen Science and Indigenous and Local Knowledge. *BioScience*, 71(5), 503-518. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab023>
- Thuermer, G., Guardia, E. G., Reeves, N., Corcho, O., & Simperl, E. (2023). Data Management Documentation in Citizen Science Projects: Bringing Formalisation and Transparency Together. *Citizen Science: Theory and Practice*, 8(1), 25. <https://doi.org/10.5334/cstp.538>
- Trevathan, J., & Schmidtke, S. (2022). Open-source Internet of Things remote aquatic environmental sensing. *HardwareX*, 12, e00336. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00336>
- Vicente-Saez, R., & Martinez-Fuentes, C. (2018). Open Science now: A systematic literature review for an integrated definition. *Journal of Business Research*, 88, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.12.043>

- Villagómez-Reséndiz, R. (2026). De los páramos a la urbe: Historia ambiental, fuentes de agua y gobernanza más que humana para la ciudad de Quito, Ecuador. *Historia Crítica*, (99). <https://doi.org/10.7440/historicrit99.2026.04>
- Warner, S., Blanco Ramírez, S., De Vries, S., Marangu, N., Ateba Bessa, H., Toranzo, C., Imaralieva, M., Abrate, T., Kiminta, E., Castro, J., De Souza, M. L., Ghaffar Memon, A., Loiselle, S., & Juanah, M. S. E. (2024). Empowering citizen scientists to improve water quality: From monitoring to action. *Frontiers in Water*, 6, 1367198. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1367198>
- White, C. T., Mitsova, H., BenDor, T. K., Foy, K., Pala, O., Vukomanovic, J., & Meentemeyer, R. K. (2021). Spatially Explicit Fuzzy Cognitive Mapping for Participatory Modeling of Stormwater Management. *Land*, 10(11), 1114. <https://doi.org/10.3390/land10111114>
- World Health Organization (Ed.). (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth edition incorporating the first and second addenda). World Health Organization.
- Yanou, M. P., Ros-Tonen, M. A. F., Reed, J., Moombe, K., & Sunderland, T. (2023). Integrating local and scientific knowledge: The need for decolonising knowledge for conservation and natural resource management. *Heliyon*, 9(11), e21785. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21785>
- Zegarra Méndez, E., NU. CEPAL, Brown, E., Jouravlev, A., Küffner, U., & Ballesteros, M. (2005). *Administración del agua en América Latina: Situación actual y perspectivas*. CEPAL.
- Zvobgo, L., Johnston, P., Williams, P. A., Trisos, C. H., Simpson, N. P., & Global Adaptation Mapping Initiative Team. (2022). The role of indigenous knowledge and local knowledge in water sector adaptation to climate change in Africa: A structured assessment. *Sustainability Science*, 17(5), 2077-2092. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01118-x>

