



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS

NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO
HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL
SECTOR SALACHE, PROVINCIA COTOPAXI”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieros Ambientales.

Autores:

Sarabia Lozada Damián Josue
Toaquiza Tigasi Wilma Verónica

Tutora:

Fonseca Largo Kalina Marcela

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO - 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Sarabia Lozada Damián Josue, con cédula de ciudadanía No. 0550091219 y Toaquiza Tigasi Wilma Veronica, con cédula de ciudadanía No. 0550105324, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, 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, 03 de agosto del 2026

Damián Josue Sarabia Lozada
C.C: 0550091219
ESTUDIANTE

Wilma Veronica Toaquiza Tigasi
C.C: 0550105324
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **SARABIA LOZADA DAMIÁN JOSUE**, identificado con cédula de ciudadanía **0550091219** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL 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. - **EL 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 VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, 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

Tutor: Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

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, **EL 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 **EL 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 **EL 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 **EL 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 **EL 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, 3 de agosto de 2026.

Damián Josue Sarabia Lozada
EL 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 **TOAQUIZA TIGASI WILMA VERÓNICA**, identificada con cédula de ciudadanía **0550105324** 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 VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”** 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

Tutor: Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

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, 3 de agosto del 2026.

Wilma Verónica Toaquizza Tigasi
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 con el título:

“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”, de Damián Josue Sarabia Lozada y Wilma Verónica Toaquiza Tigasi, 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, 3 de agosto del 2026

Ing. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.
C.C: 1723534457
DOCENTE TUTOR

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, los postulantes: Damián Josue Sarabia Lozada y Wilma Verónica Toaquiza Tigasi, con el título del Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR SALACHE, PROVINCIA DE COTOPAXI”** ha 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, 3 de agosto del 2026

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

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

Ing. Vincent Benjamín Velastegui Tapia, Mg.
C.C: 0502547649
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la vida, fortaleza y oportunidad de cumplir el sueño de formarme profesionalmente para servir a los demás y contribuir al cuidado del ambiente y de la sociedad.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme una formación académica y humana que será fundamental en mi vida profesional. A mis docentes, por compartir sus conocimientos y experiencias; y, de manera especial, a mi tutora, Dra. Kalina Fonseca, por su orientación, dedicación, paciencia y acompañamiento durante esta investigación.

A mi amiga y compañera de investigación y a la comunidad del sector Salache, por su compromiso, participación, disposición y colaboración, fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A mis padres, Paul Sarabia y Tania Lozada, por ser mi mayor respaldo. Gracias por sus sacrificios, esfuerzo, consejos y por creer siempre en mí. Esta meta también les pertenece; llevaré conmigo su ejemplo y procuraré honrar todo lo que han hecho por mí.

A todos ustedes, mi sincera gratitud por ser parte de este logro.

Damián Josue Sarabia Lozada

AGRADECIMIENTO

Al finalizar esta etapa tan importante de mi vida, siento que decir simplemente “gracias” no es suficiente para expresar todo lo que llevo en el corazón.

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado la vida, la fortaleza y la oportunidad de llegar hasta aquí. Por sostenerme en los momentos en los que sentí que ya no podía más y por permitirme cumplir este sueño que durante tantos años imaginé.

A mis padres, a mis hermanos, gracias por ser mi mayor apoyo. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma llegué a dudar de mis capacidades. Gracias por cada sacrificio que hicieron para que pudiera estudiar, por cada palabra de aliento y por estar presentes en cada paso de este camino. Quizá nunca pueda devolverles todo lo que han hecho por mí, pero espero que este logro sea una pequeña forma de decirles cuánto los amo y cuánto valoro todo su esfuerzo.

Agradezco especialmente al Ing. Kali, por su apoyo, orientación y enseñanzas durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por ser parte importante de este logro.

Wilma Veronica Toaquiza Tigasi

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, por sostenerme en os momentos difíciles y permitirme alcanzar esta meta que un día soñé.

A mis amados Papi Huguito y Mamá Sarita, por el amor que dieron desde pequeño. Aunque ya no estén conmigo, viven en mi corazón y los llevo siempre como mis angelitos de a guarda.

A mi querida Mamita Yeta, Marieta Lozada, por su amor, sus cuidados, y cada sacrificio que ha hecho por mí. Su ejemplo ha sido una inspiración y este logro también lleva un poco de todo lo que ella me ha dado.

A mis Padres, Paul Sarabia y Tania Lozada, y a mis hermanos, por ser mi mayor fortaleza y motivación; por su amor, sacrificio y compañía, que me inspiran a seguir adelante, superarme y luchar cada día por un futuro mejor para nuestra familia.

A mis tíos y primos, por su cariño, consejos y por estar presentes en cada etapa de mi vida. A mi novia, por caminar a mi lado, creer en mí y enseñarme que, con amor, esfuerzo y perseverancia, podemos seguir construyendo nuestros sueños.

Damián Josue Sarabia Lozada

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, por haberme dado la fuerza para continuar cuando el cansancio, las dudas y los obstáculos parecían ser más grandes que mis propias fuerzas. Gracias por permitirme llegar hasta este momento y cumplir uno de los sueños más importantes de mi vida.

A mí mamá Delia, mi mayor ejemplo de amor, fortaleza y sacrificio. Gracias por estar a mi lado en cada momento, por creer en mí cuando yo dudaba, por tus palabras de aliento y por nunca dejarme sentir que estaba sola.

A mi papá Néstor, por su esfuerzo, sus consejos y por enseñarme a no rendirme ante las dificultades. Gracias por ser parte fundamental de este camino y por apoyarme para alcanzar mis sueños.

A mi querida hermana Lourdes Toaquiza, que con su esfuerzo, dedicación y motivación ha sido una gran inspiración para demostrar que su hermana menor es una persona fuerte y valiente. A mis hermanos Alex, Stalyn, Matias, Javier y Tania, que con su gran cariño y felicidad han sido pilares de motivación.

Este logro lleva mi nombre, pero también lleva sus sacrificios, su amor y todo lo que hicieron por mí.

Wilma Veronica Toaquiza Tigasi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

**TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE CONSUMO
HUMANO BASADO EN LA CIENCIA ABIERTA Y CIUDADANA EN EL SECTOR
SALACHE, PROVINCIA COTOPAXI”**

Autores:

Sarabia Lozada Damián Josue
Toaquiza Tigasi Wilma Veronica

RESUMEN

A nivel nacional, en los sectores rurales la distribución y protección del agua para consumo humano y riego son administradas por juntas comunitarias conformadas por usuarios. Sin embargo, estas organizaciones enfrentan limitaciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales (PESTEL) que dificultan garantizar agua segura. Un ejemplo son las comunidades del sector Salache, incluido el campus de la Universidad Técnica de Cotopaxi, donde existen limitaciones en el acceso al agua y ausencia de monitoreo permanente de su calidad. En este contexto, la investigación evaluó la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo basado en ciencia abierta y participación ciudadana. Se empleó un enfoque mixto, integrando información técnica y percepción comunitaria. Mediante revisión bibliográfica se identificaron los principales factores PESTEL relacionados con la disponibilidad y calidad del agua. Posteriormente, mediante muestreo no probabilístico intencional con selección progresiva de participantes clave, se seleccionaron veinte líderes barriales de las 4 comunidades del sector Salache para participar en talleres. Los conceptos fueron adaptados al contexto comunitario y transformados en un Mapa Cognitivo Difuso (FCM). Los participantes establecieron relaciones causales y ponderaron su influencia mediante un sistema visual tipo semáforo. El mapa fue analizado con Mental Modeler utilizando teoría de grafos para determinar grados de entrada, salida, centralidad y densidad. Además, mediante inferencia difusa se simuló tres escenarios: peor caso, implementación del sistema con hardware libre ESP32 y ampliación del almacenamiento de agua. Los resultados evidenciaron que la dimensión ecológica (32,58%) fue la más influyente, seguida de la social (17,50%). La gestión deficiente del manejo comunitario del agua presentó la mayor centralidad (CI=60,79). El sistema alcanzó una densidad de 0,87 con 1467 conexiones. El escenario óptimo mejoró 95,45% de las variables. Finalmente, se confirmó la viabilidad del sistema y se elaboró un manual metodológico para su implementación comunitaria.

Palabras clave: ciencia ciudadana, ciencia abierta, monitoreo de calidad del agua, Mapas Cognitivos Difusos, gestión comunitaria del agua.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

**THEME: “FEASIBILITY ASSESSMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF A
SYSTEM FOR MONITORING WATER FOR HUMAN CONSUMPTION BASED ON
OPEN SCIENCE AND CITIZEN SCIENCE IN THE SALACHE SECTOR, COTOPAXI
PROVINCE”**

Auhors:

Sarabia Lozada Damián Josue
Toaquiza Tigasi Wilma Veronica

ABSTRACT

Nationally, in rural areas, the distribution and protection of water for human consumption and irrigation are managed by community boards made up of users. However, these organizations face political, economic, social, technological, ecological, and legal (PESTEL) limitations that hinder their ability to guarantee safe water. An example of this is the communities in the Salache sector, including the campus of the Technical University of Cotopaxi, where there are limitations in access to water and a lack of continuous monitoring of its quality. In this context, the research evaluated the feasibility of implementing a monitoring system based on open science and citizen participation. A mixed-methods approach was used, integrating technical information and community perceptions. Through a literature review, the main PESTEL factors related to water availability and quality were identified. Subsequently, using purposive non-probability sampling with progressive selection of key participants, twenty community leaders from Salache Grande, Salache Rumipamba, Salache Angamarca, and Taniloma were selected to participate in workshops. The concepts were adapted to the community context and transformed into a Fuzzy Cognitive Map (FCM). Participants established causal relationships and weighed their influence using a traffic light-type visual system. The map was analyzed using Mental Modeler with graph theory to determine degrees of entry, degrees of exit, centrality, and density. Additionally, three scenarios were simulated using fuzzy inference: worst-case scenario, implementation of the system with open-source ESP32 hardware, and expansion of water storage. The results showed that the ecological dimension (32.58%) was the most influential, followed by the social dimension (17.50%). Poor community water management exhibited the highest centrality (CI=60.79). The system reached a density of 0.87 with 1467 connections. The optimal scenario improved 95.45% of the variables. Finally, the system's viability was confirmed, and a methodological manual for its community implementation was developed.

KEYWORDS: Citizen science, Open science, Water quality monitoring, Fuzzy cognitive maps, Community water management.

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
AGRADECIMIENTO	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA.....	xi
DEDICATORIA.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	6
4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	8
5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	9
6 OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
6.1 Objetivo General.....	11

6.2	Objetivos Específicos	12
7	ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	12
8	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.....	13
8.1	Calidad del agua para consumo humano en comunidades rurales	13
8.1.1	Parámetros para la evaluación de la calidad del agua de consumo humano	14
8.1.2	Características de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano	15
8.1	<i>Manejo de agua en sectores rurales: rol de Juntas Administradoras.....</i>	16
8.1.1	Importancia del agua segura para la salud pública	16
8.1.2	Principales amenazas a la calidad del agua de consumo humano	17
8.2	<i>Monitoreo comunitario e la calidad del agua.</i>	18
8.3	<i>Concepto y evolución del monitoreo comunitario de la calidad del agua</i>	19
8.4	<i>Participación comunitaria en la gestión del agua</i>	20
8.5	<i>Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua</i>	21
8.6	<i>Experiencias exitosas de monitoreo comunitario del agua.....</i>	21
8.7	<i>Ciencia abierta para la gestión del recurso hídrico</i>	22
8.8	<i>Principios de la ciencia abierta</i>	22
8.9	<i>Acceso abierto a datos ambientales</i>	23

8.10	<i>Plataformas colaborativas para el monitoreo del agua</i>	23
8.11	<i>Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua</i>	24
8.12	<i>Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo</i>	25
8.13	<i>Sensores abiertos y hardware libre para monitoreo del agua</i>	25
8.14	<i>Internet de las Cosas (IoT) aplicado al monitoreo hídrico</i>	26
8.15	<i>Plataformas para la visualización de datos</i>	27
8.16	<i>Retos técnicos del monitoreo en comunidades rurales</i>	27
8.16.1	Mapas Cognitivos Difusos (FCM)	28
8.16.2	Concepto de los Mapas Cognitivos Difusos.....	29
8.16.3	Componentes de un FCM.....	29
8.16.4	Relaciones causales y pesos difusos.....	30
8.16.5	Aplicación de los FCM en la gestión ambiental.....	30
8.17	<i>Uso de Mental Modeler para la construcción de mapas cognitivos</i>	31
8.17.1	Análisis PESTEL aplicado a la gestión del agua.....	32
8.17.2	Fundamentos del análisis PESTEL	32
8.17.3	Dimensión política.....	33
8.17.4	Dimensión económica	33

8.17.5 Dimensión social	33
8.17.6 Dimensión tecnológica	34
8.17.7 Dimensión ecológica	34
8.17.8 Dimensión legal.....	34
8.18 <i>Aplicación del PESTEL en la gestión comunitaria del agua</i>	35
8.18.1 Gobernanza del agua	35
8.18.2 Gestión comunitaria del agua	36
8.18.3 Marco legal ecuatoriano	36
8.18.4 Participación de actores locales	37
9 HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	38
9.1 Hipótesis	38
9.1.1 Hipótesis alternativas (Ha)	38
9.1.2 Hipótesis nula (H0)	38
9.2 Pregunta de investigación.....	38
10 ÁREA DE ESTUDIO	38
10.1 Diseño metodológico.....	41
10.2 Enfoque cualitativo.....	42
10.3 Enfoque cuantitativo.....	43

10.4	Variables de estudio	44
•	Variable dependiente	45
•	Variable Independiente.....	45
•	Dimensiones de análisis	45
10.5	Método.....	46
10.5.1	Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Map, FCM)	46
10.6	Técnicas.....	47
10.6.1	Muestreo no probabilístico de tipo intencional con selección progresiva de participantes clave	47
10.7	Fases de investigación	50
10.7.1	<i>Adaptación de conceptos al contexto comunitario.....</i>	50
10.7.2	<i>Taller participativo con la comunidad</i>	51
10.7.3	<i>Transformación conceptos complejos a simples</i>	51
10.7.4	<i>Construcción del Mapa Cognitivo Difuso (FCM).....</i>	52
10.7.5	<i>Evaluación del Mapa Cognitivo Difuso</i>	53
10.7.6	<i>Análisis mediante teoría de grafos</i>	53
10.7.7	<i>Inferencia difusa y simulación de escenarios.....</i>	57

10.7.8 Diseño del manual para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana	60
10.8 Diseño estadístico	61
10.8.1 Estadístico descriptivo de los índices del mapa cognitivo difuso de la teoría de grafos	62
10.8.2 Justificación del tamaño muestral para el taller participativo	62
11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
11.1 Identificación de los principales conceptos PESTEL que inciden en la disponibilidad de agua segura, a partir de la adaptación de la revisión bibliográfica.....	64
11.2 Resultados de la transformación de conceptos complejos a simples	67
11.3 Conceptos de las comunidades	67
11.4 Identificación de los principales conceptos PESTEL que afectan la disponibilidad de agua segura en el sector Salache.....	68
11.5 Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL del sector Salache.	69
11.5.1 Teoría de grafos	69
11.5.2 Análisis del mapa cognitivo difuso.....	80

11.6	Inferencia Difusa	82
11.6.1	Análisis de escenarios: escenario de peor caso (worst-case scenario).	82
11.6.2	<i>Análisis del mejor escenario: Implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua participativo con la comunidad.</i>	88
11.6.3	<i>Análisis del mejor escenario: Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable para garantizar el abastecimiento ante el incremento de la demanda de la población.</i>	93
11.7	Manual metodológico para el diagnóstico comunitario	100
11.7.1	Diseño del manual metodológico	100
11.7.2	Objetivo del manual	100
11.7.3	Fundamentación para la elaboración del manual	101
11.7.4	Estructura metodológica del manual	101
11.7.5	Procedimiento para el diagnóstico comunitario	103
11.7.6	Procedimiento para aplicar el análisis PESTEL	104
11.7.7	Procedimiento para la implementación del sistema de monitoreo	104
11.7.8	Interpretación de la información obtenida.....	105
11.7.9	Utilización de la información para la toma de decisiones.....	105
11.7.10	Adaptación del manual al contexto del sector Salache	106

11.7.11 Resultado de la elaboración del manual	107
11.8 Guía para la ejecución del taller	107
11.9 Respuesta a la pregunta de investigación	108
11.10 Comprobación de hipótesis	110
12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
12.1 Conclusiones.....	111
12.2 Recomendaciones	114
13 BIBLIOGRAFÍA	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los beneficiarios del proyecto	8
Tabla 2. Sistema de tareas para cada objetivo	12
Tabla 3. Adaptación de conceptos PESTEL obtenidos de revisión bibliográfica	64
Tabla 4. Conceptos identificados	70
Tabla 5. Análisis del mapa cognitivo social a partir de la teoría de grafos	80
Tabla 6. Escenario del peor caso.....	83
Tabla 7. Escenario del mejor caso: Implementación de un sistema de monitoreo	90
Tabla 8. Escenario del mejor: Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable para garantizar el abastecimiento ante el incremento de la demanda de la población	93

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Del Sector Salache	39
Figura 2:Figura 2. Ubicación Del Sector Salache. Elaborada Por La Comunidad	40
Figura 3: Metodología.....	49
Figura 4: Conceptos Simples	67
Figura 5: Gráfico De Pastel Sobre El Porcentaje De Conceptos Pestel.....	68
Figura 6: Mapa Cognitivo Difuso Del Sistema Según El Grado De Salida	79
Figura 7: Mapa Cognitivo Difuso	82

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título

Evaluación de la viabilidad para la implementación de un sistema de monitoreo de agua de consumo humano basado en la ciencia abierta y ciudadana en el sector Salache, Provincia de Cotopaxi.

Lugar de ejecución.

Sector Salache, Eloy Alfaro, Cotopaxi.

Institución, unidad académica y carrera que auspicia

Universidad técnica de Cotopaxi, Facultad de ciencias agropecuarias y de recursos naturales, Ingeniería ambiental

Nombres de equipo de investigadores

Tutor: Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

Lector 1 (presidente): Ing. Moreno Avila Andrés Sebastián.

Lector 2: Lic. Jaime Rene Lema Pillalaza, Mg.

Lector 3: Ing. Vincent Benjamín Velastegui Tapia, Mg.

Autores: Damián Josue Sarabia Lozada y Wilma Verónica Toaquiza Tigasi

Área de Conocimiento.

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 es un recurso natural indispensable para la vida, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo sostenible. Su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas es esencial para proteger la salud humana, garantizar la seguridad alimentaria y promover el bienestar de la población (Organización Mundial de la Salud 2022). Debido a su importancia, la Organización Mundial de la Salud (ONU) reconoció el acceso al agua potable y al saneamiento como un derecho humano e incorporó a través del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6), el compromiso de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua para todas las personas (Organización de las Naciones Unidas 2015).

A pesar de la importancia del agua para el desarrollo humano, su calidad se encuentra cada vez más amenazada por la contaminación, el crecimiento poblacional, la expansión de las actividades productivas y los efectos del cambio climático. Estas presiones incrementan el riesgo de deterioro de las fuentes hídricas y dificultan el acceso a agua segura, especialmente en comunidades rurales. Ante este escenario, la UNESCO destaca la necesidad de fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico mediante información confiable y sistemas de monitoreo que permitan apoyar la toma de decisiones y prevenir riesgos para la población (Organización Mundial de la Salud 2022b; UNESCO 2024).

El deterioro de la calidad del agua evidencia la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo que permitan generar información oportuna para la toma de decisiones. Los monitoreos tradicionales suelen ser puntuales y con cobertura limitada, lo que dificulta la detección temprana de problemas ambientales. La OMS y diversos estudios científicos recientes destacan la importancia de fortalecer sistemas de vigilancia permanente que integren tecnologías accesibles y participativas para mejorar la gestión del recurso hídrico y reducir los riesgos asociados al consumo

de agua contaminada (Organización Mundial de la Salud 2022).

La ciencia ciudadana constituye un enfoque participativo que involucra a la población en la generación, recopilación y análisis de datos científicos, fortaleciendo el vínculo entre la comunidad y la investigación académica. En el ámbito ambiental, este enfoque permite ampliar la cobertura del monitoreo y mejorar la disponibilidad de información en territorios con limitaciones técnicas o institucionales. Diversos estudios destacan que la participación ciudadana en el monitoreo de la calidad del agua contribuye a la educación ambiental, el empoderamiento comunitario y la toma de decisiones informadas en la gestión del recurso hídrico (Bonney et al. 2016; UNESCO 2024).

La ciencia abierta promueve el acceso libre a los datos, metodologías y resultados de investigación, con el fin de fortalecer la transparencia, la colaboración y la generación colectiva del conocimiento. En el ámbito de la gestión del agua, este enfoque permite que la información sobre la calidad del recurso hídrico sea accesible para comunidades, investigadores e instituciones, facilitando la toma de decisiones informadas y oportunas. Según la UNESCO, la ciencia abierta contribuye a democratizar el conocimiento científico y a mejorar la respuesta frente a problemas ambientales complejos como la contaminación del agua (UNESCO 2021).

El desarrollo de tecnologías de código abierto y el Internet de las cosas (IoT) ha permitido implementar sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo, capaces de registrar parámetros de calidad del agua en tiempo real. Estas tecnologías facilitan la recolección continua de datos y su transmisión para el análisis y la toma de decisiones. Según estudios recientes, su aplicación en el monitoreo hídrico mejora la accesibilidad a la información y reduce los costos operativos, lo que las convierte en una alternativa viable para comunidades rurales (Essamlali, Nhaila, y El Khaili 2024; UNESCO 2024).

Al nivel global, la humanidad ha entrado en una nueva realidad que los científicos denominan la “Era de la Quiebra Hídrica Global” (Madani, 2026). Un informe emblemático del Instituto de la ONU para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud, publicado en enero de 2026, declara que el mundo ha superado el punto de “crisis” para adentrarse en un estado crónico donde muchos sistemas hídricos naturales ya no pueden regresar a sus condiciones históricas (Madani, 2026). Este concepto trasciende la noción de la escasez temporal y se define como la combinación de “insolvencia e irreversibilidad”: la humanidad está extrayendo y contaminando los recursos hídricos más allá de los límites de recarga renovable, y se ha dañado el capital natural: acuíferos, humedales, suelos, ríos y glaciares de forma que ya no son reversibles en escalas de tiempo humanas. Las cifras son elocuentes, casi tres cuartas partes de la población mundial vive en países clasificados con inseguridad hídrica, y unos 4.000 millones de personas experimentan una grave escasez de agua al menos un mes al año.

En Ecuador, la gestión del agua se fundamenta en la Constitución de la República, que reconoce al agua como un patrimonio nacional estratégico, un derecho humano fundamental y un recurso cuya administración debe garantizar su conservación y acceso equitativo (Asamblea Constituyente 2008). En este marco, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como Autoridad Única del Agua y la Agencia de Regulación y control del Agua (ARCA) establece políticas, regulaciones y lineamientos técnicos para fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos y mejorar la prestación de los servicios de agua potable. Sin embargo, en muchas comunidades rurales persiste la necesidad de contar con sistemas permanentes de monitoreo que generan información confiable para apoyar la gestión comunitaria y la toma de decisiones sobre la calidad del agua (Agencia de Regulación y Control del Agua 2022).

En el sector Salache, ubicada en la provincia de Cotopaxi, el abastecimiento de agua se realiza mediante sistemas comunitarios administrativos localmente. En estos sistemas, la gestión del recurso hídrico depende de organizaciones comunitarias que requieren información técnica permanente para garantizar su adecuada operación y sostenibilidad. Estudios realizados en el sector de Salache evidencian que las fuentes de agua provienen de captaciones de vertientes utilizadas para consumo humano y actividades agrícolas, lo que exige un control adecuado de su calidad para prevenir riesgos ambientales y sanitarios (Castro 2012). La generación de información continua mediante sistemas de monitoreo se considera una herramienta clave para fortalecer la gestión comunitaria del agua.

En los últimos años, la comunidad científica ha avanzado significativamente en el desarrollo de investigaciones sobre monitoreo de la calidad del agua, ciencia ciudadana y tecnologías de bajo costo para fortalecer la gestión de los recursos hídricos en contextos de recursos limitados. En particular, se ha demostrado que herramientas como los Mapas Cognitivos Difusos y el análisis PESTEL permiten identificar los factores que influyen en la calidad del agua desde una perspectiva integral: política, económica, social, tecnológica, ecológica, legal y apoyar la toma de decisiones en comunidades rurales. Sin embargo, aún son limitados los estudios que integran estos enfoques con los principios de la ciencia abierta para diseñar sistemas de monitoreo comunitario adaptados al contexto local. En este sentido, la presente investigación busca contribuir a este vacío mediante una propuesta participativa para el sector Salache, orientada a generar información permanente y fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico (Fonseca et al. 2022; Hacker et al. 2025; Yevenes, Pereira, y Bermudez 2022).

La presente investigación evalúa la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta para las comunidades del sector

Salache, provincia de Cotopaxi. La propuesta integra el análisis del contexto mediante el modelo PESTEL, el diseño de un sistema de monitoreo con tecnologías de código abierto y la elaboración de un manual metodológico orientado al diagnóstico participativo, la interpretación de la información y el apoyo a la toma de decisiones comunitarias. De esta manera, se busca fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico mediante la generación de información accesible, confiable y de utilidad para la comunidad, en concordancia con los principios de la ciencia abierta promovidos por la (UNESCO 2021).

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La calidad del agua constituye un elemento fundamental para la salud humana, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo sostenible de las comunidades. En sectores rurales como Salache, provincia de Cotopaxi, la gestión del recurso hídrico enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad de información continua sobre la calidad del agua, lo que limita la identificación oportuna de posibles alteraciones y dificulta la toma de decisiones para la protección de las fuentes de abastecimiento. Por ello, resulta necesario evaluar alternativas que fortalezcan el monitoreo comunitario mediante enfoques participativos.

Desde el punto de vista práctico se justifica desde el ámbito social porque promueve la participación activa de las comunidades en la generación y uso de información sobre la calidad del agua, fortaleciendo la corresponsabilidad en la gestión del recurso hídrico. La incorporación de principios de ciencia ciudadana favorece el desarrollo de capacidades locales, incrementa el conocimiento ambiental de los usuarios y fomenta una mayor apropiación de las acciones orientadas a la conservación y uso sostenible del agua (UNESCO 2021).

Desde la perspectiva ambiental, el estudio contribuirá a fortalecer la vigilancia de la calidad del agua mediante la generación de información periódica que facilite la identificación temprana

de posibles cambios en las condiciones del recurso hídrico. Disponer de información confiable constituye un elemento clave para apoyar la conservación de las fuentes de agua y promover una gestión preventiva frente a los factores que pueden afectar su calidad (UNESCO 2024).

En el ámbito científico, la investigación aporta una propuesta que integra los principios de la ciencia ciudadana y la ciencia abierta con tecnologías de código abierto para evaluar la calidad del agua con un sistema de monitoreo comunitario. Esta integración representa una contribución al conocimiento aplicado en la gestión del agua en comunidades rurales, considerando que aún son limitados los estudios que articulan estos enfoques en el contexto ecuatoriano.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación incorpora el análisis del contexto mediante la metodología PESTEL para identificar los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la implementación del sistema de monitoreo. Asimismo, desarrolla un manual metodológico que orienta el diagnóstico obtenido y su utilización como apoyo para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico.

Desde el marco normativo, la investigación se articula con la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, que establece el derecho comunitario a participar en la gestión de agua, y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 (agua limpia y saneamiento), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres) de la Agenda 2030, las cuales promueven la gestión sostenible de los recursos hídricos, la acción frente al cambio climático y la conservación de los ecosistemas (Asamblea Nacional del Ecuador 2014b; Organización de las Naciones Unidas 2015).

Finalmente, la investigación posee una justificación práctica, ya que los resultados permitirán disponer de una propuesta técnicamente fundamentada para evaluar la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua adaptado a las condiciones del sector

Salache. La información generada podrá servir como herramienta de apoyo para la Junta Administradora de Agua, la comunidad y las instituciones competentes, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua y promoviendo una cultura de participación, transparencia y sostenibilidad, en concordancia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 relacionado con el acceso al agua limpia y al saneamiento (Organización de las Naciones Unidas 2015).

4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios de este proyecto se clasifican en directos e indirectos. Los beneficiarios directos corresponden a la población que habita en la zona de intervención del estudio, mientras que los beneficiarios indirectos son la población de la parroquia donde se ubica el ecosistema afectado.

Tabla 1. Distribución de los beneficiarios del proyecto

BENEFICIARIOS DIRECTOS	
Comunidades	Cantidad
Salache Grande	583
Salache Rumipamba	400
Salache Angamarca	250
Taniloma	350
BENEFICIARIOS IDIRECTOS	
Parroquia	Cantidad
Eloy Alfaro	3,250

Nota: La tabla presenta los beneficiarios directos ubicados en el sector Salache y los beneficiarios indirectos correspondientes a la parroquia Eloy Alfaro. Fuente: (Estadísticas - Censo Ecuador s. f.; INEC 2022).

5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel global, el cambio climático, el crecimiento demográfico, la expansión urbana y las actividades productivas ejercen una presión creciente sobre los recursos hídricos. Estas condiciones aumentan la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento y afectan la calidad del agua destinada al consumo humano, especialmente en comunidades rurales donde los sistemas de vigilancia presentan limitaciones técnicas, económicas e institucionales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), millones de personas continúan consumiendo agua contaminada con microorganismos patógenos, sedimentos, metales pesados y otras sustancias que representan riesgos para la salud.

La disponibilidad de agua limpia depende no solo de la existencia de un recurso hídrico, sino también de la capacidad de las instituciones y comunidades para monitorear continuamente su calidad, identificar de inmediato cambios en sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas y tomar medidas preventivas que reduzca los riesgos para la salud humana. Por ello, la gestión integrada de agua requiere sistemas de monitoreo continuo que generen información confiable, transparente y accesible para todos los actores involucrados en la toma de decisiones (UNESCO 2023).

En América Latina, la gestión local del agua es una estrategia ampliamente implementada para abastecer a las poblaciones rurales sin sistemas de distribución urbano. Sin embargo, muchas organizaciones públicas enfrentan limitaciones relacionadas con la disponibilidad limitada de recursos financieros, infraestructura tecnológica insuficiente, baja frecuencia de monitoreo de la calidad del agua y coordinación limitada entre las instituciones públicas y las comunidades. Estas condiciones dificultan la identificación temprana de problemas de contaminación y reduce la capacidad de respuesta ante incidentes que amenacen la salud de la población (Reyes-García et al.,

2022)

En Ecuador, la Constitución de la República reconoce al agua como un derecho humano fundamental y un patrimonio nacional estratégico cuya gestión debe garantizar su conservación, calidad y acceso equitativo para la población (Asamblea Constituyente 2008). Asimismo, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como Autoridad Única del Agua, y la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) establecen políticas y regularizaciones orientadas a fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos y la prestación de los servicios de agua potable. Sin embargo, en muchas comunidades rurales persisten limitaciones técnicas, económicas, sociales e institucionales para implementar sistemas permanentes de monitoreo que permitan disponer de información continua y confiable sobre la calidad del agua.

En el sector Salache, provincia de Cotopaxi, el análisis del contexto mediante la metodología PESTEL evidenció que la disponibilidad de agua segura está condicionada por diversos factores interrelacionados. Entre los aspectos políticos destacan la necesidad de fortalecer el acceso a información hídrica, dispone de información veraz sobre la calidad del agua y consolidar una mayor articulación institucional para la gestión del abastecimiento. Desde la dimensión social se identificó la importancia de fortalecer la alfabetización hídrica, la participación comunitaria y el acceso equitativo al agua segura. En el ámbito tecnológico, el diagnóstico evidenció la necesidad de incorporar tecnologías confiables para la detección de contaminantes y superar las limitaciones del monitoreo permanente. Asimismo, los componentes ecológicos muestran la influencia de la disponibilidad hídrica, la presencia de contaminantes naturales y antropogénicos, el impacto de la ganadería, el déficit de reforestación y la vulnerabilidad frente a eventos climáticos, mientras que el componente legal resalta la importancia del cumplimiento

normativo del monitoreo permanente y de la responsabilidad institucional sobre la calidad del agua.

Los resultados obtenidos mediante el Mapa Cognitivo Difuso permitieron identificar que las variables Disponibilidad de agua segura y Sistema de monitoreo del agua presentan una relación estratégica dentro del sistema analizado, evidenciando que la generación de información permanente sobre la calidad del agua depende del fortalecimiento de procesos de monitoreo, del acceso a información confiable y de la participación activa de las comunidades. Estos resultados reflejan que la ausencia de un sistema de monitoreo participativo limita la generación de evidencia para la identificación temprana de posibles alteraciones en la calidad del agua y reduce la capacidad de planificar acciones orientadas a la protección del recurso hídrico.

Aunque existen investigaciones relacionadas con el monitoreo de la calidad del agua y el uso de tecnologías de código abierto, en el contexto ecuatoriano aún son limitados los estudios que integran los principios de la ciencia ciudadana y la ciencia abierta con herramientas de análisis estratégico como la metodología PESTEL para evaluar la viabilidad de implementar sistemas comunitarios de monitoreo. En consecuencia, surge la necesidad de evaluar la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciudadana para el sector Salache, provincia de Cotopaxi, que permita generar información continua y confiable, fortalecer la participación comunitaria y apoyar la toma decisiones para la gestión sostenible del recurso hídrico.

6 OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad para la implementación de un sistema de monitoreo de agua de consumo humano, basado en la ciencia abierta y ciudadana en el sector Salache, provincia

Cotopaxi.

6.2 Objetivos Específicos

Identificar los principales conceptos que afectan la calidad del agua en el sector Salache 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 las comunidades.

Elaborar un manual metodológico para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua, que incluya los procedimientos para aplicar el análisis PESTEL, interpretar la información obtenida y utilizarla como apoyo para la toma de decisiones comunitarias.

7 ACTIVIDADES Y SISTEMA 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 el sector Salache desde una perspectiva política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal (PESTEL).	Adaptación	Taller participativo con las comunidades del sector Salache para identificar conceptos locales PESTEL. Sistematización y validación de conceptos identificados.	- Listado de conceptos PESTEL que afectan la calidad del agua local. - Diagnóstico del contexto del sector Salache e identificación 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 las comunidades del sector Salache.	Modelado participativo mediante mapas cognitivos difusos	- Construcción de mapas cognitivos difusos con las comunidades. - Digitalización del mapa cognitivo difuso utilizando la herramienta Mental Modeler. - Evaluar escenarios con la implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua.	- Mapa cognitivo difuso del sistema hídrico local.
OBJETIVOS	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADO
Elaborar un manual metodológico para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua, que incluya los procedimientos para aplicar el análisis PESTEL, interpretar la información obtenida y utilizarla como apoyo para la toma de decisiones comunitarias.	Elaboración del manual	- Diseñar la estructura del manual. - Describir el procedimiento para realizar el diagnóstico comunitario mediante la metodología PESTEL. - Explicar el funcionamiento del sistema de monitoreo propuesto. - Definir los procedimientos para interpretar la información obtenida.	- Manual metodológico para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

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

8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1 Calidad del agua para consumo humano en comunidades rurales

La calidad del agua para consumo humano se define como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que determinan su aptitud para el consumo directo sin riesgo

para la salud (Armijos-Arcos et al.,2025). En el contexto de las comunidades rurales andinas del Ecuador, la calidad del agua está condicionado por la interacción de múltiples factores: las características geoquímicas naturales del suelo y el subsuelo, las actividades humanas que generan contaminación difusa, la capacidad de los sistemas de tratamiento locales para remover contaminantes.

Uno de los principales determinantes de la salud pública y el desarrollo sostenible, debido a que influye directamente en la prevención de enfermedades de origen hídrico, la seguridad alimentaria y el bienestar de las comunidades. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que el agua potable debe estar libre de microorganismos patógenos, sustancias químicas y características físicas que representan un riesgo para la salud, por lo que su gestión debe basarse en un enfoque preventivo que abarque desde la protección de la fuente hasta el consumo final. Por ello, el monitoreo permanente de la calidad del agua constituye una herramienta fundamental para verificar el cumplimiento de los estándares sanitarios, identificar oportunamente fuentes de contaminación y reducir los riesgos asociados al abastecimiento de agua para la población (Organización Mundial de la Salud (OMS) 2022).

Según la Normas NTE INEN 1108:2023, el agua para consumo humano debe cumplir estándares específicos de pH (6,5-8,5), turbidez (≤ 5 NTU), conductividad eléctrica ($\leq \mu\text{S}/\text{cm}$), metales pesados (arsenico $\leq 0,01$ mg/L, cromo total $\leq 0,05$ mg/L) y carga microbiológica (coliformes totales y E. coli: ausencia en 100 mL). Las comunidades de la sierra centro ecuatoriana suelen presentar agua con alta dureza por la composición mineral de los acuíferos andinos, así como riesgos de contaminación por actividades ganaderas que introducen patógenos fecales en las fuentes superficiales (Fonseca et al. 2024).

8.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua de consumo humano

La evaluación de la calidad de agua para consumo humano se fundamenta en el análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que permiten determinar si el recurso cumple con las condiciones necesarias para proteger la salud de la población. Estos parámetros constituyen indicadores del estado del agua desde la fuente de abastecimiento hasta el punto de consumo, permitiendo identificar oportunamente alteraciones ocasionadas por procesos naturales o actividades antrópicas. La Organización mundial de la Salud (OMS) establece que la vigilancia de la calidad del agua debe realizarse mediante un enfoque preventivo basado en la evaluación de riesgos, considerando parámetros que evidencien la presencia de contaminación y garanticen el cumplimiento de los estándares de potabilidad establecidos para el consumo humano (Organización Mundial de la Salud 2022a).

Entre los principales parámetros empleados para evaluar la calidad del agua se encuentran el potencial de hidrógeno (pH), la temperatura, la turbidez, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales (TDS) y la presencia de microorganismos indicadores, como los coliformes totales y *Escherichia coli*, además de sustancias químicas potencialmente tóxicas cuando las características de la fuente lo requieren. En Ecuador, estos criterios se encuentran regulados por la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INE 1108:2023, emitida por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2023), la cual establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua destinada al consumo humano. El monitoreo periódico de estos parámetros permite detectar cambios en la calidad del agua, prevenir riesgos para la salud pública y generar información técnica que respalde la gestión sostenible de los sistemas de abastecimiento, especialmente en comunidades rurales donde la vigilancia continua del recurso hídrico es limitada.

8.1.2 Características de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano

Las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano corresponden a los cuerpos

de agua superficiales y subterráneos utilizados para satisfacer las necesidades domésticas de la población. Entre las fuentes superficiales se incluyen ríos, quebradas, lagos y embalses, mientras que las fuentes subterráneas comprenden manantiales, pozos y acuíferos. La disponibilidad y la calidad del agua proveniente de estas fuentes dependen de factores naturales, como las condiciones geológicas, climáticas e hidrológicas, así como de influencia de actividades antrópicas desarrolladas en sus áreas de recarga y protección, entre ellas la agricultura, la ganadería, la expansión urbana y las descargas de aguas residuales. La Organización Mundial de la Salud (2022) señala que la protección de las fuentes constituye una de las primeras barreras para garantizar la seguridad del agua destinada al consumo humano.

8.1 Manejo de agua en sectores rurales: rol de Juntas Administradoras

En las comunidades rurales, las fuentes de abastecimiento suelen ser administradas por organizaciones comunitarias o Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento (JAAPS). Estas juntas son entidades sin fines de lucro, con personería jurídica y fondos propios, que tienen la finalidad de prestar el servicio público de agua potable y saneamiento a sus habitantes (Agencia de Regulación y Control del Agua 2023). Su responsabilidad comprende la captación, conducción, tratamiento y distribución del recurso hídrico, así como la conservación, mantenimiento y operación de la infraestructura. Además, participan activamente en la protección de las fuentes de abastecimiento para evitar su contaminación. Desde esta perspectiva, el monitoreo periódico de las condiciones de la fuente permite identificar oportunamente alteraciones en la calidad del agua, fortalecer la gestión comunitaria y respaldar la toma de decisiones para prevenir riesgos sanitarios y asegurar la continuidad del servicio.

8.1.1 Importancia del agua segura para la salud pública

El acceso al agua segura constituye uno de los principales determinantes de la salud pública

y del bienestar de la población, ya que reduce significativamente la incidencia de enfermedades de origen hídrico y contribuye al desarrollo sostenible de las comunidades. El consumo de agua contaminada favorece la transmisión de enfermedades causadas por microorganismos patógenos, sustancias químicas y otros contaminantes que afectan principalmente a niños, adultos mayores y poblaciones vulnerables. Por ello, la Organización Mundial de la Salud señala que garantizar el acceso a agua potable segura, saneamiento e higiene representa una de las intervenciones más efectivas para prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida de la población (Organización Mundial de la Salud 2022a).

Asimismo, el monitoreo continuo de la calidad del agua constituye una herramienta fundamental para identificar oportunamente alteraciones en sus características físicas, químicas y microbiológicas, permitiendo adoptar medidas preventivas que protejan la salud pública y fortalezcan la gestión sostenible del recurso hídrico. En este sentido, la disponibilidad de información confiables facilita la toma de decisiones por parte de las instituciones responsables del abastecimiento y de las comunidades, contribuyendo al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, orientado a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (United Nations 2024)

8.1.2 Principales amenazas a la calidad del agua de consumo humano

La calidad del agua destinada al consumo humano puede deteriorarse debido a factores naturales y principalmente a actividades de origen antrópico que modifican las características físicas, químicas y microbiológicas del recurso hídrico. Entre las principales amenazas se encuentran las descargas de aguas residuales sin tratamiento, el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura, la disposición inadecuada de residuos sólidos, la escorrentía superficial, la presencia de actividades pecuarias próximas a las fuentes de abastecimiento y el

crecimiento urbano no planificado. Estas presiones favorecen la incorporación de microorganismos patógenos, nutrientes, materia orgánica y sustancias químicas que comprometen la seguridad del agua y aumentan el riesgo de enfermedades de transmisión hídrica. La Organización Mundial de la Salud señala que los sistemas de abastecimiento, especialmente los de pequeña escala y ubicados en zonas rurales, son más vulnerables a estos factores cuando no existe una adecuada gestión del riesgo ni un monitoreo continuo de la calidad del agua (Organización Mundial de la Salud 2022a).

En comunidades rurales, la limitada infraestructura para el tratamiento del agua, la insuficiente protección de las fuentes de captación y la falta de vigilancia periódica incrementan la probabilidad de contaminación del recurso hídrico. Frente a este escenario, el monitoreo sistemático de parámetros físicos, químicos y microbiológicos constituye una herramienta fundamental para detectar oportunamente alteraciones en la calidad del agua, apoyar la toma de decisiones y fortalecer la gestión sostenible de los sistemas de abastecimiento para consumo humano, contribuyendo a la protección de la salud pública y al acceso seguro al agua (Trotta, Baaloudj, y Brienza 2024).

8.2 Monitoreo comunitario e la calidad del agua.

El monitoreo comunitario de la calidad del agua constituye una estrategia participativa que involucra a los habitantes de una comunidad en la recopilación, registro e interpretación de información sobre el estado de los recursos hídricos. Este enfoque complementa los programas convencionales de monitoreo desarrollados por instituciones gubernamentales, al generar información continua en escalas espaciales y temporales donde la vigilancia oficial suele ser limitada. Diversas investigaciones demuestran que la participación de la comunidad fortalece la gestión local del agua, incrementa la disponibilidad de datos para la toma de decisiones y promueve

una mayor corresponsabilidad en la protección de las fuentes de abastecimiento. Asimismo, el monitoreo comunitario favorece el intercambio de conocimientos entre la población, las instituciones públicas y la academia, contribuyendo a una gestión más participativa y sostenible del recurso hídrico (Dominguez-Rendón, Villada-Canela, y Muñoz-Pizza 2024a; Mamun y Natcher 2023).

En los últimos años, el desarrollo de tecnologías de bajo costo, plataformas digitales y herramientas de ciencia ciudadana ha fortalecido la implementación de programas de monitoreo comunitario en diferentes regiones del mundo. Estos programas permiten evaluar parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua mediante protocolos estandarizados, mejorando la cobertura del monitoreo y facilitando la detección temprana de problemas de contaminación. Además, la evidencia científica señala que la participación activa de las comunidades incrementa la confianza en la información generada, fortalece la gobernanza del agua y favorece la formulación de estrategias de gestión ambiental basadas en evidencia científica y conocimiento local (Dominguez-Rendón, Villada-Canela, y Muñoz-Pizza 2024b; Mamun y Natcher 2023).

8.3 Concepto y evolución del monitoreo comunitario de la calidad del agua

El monitoreo comunitario de la calidad del agua es un enfoque participativo mediante el cual los habitantes de una comunidad colaboran en la recolección, registro e interpretación de información sobre el estado de los recursos hídricos, siguiendo protocolos técnicos establecidos. Este modelo surge como una alternativa para complementar los programas convencionales de monitoreo desarrollados por instituciones públicas, especialmente en zonas rurales, donde la cobertura y frecuencia de evaluación suelen ser limitadas. Su evolución ha estado estrechamente relacionada con el desarrollo de la ciencia ciudadana permitiendo que la población participe no solo en la generación de datos, sino también en la identificación de problemas ambientales y en la

formulación de acciones para la gestión sostenible del recurso hídrico (Bonney, Hansen, y Baldwin 2023; Dominguez-Rendón et al. 2024b)

En los últimos años, la incorporación de tecnologías de bajo costo, aplicaciones móviles y plataformas digitales ha fortalecido la implementación de programas de monitoreo comunitario, mejorando la calidad de los datos generados y facilitando la comunicación entre comunidades, investigaciones e instituciones responsable de la gestión del agua. Estas herramientas han incrementado la confiabilidad de la información obtenida por la ciudadanía y han consolidado el monitoreo comunitario como un instrumento de apoyo para la toma de decisiones ambientales y el fortalecimiento de la gobernanza del agua (Rüfenacht, Schilling, y Ward 2023; Warner et al. 2024).

8.4 Participación comunitaria en la gestión del agua

La participación comunitaria constituye un elemento esencial para la gestión sostenible del agua ya que promueve la corresponsabilidad entre la población, las instituciones públicas y los actores académicos en la conservación de las fuentes de abastecimiento. La intervención activa de la comunidad favorece la identificación de problemas locales, fortalece los procesos de vigilancia ambiental y facilita la adopción de medidas preventivas para proteger la calidad del recurso hídrico. Asimismo, este enfoque incrementa la transparencia en la toma de decisiones y fortalece las capacidades organizativas de las comunidades rurales (Dominguez-Rendón et al. 2024; UNESCO 2024b).

La evidencia científica demuestra que los programas donde existe una participación permanente de la comunidad presentan mejores resultados en la protección de las fuentes de agua, debido a que los habitantes desarrollan un mayor sentido de pertenencia y compromiso con la conservación del recurso. Además, la interacción entre gobiernos locales, organizaciones comunitarias y universidades favorece la implementación de estrategias de monitoreo adaptadas a

las necesidades del territorio, incrementando la eficacia de la gestión integrada del agua (Warner et al. 2024).

8.5 Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua

La implementación aplicada al monitoreo del agua consiste en la participación voluntaria de la población en la recopilación, análisis y difusión de información ambiental bajo metodologías científicas previamente establecidas. Este enfoque permite ampliar la cobertura espacial y temporal del monitoreo, generar bases de datos de manera continua y fortalecer el intercambio de conocimiento entre la comunidad y los investigadores. Además, favorece la democratización del conocimiento científico y contribuye a que la información de políticas públicas relacionadas con los recursos hídricos (Dominguez-Rendón et al. 2024b; Warner et al. 2024).

La implementación de proyectos de ciencia ciudadana ha demostrado que los datos obtenidos por los participantes pueden alcanzar niveles adecuados de la calidad cuando existen protocolos estandarizados, procesos de capacitación y mecanismos de validación técnica. En consecuencia, la ciencia ciudadana se ha consolidado como una herramienta complementaria para el monitoreo de la calidad del agua, especialmente en comunidades donde los recursos técnicos y económicos para desarrollar programas convencionales de vigilancia ambiental son limitados (Dominguez-Rendón et al. 2024a; Mamun y Natcher 2023).

8.6 Experiencias exitosas de monitoreo comunitario del agua

Diversos programas desarrollados a nivel internacional evidencian que el monitoreo comunitario constituye una estrategia eficaz para fortalecer la gestión del recurso hídrico y mejorar la disponibilidad de información ambiental. Entre estas experiencias destaca CrowdWater, una iniciativa de ciencia ciudadana implementada en varios países que permite a los participantes registrar observaciones hidrológicas mediante dispositivos móviles, facilitando la recopilación de

información sobre el estado de los cuerpos de agua y fortaleciendo la participación comunitaria en la gestión de los recursos hídricos (Blanco-Ramírez et al. 2025).

De igual manera, experiencias desarrolladas en Europa, África y América Latina demuestran que la integración entre comunidades, universidades e instituciones públicas mejora la cobertura del monitoreo, incrementa la confianza en la información generada y fortalece los procesos de gobernanza del agua. La evidencia disponible señala que los programas exitosos comparten elementos comunes, como la capacitación permanente de los participantes, el uso de protocolos estandarizados, la incorporación de tecnologías de bajo costo y la retroalimentación continua entre los diferentes actores involucrados, condiciones que favorecen la sostenibilidad de los sistemas de monitoreo comunitario (Dominguez-Rendón et al. 2024b; Warner et al. 2024).

8.7 Ciencia abierta para la gestión del recurso hídrico

La ciencia abierta constituye un nuevo paradigma de investigación que promueve la producción, el acceso, el intercambio y la reutilización del conocimiento científico de manera transparente, colaborativa e inclusiva. Este enfoque busca fortalecer la interacción entre investigadores, instituciones, gobiernos y sociedad, facilitando que los datos, metodologías, publicaciones y herramienta científicas estén disponibles para apoyar la toma de decisiones frente a problemáticas ambientales y sociales. En el ámbito de la gestión del recurso hídrico, la ciencia abierta favorece la generación de información accesible y verificable sobre la calidad del agua, fortaleciendo los procesos de monitoreo participativo, la gobernanza ambiental y la formulación de estrategias de manejo sostenible basadas en evidencia científica (UNESCO 2021).

8.8 Principios de la ciencia abierta

El acceso abierto a los datos ambientales permite que la información generada mediante programas de monitoreo pueda ser consultada, reutilizada y validada por investigadores,

instituciones y ciudadanía, incrementando la transparencia y la confiabilidad de los procesos de gestión ambiental. En el caso del recurso hídrico, la disponibilidad de datos sobre parámetros físicos, químicos y microbiológicos facilita la evaluación continua de la calidad del agua, la identificación temprana de fuentes de contaminación y la formulación de medidas preventivas para proteger la salud pública y los ecosistemas. Para garantizar la reutilización de la información, la UNESCO recomienda que los datos científicos sean gestionados bajo los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable), los cuales promueven que la información sea localizable, accesible, interoperable y reutilizable por diferentes usuarios y plataformas tecnológicas (Wilkinson, Mark D. et al. 2016).

8.9 Acceso abierto a datos ambientales

El acceso abierto a los datos ambientales permite que la información generada mediante programas de monitoreo pueda ser consultada, reutilizada y validada por investigadores, instituciones y ciudadanía, incrementando la transparencia y la confiabilidad de los procesos de gestión ambiental. En el caso del recurso hídrico, la disponibilidad de datos sobre parámetros físicos, químicos y microbiológicos facilita la evaluación continua de la calidad del agua, la identificación temprana de fuentes de contaminación y la formulación de medidas preventivas para proteger la salud pública y los ecosistemas. Para garantizar la reutilización de la información, la UNESCO recomienda que los datos científicos sean gestionados bajo los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable), los cuales promueven que la información sea localizable, accesible, interoperable y reutilizable por diferentes usuarios y plataformas tecnológicas (UNESCO 2021a; Wilkinson, Mark D. et al. 2016).

8.10 Plataformas colaborativas para el monitoreo del agua

Las plataformas colaborativas constituyen herramientas fundamentales para integrar la

ciencia abierta con el monitoreo participativo del recurso hídrico, permitiendo que comunidades, instituciones académicas y organismos públicos compartan información en tiempo real sobre la calidad del agua. Iniciativas internacionales como CrowdWater han demostrado que el uso de aplicaciones móviles y plataformas digitales facilita la recopilación de datos hidrológicos mediante la participación ciudadana, ampliando la cobertura espacial del monitoreo y complementando los sistemas convencionales de vigilancia ambiental. Estas plataformas fortalecen la generación de conocimiento colectivo, mejoran la disponibilidad de información para la toma de decisiones y favorecen la gestión sostenible del agua mediante procesos colaborativos sustentados en evidencia científica y tecnologías de acceso abierto (Etter et al. 2020)

8.11 Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua

El desarrollo de nuevas tecnologías digitales ha permitido transformar los sistemas tradicionales de monitoreo de la calidad del agua mediante la incorporación de sensores de bajo costo, plataformas abiertas e infraestructuras basadas en Internet de las Cosas (IoT). Estas herramientas permiten obtener información continua sobre parámetros físicos y químicos del agua, reduciendo las limitaciones asociadas a los métodos convencionales que requieren equipos especializados, análisis de laboratorio y mayores costos operativos. La integración de tecnologías accesibles con procesos participativos representa una alternativa viable para fortalecer la vigilancia del recurso hídrico en comunidades rurales donde los sistemas institucionales de monitoreo presentan limitada cobertura espacial y temporal (Bogdan et al. 2023; Metshein et al. 2023).

Además, la aplicación de tecnologías abiertas favorece la democratización del conocimiento ambiental al permitir que comunidades, instituciones educativas y organizaciones locales puedan participar en la generación y análisis de datos sobre la calidad del agua. Estos sistemas contribuyen al fortalecimiento de la gobernanza hídrica, debido a que proporcionan

información técnica que facilita la identificación temprana de problemas de contaminación y la toma de decisiones orientadas a la protección del recurso hídrico (Jaramillo-Cañas et al. 2023; Mendez et al. 2022).

8.12 Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo

Los métodos de monitoreo de bajo costo constituyen una alternativa tecnológica para evaluar la calidad del agua mediante dispositivos compactos, sensores electrónicos y sistemas automatizados que permiten medir variables fisicoquímicas sin depender exclusivamente de laboratorios especializados. Estos sistemas generalmente incorporan sensores para determinar parámetros como temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, proporcionando información rápida sobre las condiciones del recurso hídrico. Su principal ventaja radica en la posibilidad de realizar mediciones frecuentes y generar bases de datos continuas, aspecto fundamental para detectar cambios en la calidad del agua y establecer medidas preventivas (Bogdan et al. 2023).

Aunque los equipos convencionales presentan mayor precisión analítica, los sistemas de bajo costo han demostrado ser herramientas complementarias eficientes cuando son correctamente calibrados y validados frente a métodos estandarizados. En comunidades rurales, estas tecnologías permiten reducir las barreras económicas y técnicas asociadas al monitoreo ambiental, facilitando la participación comunitaria y fortaleciendo los procesos locales de vigilancia del agua destinada al consumo humano (Ramesh et al. 2024).

8.13 Sensores abiertos y hardware libre para monitoreo del agua

El uso de hardware libre constituye una de las principales estrategias para el desarrollo de sistemas accesibles de monitoreo ambiental. Plataformas electrónicas como Arduino y ESP32 permiten integrar sensores comerciales de bajo costo con módulos de comunicación inalámbrica,

almacenamiento de datos y procesamiento automático de información. Estas características facilitan la construcción de estaciones de monitoreo adaptables a diferentes condiciones ambientales y necesidades locales (Patel, Koradia, y Sharma 2025).

Los sensores empleados en estos sistemas permiten evaluar variables fundamentales para determinar la calidad del agua. Los sensores de pH utilizan electrodos electroquímicos para determinar la acidez o alcalinidad del agua; los sensores de turbidez emplean principios de dispersión de luz para estimar la presencia de partículas suspendidas; mientras que los sensores de conductividad permiten identificar cambios asociados a la concentración de sales y minerales disueltos. La combinación de estos dispositivos con microcontroladores abiertos permite diseñar soluciones económicas, escalables y fácilmente reproducibles para comunidades con recursos limitados (Vamsi Thalatam, Lanka, y Kumar 2023).

8.14 Internet de las Cosas (IoT) aplicado al monitoreo hídrico

El Internet de las Cosas (IoT) representa una evolución tecnológica que permite conectar sensores, dispositivos electrónicos y plataformas digitales mediante redes de comunicación para recopilar y transmitir información en tiempo real. En el monitoreo hídrico, esta tecnología facilita la supervisión continua de parámetros de calidad del agua, permitiendo identificar variaciones ambientales sin necesidad de realizar muestreos manuales frecuentes (Promput, Maithomklang, y Panya-isara 2023).

Los sistemas IoT aplicados al recurso hídrico generalmente combinan sensores ambientales, microcontroladores, tecnologías de comunicación inalámbrica y plataformas de almacenamiento en la nube. Tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y LoRa han sido utilizadas para transmitir datos desde zonas remotas hacia servidores digitales, permitiendo que usuarios y gestores ambientales consulten información actualizada para apoyar la toma de decisiones. Esta

capacidad resulta especialmente importante en comunidades rurales donde las condiciones geográficas dificultan el acceso permanente para realizar controles convencionales (Jabbar et al. 2024).

8.15 Plataformas para la visualización de datos

La visualización de datos constituye una etapa esencial dentro de los sistemas modernos de monitoreo ambiental, debido a que transforma grandes cantidades de información técnica en representaciones comprensibles para usuarios comunitarios, investigadores y autoridades. Plataformas digitales como ThingSpeak, Firebase, Grafana y Node-RED permiten almacenar, procesar y representar datos provenientes de sensores mediante gráficos, indicadores y paneles interactivos (Patel et al. 2025).

Estas herramientas favorecen el acceso remoto a la información y permiten establecer sistemas de alerta cuando determinados parámetros superan valores críticos establecidos. Además, la disponibilidad de datos históricos facilita analizar tendencias temporales, identificar eventos de contaminación y evaluar la efectividad de medidas de gestión implementadas. Para comunidades rurales, estas plataformas representan una oportunidad para fortalecer la transparencia y participación en la administración del recurso hídrico (Sharma, Saurabh et al. 2026).

8.16 Retos técnicos del monitoreo en comunidades rurales

A pesar de los beneficios asociados al uso de tecnologías de bajo costo, su implementación en comunidades rurales presenta diversos desafíos técnicos y sociales. Entre los principales inconvenientes se encuentran la necesidad de calibración periódica de sensores, la pérdida de precisión debido a condiciones ambientales, la disponibilidad limitada de energía eléctrica, problemas de conectividad y la necesidad de capacitación de los usuarios responsables del sistema (Hacker et al. 2025).

Asimismo, la sostenibilidad de estos sistemas depende no solamente de la tecnología instalada, sino también de la apropiación comunitaria, disponibilidad de recursos para mantenimiento y existencia de protocolos claros para la gestión de datos. Por ello, los sistemas de monitoreo deben diseñarse considerando las condiciones locales, capacidades técnicas de los usuarios y facilidad de mantenimiento, garantizando que la tecnología contribuya realmente al fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua (Etter et al. 2020).

8.16.1 Mapas Cognitivos Difusos (FCM)

Los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Maps, FCM) constituyen una herramienta de modelación sistémica que permite representar el conocimiento de diferentes actores mediante relaciones causales entre conceptos relevantes de un sistema. Esta metodología combina principios de los mapas cognitivos tradicionales y la lógica difusa, permitiendo analizar sistemas complejos caracterizados por incertidumbre, interacciones no lineales y múltiples factores sociales, ambientales y tecnológicos. Debido a estas características, los FCM han sido ampliamente utilizados para comprender problemáticas ambientales donde intervienen diferentes actores y variables, facilitando la integración del conocimiento científico con las experiencias locales de las comunidades (Mourhir 2021a; Obiedat y Samarasinghe 2022).

En el ámbito de la gestión ambiental, los FCM permiten identificar los factores que influyen sobre un determinado problema, analizar la dirección e intensidad de las relaciones causales y evaluar posibles escenarios futuros mediante simulaciones. Esta capacidad resulta especialmente útil para sistemas socioambientales como la gestión del agua, donde la calidad y disponibilidad del recurso dependen de la interacción entre factores ecológicos, sociales, económicos, políticos y tecnológicos. Por ello, los mapas cognitivos difusos representan una metodología adecuada para analizar la complejidad asociada al monitoreo comunitario del agua y

fortalecer procesos participativos de toma de decisiones (Parreño y Pablo-Martí 2024; Rippy et al. 2024a).

8.16.2 Concepto de los Mapas Cognitivos Difusos

Los Mapas Cognitivos Difusos son modelos gráficos que representan un sistema mediante conceptos o variables conectadas por relaciones causales ponderadas. Cada concepto representa un elemento relevante del sistema estudiado, mientras que las conexiones indican la influencia que un concepto ejerce sobre otro. A diferencia de los modelos causales tradicionales, los FCM incorporan valores difusos que permiten representar diferentes grados de influencia, considerando que los sistemas reales no siempre presentan relaciones completamente determinadas o lineales (Papageorgiou y Groumpos 2023).

Esta característica permite que los FCM sean utilizados para representar sistemas donde existe incertidumbre y conocimiento incompleto, integrando la percepción de expertos, investigadores y comunidades locales. Según Özesmi y Özesmi (2004), esta metodología es particularmente útil en sistemas ecológicos y sociales debido a que permite analizar cómo los actores comprenden la dinámica de un territorio y cómo sus percepciones pueden transformarse en modelos estructurados para apoyar la planificación ambiental (Mourhir 2021b).

8.16.3 Componentes de un FCM

Un mapa cognitivo difuso está compuesto principalmente por tres elementos: conceptos, relaciones causales y pesos difusos. Los conceptos corresponden a las variables o elementos que forman parte del sistema analizado, pudiendo representar factores ambientales, sociales, económicos o tecnológicos. En una investigación relacionada con la calidad del agua, estos conceptos pueden incluir variables como contaminación del agua, participación comunitaria, disponibilidad de información hídrica, monitoreo ambiental o gestión institucional (Mourhir 2021;

Papageorgiou y Groumpos 2023).

Las relaciones causales representan la influencia existente entre los conceptos y se expresan mediante flechas dirigidas que indican la dirección del efecto. Finalmente, los pesos difusos representan la intensidad y naturaleza de dicha relación, utilizando valores generalmente comprendidos entre -1 y +1. Estos valores permiten establecer si una variable genera un efecto positivo, negativo o neutro sobre otra, facilitando la representación matemática de sistemas complejos (Chen 2022; Sarmiento et al. 2022).

8.16.4 Relaciones causales y pesos difusos

Las relaciones causales dentro de un FCM permiten representar cómo una variable puede modificar el comportamiento de otra dentro del sistema. Estas conexiones pueden ser positivas cuando un incremento de una variable provoca el aumento de otra, negativas cuando genera una reducción, o inexistentes cuando no existe una relación significativa. Esta representación facilita la comprensión de pro censos donde múltiples factores interactúan simultáneamente (Sarmiento et al. 2024).

Los pesos difusos asignados a cada relación permiten cuantificar la fuerza de la influencia entre variables. Generalmente, los valores positivos representan relaciones de refuerzo, mientras que los valores negativos representan relaciones de oposición o reducción. Por ejemplo, dentro de un sistema de monitoreo comunitario del agua, un incremento en la capacitación ambiental de los usuarios puede generar un efecto positivo sobre la correcta utilización del sistema de monitoreo, mientras que una baja disponibilidad económica puede afectar negativamente la capacidad de mantenimiento tecnológico. Esta característica permite analizar escenarios y determinar cuáles variables poseen mayor importancia dentro del sistema estudiado (Bakhtavar et al. 2021).

8.16.5 Aplicación de los FCM en la gestión ambiental

Los Mapas Cognitivos Difusos han sido aplicados ampliamente en la gestión ambiental debido a su capacidad para integrar conocimientos científicos y sociales en el análisis de problemas complejos. Diversos estudios han utilizado esta metodología para evaluar conflictos ambientales, manejo de recursos naturales, conservación de ecosistemas y planificación territorial, permitiendo identificar variables críticas y establecer estrategias de intervención (White et al. 2021).

En la gestión del recurso hídrico, los FCM permiten analizar la interacción entre factores ambientales, institucionales y sociales que determinan la disponibilidad y calidad del agua. Esta metodología facilita la participación de comunidades locales, ya que transforma sus conocimientos y percepciones en modelos visuales que pueden ser analizados mediante herramientas computacionales. Por esta razón, los FCM representan una alternativa adecuada para investigaciones orientadas al fortalecimiento de la gobernanza hídrica y al diseño de sistemas participativos de monitoreo ambiental (Shahvi, S. et al. 2021).

8.17 Uso de Mental Modeler para la construcción de mapas cognitivos

Mental Modeler es una plataforma informática desarrollada para la construcción, análisis y simulación de modelos cognitivos difusos participativos. Esta herramienta permite representar gráficamente las variables identificadas por los participantes, establecer relaciones causales entre conceptos y asignar valores de influencia mediante matrices de interacción. Además, facilita el análisis estructural del sistema mediante indicadores como centralidad, influencia relativa y simulación de escenarios futuros (Barbrook-Johnson y Penn 2022).

El uso de Mental Modeler resulta apropiado para investigaciones socioambientales debido a que permite integrar el conocimiento local con herramientas de análisis científico. En estudios relacionados con la gestión del agua, esta plataforma facilita la identificación colectiva de factores que afectan la seguridad hídrica y permite evaluar cómo diferentes estrategias de intervención

pueden modificar el comportamiento del sistema. En el contexto de esta investigación, Mental Modeler será utilizado para representar las relaciones entre conceptos PESTEL identificados por la comunidad de Salache y analizar escenarios relacionados con la implementación de un sistema de monitoreo participativo de la calidad del agua (Gray, Steven et al. 2021).

8.17.1 Análisis PESTEL aplicado a la gestión del agua

El análisis PESTEL constituye una herramienta de diagnóstico estratégico ampliamente utilizada para identificar y evaluar los factores externos que influyen sobre un sistema u organización desde las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal. Su aplicación permite comprender cómo las condiciones del entorno afectan la planificación, implementación y sostenibilidad de proyectos relacionados con la gestión del recurso hídrico (Bhuiyan et al. 2023a). En investigaciones ambientales, este enfoque facilita el análisis integral de los factores que condicionan la disponibilidad de agua segura y contribuye a la formulación de estrategias orientadas a fortalecer la gobernanza, la participación comunitaria y la toma de decisiones basada en evidencia científica (Aguirre y Paredes Cuervo 2023).

8.17.2 Fundamentos del análisis PESTEL

El análisis PESTEL se fundamenta en la evaluación sistemática de los factores externos que pueden generar oportunidades o amenazas para un sistema determinado. Este modelo considera que los procesos ambientales y sociales están influenciados por decisiones políticas, condiciones económicas, dinámicas sociales, avances tecnológicos, características ecológicas y marcos legales que interactúan entre sí. Su aplicación permite identificar relaciones de causalidad entre variables y comprender la complejidad de los sistemas socio ecológicos, razón por la cual ha sido incorporado en investigaciones relacionadas con la planificación ambiental, la gestión del agua y el desarrollo sostenible (Bhuiyan et al. 2023b; Bilalova, Shahana et al. 2023).

8.17.3 Dimensión política

La dimensión política comprende las políticas públicas, los programas gubernamentales, la planificación territorial y las instituciones responsables de la gestión del agua. La disponibilidad de información, la coordinación entre organismos públicos y la priorización de inversiones en infraestructura hídrica influyen directamente en la calidad del servicio de abastecimiento y en la implementación de estrategias de monitoreo (Di Vaio et al. 2021; World Health Organization 2022). Una gobernanza política eficiente fortalece la transparencia, promueve la participación ciudadana y facilita la adopción de medidas preventivas para proteger las fuentes de agua destinadas al consumo humano (Remko, g, Peter M., y R. 2022).

8.17.4 Dimensión económica

La dimensión económica analiza los recursos financieros disponibles para la gestión del agua, los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento, la inversión en infraestructura y la capacidad económica de las comunidades para sostener los servicios hídricos. La disponibilidad de financiamiento condiciona la implementación de tecnologías de monitoreo, el mantenimiento de las redes de distribución y la ejecución de acciones orientadas a mejorar la calidad del agua (OECD 2022). Asimismo, una adecuada gestión económica favorece la sostenibilidad de los sistemas comunitarios y reduce la vulnerabilidad frente a problemas de abastecimiento (Machado, Oliveira, y Matos 2022).

8.17.5 Dimensión social

La dimensión social considera la participación comunitaria, la percepción del riesgo, la educación ambiental, la organización social y los hábitos relacionados con el uso del agua. La evidencia científica demuestra que la participación activa de la población fortalece la gobernanza del recurso hídrico, incrementa la aceptación de las medidas de protección ambiental y mejora la

sostenibilidad de los programas de monitoreo. Además, la integración del conocimiento local con la información científica facilita la construcción de soluciones adaptadas a las necesidades y características de cada comunidad (Danielsen et al. 2022; Roque, Alexandra et al. 2022).

8.17.6 Dimensión tecnológica

La dimensión social considera la participación comunitaria, la percepción del riesgo, la educación ambiental, la organización social y los hábitos relacionados con el uso del agua. La evidencia científica demuestra que la participación activa de la población fortalece la gobernanza del recurso hídrico, incrementa la aceptación de las medidas de protección ambiental y mejora la sostenibilidad de los programas de monitoreo. Además, la integración del conocimiento local con la información científica facilita la construcción de soluciones adaptadas a las necesidades y características de cada comunidad (de Camargo et al. 2023; Essamlali, Nhaila, y Khaili 2024).

8.17.7 Dimensión ecológica

La dimensión ecológica comprende los factores ambientales que condicionan la disponibilidad y calidad del agua, tales como el estado de conservación de las microcuencas, la cobertura vegetal, el uso del suelo, la contaminación difusa y los efectos del cambio climático. La degradación de los ecosistemas incrementa el riesgo de contaminación y reduce la capacidad natural de regulación hídrica, afectando el abastecimiento para consumo humano. En consecuencia, la conservación de los ecosistemas asociados al recurso hídrico constituye un elemento indispensable para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento y la seguridad hídrica de las comunidades (van Vliet et al. 2023; Vollmer et al. 2022).

8.17.8 Dimensión legal

La dimensión legal está conformada por el conjunto de normas, reglamentos e instituciones que regulan la protección, uso y gestión del recurso hídrico. En Ecuador, la Constitución de la

República reconoce al agua como un derecho humano fundamental, mientras que la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua establece los principios para su gestión integrada y participativa. El cumplimiento del marco jurídico garantiza la protección de las fuentes de abastecimiento, promueve la participación de las organizaciones comunitarias y fortalece la implementación de programas de monitoreo orientados a asegurar la calidad del agua destinada al consumo humano (Asamblea Nacional del Ecuador 2014a; Portilla y Geovanna 2025).

8.18 Aplicación del PESTEL en la gestión comunitaria del agua

La aplicación del análisis PESTEL en la gestión comunitaria del agua permite identificar de manera integral los factores externos que afectan la disponibilidad de agua segura y facilita la construcción de estrategias orientadas a fortalecer la gobernanza local (Fonseca et al. 2022b; Ozerol et al. 2018). Este enfoque resulta especialmente útil en investigaciones que emplean metodologías participativas, como los mapas cognitivos difusos, ya que posibilita organizar los conceptos identificados por la comunidad dentro de dimensiones estratégicas y analizar sus relaciones de influencia (Fonseca et al. 2022; Kosovac, Horne, y O'Donnell 2023). De esta manera, el análisis PESTEL contribuye a priorizar acciones de intervención, fortalecer la toma de decisiones y promover una gestión sostenible del recurso hídrico basada en la participación comunitaria y el conocimiento científico (Kosovac, Horne, y O'Donnell 2023; Kosovac et al. 2023).

8.18.1 Gobernanza del agua

La gobernanza del agua comprende el conjunto de procesos, normas, instituciones y mecanismos de participación mediante los cuales los diferentes actores públicos, privados y comunitarios toman decisiones relacionadas con la planificación, el uso, la protección y la gestión sostenible del recurso hídrico. Este enfoque promueve una gestión integrada que reconoce el agua

como un bien estratégico para el desarrollo humano, la conservación de los ecosistemas y el bienestar social, fortaleciendo la coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y la participación activa de la sociedad en la toma de decisiones (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2024; OECD 2021). En este contexto, la gobernanza constituye un elemento fundamental para garantizar la disponibilidad de agua segura, mejorar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento y fortalecer la capacidad de respuesta frente a los desafíos derivados del crecimiento poblacional, la contaminación y el cambio climático (UN-Water 2021).

8.18.2 *Gestión comunitaria del agua*

La gestión comunitaria del agua constituye uno de los principales modelos de administración de los servicios de abastecimiento en las zonas rurales del Ecuador, donde las Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento (JAAPS) desempeñan un papel esencial en la captación, distribución, operación y mantenimiento de los sistemas de agua para consumo humano. Este modelo se fundamenta en la participación organizada de la comunidad, la corresponsabilidad de los usuarios y la toma de decisiones colectivas, permitiendo garantizar la continuidad del servicio en territorios donde la cobertura institucional es limitada (Agencia de Regulación y Control del Agua 2023b). Diversos estudios destacan que el fortalecimiento de las capacidades técnicas y organizativas de estas juntas contribuye a mejorar la sostenibilidad de los sistemas, incrementar la calidad del servicio y promover una gestión más eficiente del recurso hídrico (Cajas, Ayala, y Herrera 2023; Moretta, Peña, y Lema 2022).

8.18.3 Marco legal ecuatoriano

En Ecuador, la gestión del agua se sustenta en un marco jurídico que reconoce al agua como un derecho humano fundamental y un patrimonio nacional estratégico de uso público. La Constitución de la República del Ecuador establece que el Estado es responsable de garantizar el

acceso universal, equitativo y sostenible al agua, mientras que la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA) dispone que la gestión del recurso debe desarrollarse bajo un enfoque público o comunitario, promoviendo la participación ciudadana, la conservación de las fuentes hídricas y la gestión integrada del recurso (Asamblea Nacional del Ecuador 2021). Asimismo, la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), mediante la Regulación Nacional DIR-ARCA-RG-012-2022, establece los lineamientos técnicos para el control de la calidad del agua destinada al consumo humano, fortaleciendo el funcionamiento de los prestadores públicos y comunitarios y promoviendo el monitoreo preventivo y operativo de los sistemas de abastecimiento (Agencia de Regulación y Control del Agua 2022).

18.8.4 Participación de actores locales

La gestión sostenible del agua requiere la participación coordinada de diversos actores locales, entre ellos las comunidades, las Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento, los Gobiernos Autónomos Descentralizados, las instituciones gubernamentales, las universidades y las organizaciones de la sociedad civil. La articulación entre estos actores permite fortalecer los procesos de gobernanza hídrica mediante el intercambio de conocimientos, la cooperación institucional y la construcción colectiva de estrategias para la conservación y manejo sostenible del recurso agua (Salamanca-Cano y Durán-Díaz 2023).

Asimismo, la participación comunitaria constituye un elemento fundamental para mejorar la gestión del agua, debido a que permite integrar conocimientos locales, fortalecer las capacidades organizativas y promover sistemas de monitoreo participativo que generan información útil para la toma de decisiones ambientales (Chinnasamy y Gupta 2024). En Ecuador, las Juntas Administradoras de Agua Potable representan mecanismos comunitarios de gestión que contribuyen a garantizar la prestación del servicio, la sostenibilidad del recurso hídrico y la

participación directa de los usuarios en la administración del agua (Instituto Nacional de Estadística y Censos 2023).

La participación activa de los diferentes actores favorece además la transparencia en la toma de decisiones, la apropiación social de los proyectos de monitoreo y la consolidación de modelos de gobernanza basados en la corresponsabilidad. Estudios recientes demuestran que la inclusión de actores locales en procesos ambientales mejora la efectividad de la gobernanza y aumenta la capacidad de respuesta frente a problemas relacionados con la calidad y disponibilidad del agua (Newig, Jens et al. 2023).

9 HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

9.1 Hipótesis

9.1.1 Hipótesis alternativas (H_a)

La implementación de un sistema de monitoreo de agua para consumo humano basado en ciencia abierta y ciudadana es viable para fortalecer la gestión comunitaria del recurso hídrico en el sector Salache.

9.1.2 Hipótesis nula (H_0)

La implementación de un sistema de monitoreo de agua para consumo humano basado en ciencia abierta y ciudadana no es viable para fortalecer la gestión comunitaria del recurso hídrico en la comunidad Salache.

9.2 Pregunta de investigación

¿Cómo influye la implementación de un sistema de monitoreo de agua para consumo humano, basado en ciencia abierta y ciudadana, sobre los factores (PESTEL) que determinan el acceso al agua segura en el sector Salache?

10 ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se desarrolla en el sector Salache, perteneciente a parroquia rural Eloy Alfaro, del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi el sector se localiza aproximadamente a 6 km al suroeste de la ciudad de Latacunga. El área de intervención comprende el sistema de abastecimiento de agua que sirve a los sectores de Salache Grande, Salache Rumipamba, Salache Angamarca, Taniloma y la Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CEYPSA) de la Universidad Técnica de Cotopaxi. El núcleo de gestión técnica, correspondiente a los bloques del CEYPSA, se registra en las coordenadas UTM N: 9888.749,37 y E: 764.660,386. La zona presenta una topografía irregular con pendientes pronunciadas hacia el cauce del río, con altitudes que varían desde los 2.703 m.s.n.m. en la intermedia, hasta los 3.047 m.s.n.m. en la zona alta de la unidad académica (Castro 2012).

Figura 1. Ubicación del sector Salache

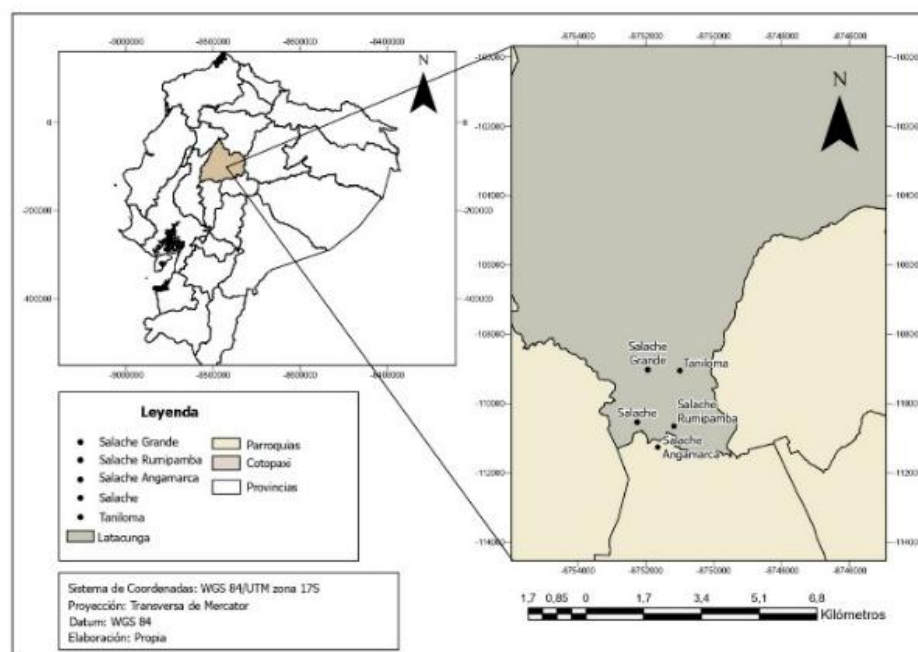
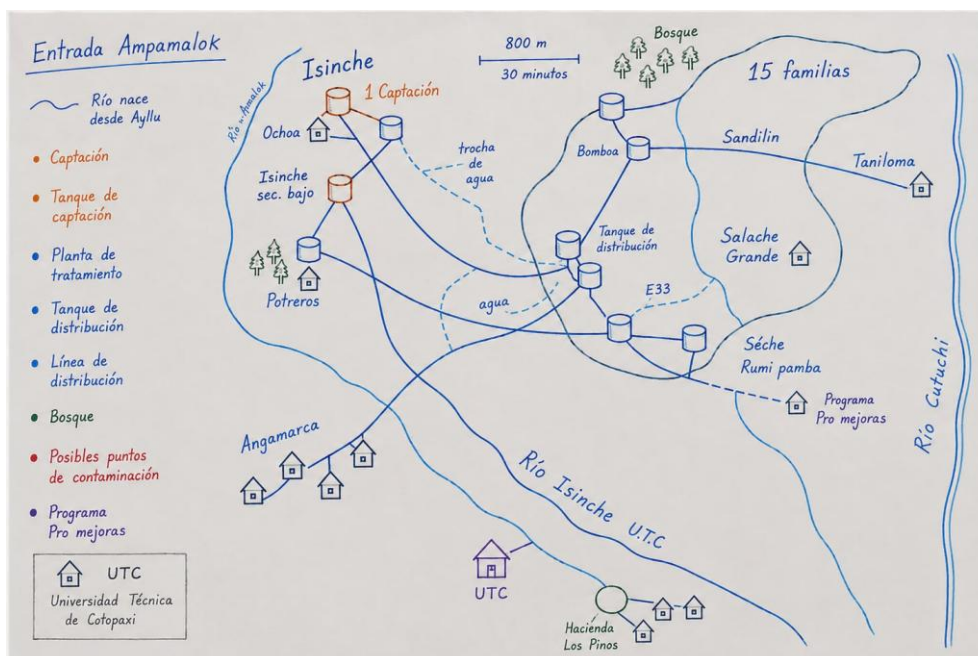


Figura 2. Ubicación del sector Salache. Elaborada por la comunidad



El entorno biofísico se caracteriza por un clima seco-templado a frío-húmedo, con una temperatura media anual que oscila entre los 10 °C y 13 °C. La pluviosidad en el sector se mantiene en un rango entre 250 mm y 500 mm anuales, con un periodo lluvioso marcando entre los meses de octubre y marzo. Hidrográficamente, el sistema está influenciado por la microcuenca del Río Isinche, cuerpo de agua que atraviesa los sectores de intervención y que constituye el eje hídrico principal según el mapeo comunitario. Ecológicamente, el área ha sufrido una alteración significativa, donde la cobertura vegetal nativa ha sido sustituida en un 65% por zonas de cultivo y pastizales, lo que incrementa el riesgo de contaminación difusa del recurso hídrico por actividades ganaderas (Castro 2012b).

Basado en el levantamiento participativo y la cartografía social realizada por habitantes, el sistema hídrico se estructura desde la captación en el Río Isinche y vertientes aledañas denominadas pro la comunidad como “Isinche de Jaldin” y “Potreros”, ubicadas a una cota de

2.380 m.s.n.m. con un aforo técnico de 4.6 l/s. La conducción se realiza mediante una línea de aproximadamente 4.000 metros en tubería de PVC de 110 mm, que atraviesa terrenos de topografía irregular. La infraestructura de almacenamiento, identificada como nodos críticos en el mapeo social, incluye el Tanque de Distribución (centro de reparto general), el Tanque de bombeo (para abastecer sectores de mayor elevación) y el “Tanque de la U” (destinado al servicio específico del CEYPSA). Actualmente no cuenta con procesos de desinfección ni tratamiento físico-químico, presentando niveles de dureza total de 328 mg/L y contaminación microbiológica por coliformes totales y aerobios mesófilos que superan los límites de la norma NTE INEN 1108 (Castro 2012).

Finalmente, el sistema abastece a una población mixta compuesta por residentes permanentes y población estudiantil flotante. De acuerdo con los datos demográficos, se registran 580 habitantes directos en el sector Salache y un total de 2.300 usuarios vinculados a la red general Salache-Angamarca, que integra a 1.200 residentes de la unidad académica. Adicionalmente, el proyecto estima un beneficio indirecto para 3.000 habitantes de la parroquia Eloy Alfaro que se relaciona con el entorno del ecosistema estudiando. Esta densidad poblacional y la vulnerabilidad técnica del sistema justifican la implementación del monitoreo basado en ciencia ciudadana propuesto en esta investigación.

10.1 Diseño metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto (cualitativo–cuantitativo), con el propósito de integrar el conocimiento técnico y el conocimiento local en el análisis de los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano en las comunidades del sector Salache. El enfoque mixto permite integrar información cualitativa y cuantitativa para comprender fenómenos complejos mediante la combinación de diferentes estrategias de investigación (Creswell & Plano Clark, 2018; Kabus et al., 2025). Este enfoque

permitió combinar herramientas participativas propias de la ciencia ciudadana con técnicas de modelación empleadas para representar el comportamiento del sistema de abastecimiento de agua.

La investigación se fundamentó en los principios de la ciencia abierta y la ciencia ciudadana, promoviendo la participación activa de los actores comunitarios en la identificación de los factores que afectan la gestión del recurso hídrico y en la construcción colectiva del conocimiento (UNESCO, 2021; Blanco-Ramírez et al., 2025). De esta manera, los participantes no solo aportaron información sobre la realidad de la comunidad, sino que contribuyeron a la identificación de las relaciones causales entre las variables analizadas (Tulloch et al., 2013).

Para sistematizar la información obtenida se empleó la metodología de los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Map, FCM), la cual permite representar de manera gráfica y matemática las relaciones de influencia entre variables dentro de sistemas complejos (Kosko, 1986; Özesmi & Özesmi, 2004; Fonseca et al., 2022). Posteriormente, el modelo fue desarrollado en el software Mental Modeler, permitiendo simular diferentes escenarios y evaluar la viabilidad de la propuesta de un sistema de monitoreo basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana (Gray et al., 2015; Fonseca et al., 2022).

10.2 Enfoque cualitativo

El enfoque cualitativo se fundamenta en la realización de talleres participativos con miembros de las comunidades del sector Salache, siguiendo los principios de la investigación participativa basada en la comunidad (CBPR). Ya que permite comprender la percepción y el conocimiento de los actores comunitarios respecto a los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano. La información fue obtenida mediante talleres participativos, en los cuales los participantes identificaron problemáticas, analizaron sus causas y establecieron las relaciones existentes entre los diferentes componentes del sistema (Creswell &

Creswell, 2023).

Asimismo, la revisión documental permitió complementar la información obtenida en campo mediante el análisis de literatura científica, normativa nacional e internacional y documentos técnicos relacionados con la gestión del recurso hídrico, la ciencia abierta, la ciencia ciudadana y los sistemas de monitoreo ambiental (Creswell & Creswell 2023; Snyder, 2019).

Los factores identificados fueron organizados mediante el análisis PESTEL, permitiendo clasificarlos en las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal, lo que facilitó la comprensión integral del sistema comunitario de abastecimiento de agua (Fonseca et al., 2024).

En conjunto, el enfoque cualitativo permitió integrar el conocimiento técnico obtenido mediante la revisión bibliográfica con el conocimiento local aportado por los actores comunitarios durante los talleres participativos. Esta información constituyó la base para la identificación de las variables del sistema y la posterior construcción del Mapa Cognitivo Difuso (FCM), utilizado para representar las relaciones causales entre los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano (Fonseca et al., 2022).

10.3 Enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo permitió representar y analizar de forma matemática las relaciones causales entre los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano en el sector Salache. Para ello, se empleó la metodología de los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Maps, FCM), mediante la cual las relaciones de influencia identificadas durante el proceso participativo fueron transformadas en valores numéricos, posibilitando el análisis estructural y la simulación del comportamiento del sistema (Creswell & Creswell, 2023; Fonseca et al., 2022).

Las relaciones causales fueron valoradas utilizando una escala de influencia comprendida entre -3 y $+3$, donde los valores negativos representan influencias adversas, los positivos indican influencias favorables y el valor cero expresa ausencia de relación causal. Posteriormente, esta información fue organizada en una matriz de adyacencia e incorporada al software Mental Modeler, herramienta utilizada para construir el modelo conceptual, calcular los índices de la teoría de grafos y desarrollar las simulaciones de los escenarios planteados en la investigación (Gray et al., 2015; Fonseca et al., 2022).

10.4 Variables de estudio

La determinación de las variables de estudio responde a la necesidad de analizar de manera integral los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano en las comunidades del sector Salache. Debido a que la gestión del recurso hídrico constituye un sistema socioecológico complejo, la investigación adopta un enfoque multidimensional que integra factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales mediante el análisis PESTEL, permitiendo representar las interacciones existentes entre las diferentes variables del sistema, las cuales constituyen la base para la modelación de sistemas complejos mediante Mapas Cognitivos Difusos (Fonseca et al., 2024).

En este sentido, el estudio evalúa la implementación de un sistema de monitoreo de agua de consumo humano basado en los principios de la ciencia abierta y la ciencia ciudadana como una estrategia para fortalecer la generación de información confiable y apoyar la toma de decisiones comunitarias. Para comprender dicha relación, se establecen una variable independiente y una variable dependiente, mientras que el marco de PESTEL se emplea como herramienta metodológica para organizar y analizar los conceptos que intervienen en el sistema representado mediante Mapas Cognitivos Difusos.

- **Variable dependiente**

Sistema de monitoreo de agua de consumo humano basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana.

Esta variable corresponde a la estrategia propuesta por la investigación para fortalecer el monitoreo comunitario del agua mediante el uso de tecnologías de código abierto, la participación activa de las comunidades y la generación de información accesible para la toma de decisiones.

- **Variable Independiente**

Disponibilidad de agua segura para consumo humano.

Esta variable representa el resultado esperado del estudio y refleja las condiciones que permiten garantizar el acceso de la población a agua apta para el consumo humano, considerando los factores que influyen en su gestión, protección y monitoreo.

- **Dimensiones de análisis**

Con el propósito de comprender la complejidad del sistema de gestión del agua, la variable dependiente se analiza mediante las seis dimensiones del modelo PESTEL, las cuales permiten clasificar los conceptos.

- **Dimensión política:** comprende los factores relacionados con las políticas públicas, el acceso a información hídrica, la gobernanza y el apoyo institucional para la gestión del agua.
- **Dimensión económica:** incluye los aspectos vinculados con el financiamiento, los costos de operación y mantenimiento, la disponibilidad de recursos económicos y la sostenibilidad financiera de los sistemas comunitarios
- **Dimensión social:** considera la participación comunitaria, la alfabetización hídrica, la percepción del riesgo, la organización social y el compromiso de la población en

la gestión del recurso hídrico.

- **Dimensión tecnológica:** abarca la disponibilidad y utilización de tecnologías para el monitoreo de la calidad del agua, sensores, herramientas de código abierto, plataformas digitales y sistemas de información.
- **Dimensión ecológica:** analiza las condiciones ambientales que influyen en la disponibilidad y calidad del agua, como la contaminación, la conservación de las fuentes hídricas, la deforestación, la variabilidad climática y otros procesos ecológicos.
- **Dimensión legal:** comprende el cumplimiento del marco normativo vigente relacionado con la gestión del agua, las competencias institucionales, las regularizaciones ambientales y las responsabilidades legales de los actores involucrados.

Los conceptos obtenidos dentro de estas seis dimensiones constituyen los nodos del Mapa Cognitivo Difuso (FCM), permitiendo representar las relaciones causales entre los diferentes factores que influyen en la disponibilidad de agua segura y evaluar escenarios mediante la herramienta Mental Modeler.

10.5 Método

10.5.1 Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Map, FCM)

La presente investigación empleó los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Map, FCM) como método de modelación para representar y analizar las relaciones causales entre los factores que influyen en la disponibilidad de agua segura para consumo humano en la comunidad Salache. Los FCM constituyen una herramienta de modelación ampliamente utilizada para el análisis de sistemas complejos, ya que permiten representar conceptos o variables mediante nodos

interconectados por relaciones causales ponderadas, integrando el conocimiento científico con el conocimiento local de los actores involucrados en el sistema (Chen & Chiu, 2021; Fonseca et al., 2024).

La construcción del modelo se desarrolló a partir de las variables identificadas mediante el análisis PESTEL y de las relaciones causales definidas durante los talleres participativos con los actores comunitarios. Posteriormente, dichas relaciones fueron organizadas en una matriz de adyacencia e incorporadas al software Mental Modeler, herramienta diseñada para construir, visualizar y analizar mapas cognitivos difusos mediante técnicas basadas en teoría de grafos y simulaciones dinámicas, permitiendo representar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de gestión (Gray et al., 2015).

La aplicación de este método permitió analizar el comportamiento del sistema de abastecimiento de agua, identificar las variables con mayor influencia sobre la disponibilidad de agua segura y evaluar el efecto esperado de la propuesta de un sistema de monitoreo basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana mediante la simulación de diferentes escenarios de gestión, facilitando el análisis de las interacciones entre los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que conforman el sistema estudiado (Fonseca et al., 2024).

10.6 Técnicas

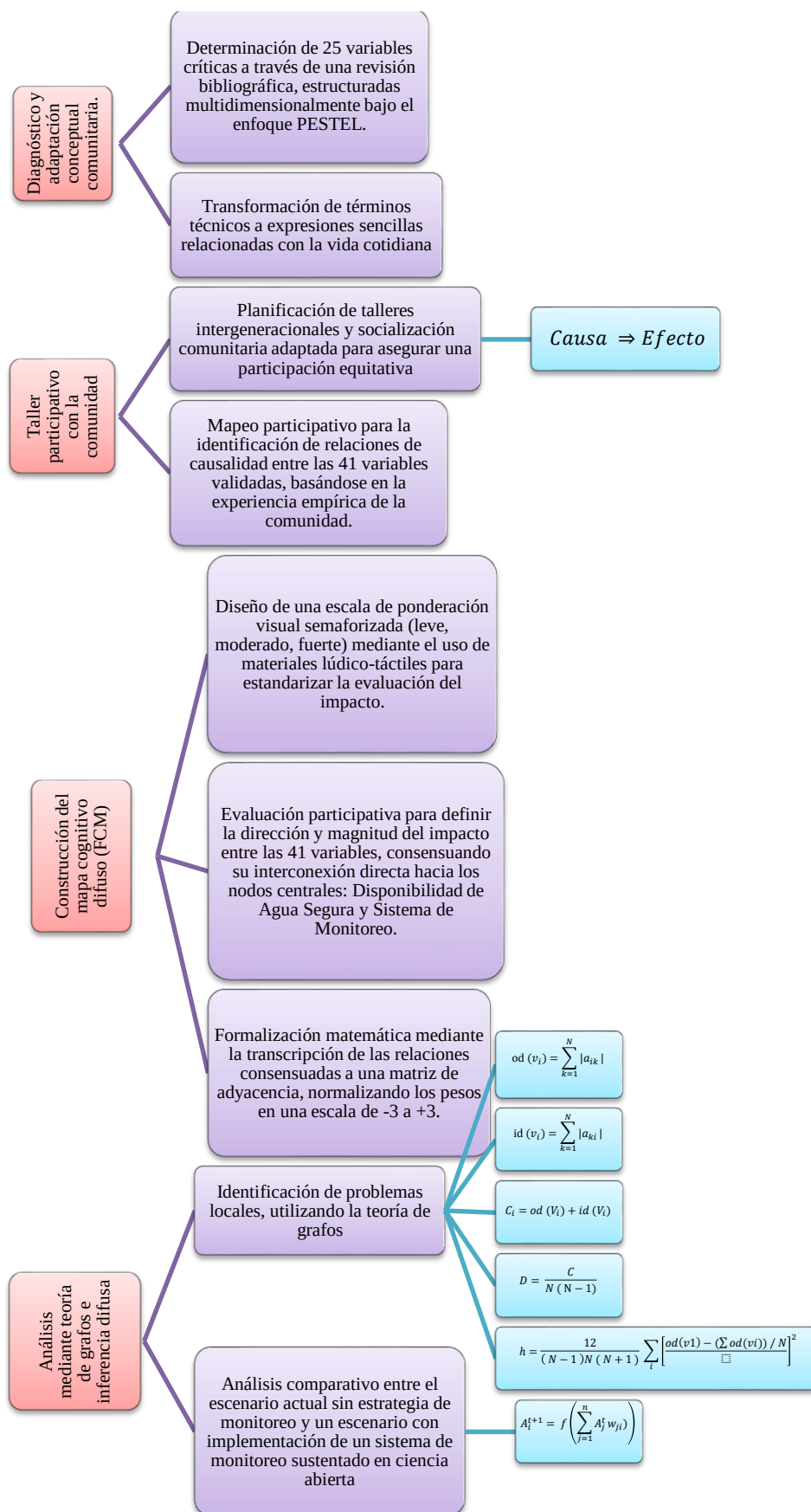
10.6.1 Muestreo no probabilístico de tipo intencional con selección progresiva de participantes clave

La investigación empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, debido a que los participantes fueron seleccionados deliberadamente por su conocimiento, experiencia y relación directa con la gestión comunitaria del agua en el sector Salache. Este tipo de muestreo es adecuado en investigaciones con enfoque participativo, ya que permite incorporar informantes que

poseen información relevante para comprender el fenómeno estudiado.

La selección de los participantes inició con actores clave identificados junto con los dirigentes de la comunidad y la Junta Administradora del Agua Potable. Posteriormente, durante el desarrollo del proceso participativo, estos actores sugirieron la incorporación de otros miembros de la comunidad que contaban con experiencia o conocimiento sobre el abastecimiento, manejo, monitoreo y uso del agua. Esta incorporación progresiva tuvo como finalidad enriquecer la diversidad de perspectivas y fortalecer la construcción colectiva de los conceptos utilizados en el análisis PESTEL y en la elaboración del Mapa Cognitivo Difuso.

Figura 3. Metodología



10.7 Fases de investigación

10.7.1 Adaptación de conceptos al contexto comunitario

La adaptación y simplificación de conceptos constituyó una fase fundamental dentro del proceso metodológico de la presente investigación, debido a que permitió transformar los conceptos PESTEL previamente identificados en la revisión bibliográfica realizada por Alvarado Peralta y De La Cruz Minda (2026). En expresiones comprensibles para los actores comunitarios del sector Salache. Este proceso facilitó la participación activa de los habitantes durante la construcción del Mapa Cognitivo Difuso (FCM), reduciendo las barreras asociadas al uso de lenguaje especializado y promoviendo la integración del conocimiento local con el conocimiento científico (Fonseca et al., 2022). Los conceptos fueron analizados y adaptados teniendo en cuenta el contexto social, ambiental y cultural de la comunidad, manteniendo su significado original, pero expresándolos en términos relacionados con las experiencias cotidianas de los participantes (Özesmi y Özesmi 2004a). Este proceso participativo permitió explicar cada variable mediante ejemplos relacionados la gestión del agua, la disponibilidad de agua segura y problemas identificados en la región, donde los miembros de la comunidad analizaron la interpretación de cada concepto, sugirieron ajustes y adicciones a su redacción, garantizando que las variables reflejen adecuadamente la percepción local del sistema. Como resultado esta fase respondió a los principios de la ciencia ciudadana, donde los participantes actuaron como participantes activos en la generación, interpretación y validación del conocimiento ambiental, creando un lenguaje común entre investigadores que permitió que las variables PESTEL, utilizadas posteriormente en la construcción del Mapa Cognitivo Difuso, reflejaran tanto en evidencia científica disponible como percepción y experiencia de los actores involucrados en la gestión del agua en el sector Salache (Blanco-Ramírez, Sara et al. 2025; Lopolito et al. 2020).

10.7.2 Taller participativo con la comunidad

Una vez adaptados al contexto local, se desarrolló talleres participativos con miembros del sector Salache durante los meses de mayo y junio del 2026, separando en 2 grupos, cada uno con 10 participantes con el propósito identificar y facilitar la construcción de FCM. Los participantes aportaron ideas basados en sus experiencias vividas.

Previo al desarrollo del taller participativo, se realizó una explicación detallada a los participantes sobre los objetivos de la investigación, la metodología de trabajo y la forma en que se identificarían los conceptos y las relaciones causales entre ellos. Esta fase de socialización permitió que los participantes comprendieran el proceso y participaran activamente durante las actividades planteadas.

El sector de Salache está conformada principalmente por adultos mayores y jóvenes, presentando una diversidad en los niveles de formación académica, desde personas con educación básica y media hasta participantes con niveles educativos superiores. Debido a esta heterogeneidad, se empleó un lenguaje claro y accesible, evitando el uso excesivo de terminología técnica y adaptando los conceptos al contexto sociocultural de la comunidad, con el fin de garantizar una participación equitativa y una adecuada comprensión de la dinámica del taller.

10.7.3 Transformación conceptos complejos a simples

La adaptación de los 25 conceptos complejos a expresiones sencillas y ejemplos relacionados con la realidad local, manteniendo su significado principal para facilitar la comprensión y participación activa del sector Salache. Este proceso permitió facilitar la comprensión de los participantes, considerando que la población está conformada principalmente por adultos mayores, jóvenes y habitantes con diferentes niveles de formación académica. Para

ello, se adaptaron los conceptos relacionados con la calidad de agua, monitoreo comunitario, ciencia ciudadana, ciencia abierta y factores que influyen en el recurso hídrico. Esta transformación favoreció una comunicación efectiva durante las actividades participativas, permitiendo que los habitantes relacionen los conceptos con sus experiencias cotidianas, identifiquen problemáticas asociadas al agua y contribuyan en la construcción colectiva del conocimiento y determinación de las relaciones entre los conceptos.

10.7.4 Construcción del Mapa Cognitivo Difuso (FCM)

La construcción del Mapa Cognitivo Difuso (*Fuzzy Cognitive Map, FCM*) se desarrolló durante el taller participativo, en el cual los miembros del sector, guiados por el equipo investigador, evaluaron de manera participativa las relaciones causales entre 41 conceptos previamente definidos. Estos conceptos fueron distribuidos aleatoriamente sobre papelotes asignándose 20 conceptos para un grupo y 20 al otro, y las relaciones entre ellos fueron representadas mediante conectores dinámicos (flechas direccionales). Con el propósito de facilitar la comprensión y participación de las comunidades, el equipo investigador adaptó la escala tradicional de ponderación mediante un sistema visual tipo semáforo elaborado con fomix y emojis donde el color rojo (emoji llorando) representó un impacto leve (magnitud 1), el naranja (emoji triste) un impacto moderado (magnitud 2) y el verde (Emoji feliz) un impacto fuerte (magnitud 3). Durante la dinámica, los participantes discutieron y consensuaron el nivel de impacto ejercido por cada variable sobre las demás, mientras que el equipo investigador se encargó de registrar las relaciones identificadas y de representar gráficamente las conexiones sobre los papelotes. Una vez establecida las relaciones entre las variables causales y los conceptos principales de efecto correspondientes a la Disponibilidad de Agua Segura y Sistema de Monitoreo, se procedió a interconectar la totalidad de los 41 conceptos. Finalmente las relaciones identificadas fueron

transformadas en matrices de adyacencia cuantitativas utilizando una escala de ponderación comprendida entre -3 y +3 para su posterior modelado computacional mediante la metodología de Mapas Cognitivos Difusos siguiendo el enfoque adaptado de (Gray et al. 2015).

10.7.5 Evaluación del Mapa Cognitivo Difuso

Los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Maps, FCM) constituyen herramientas semicuantitativas ampliamente utilizadas para representar y analizar sistemas complejos caracterizados por múltiples interacciones e incertidumbre, integrando conocimientos provenientes tanto de expertos como de actores locales y comunidades (Özesmi & Özesmi, 2004). esta metodología, propuesta inicialmente por Kosko (1986), se basa en la representación de conceptos mediante nodos y de sus relaciones causales mediante conexiones dirigidas y ponderadas, cuyos valores permiten identificar la dirección y magnitud de la influencia entre variables. De acuerdo con Gray et al. (20215), los FCM facilitan los procesos participativos y la toma de decisiones al permitir la visualización de las percepciones de los participantes sobre el funcionamiento del sistema, promoviendo además el aprendizaje social y la construcción colectiva del conocimiento. Asimismo, Papageorgiou y Salmeron, (2013). señalan que la combinación de Mapas Cognitivos y lógica difusa permite modelar la incertidumbre inherente a los sistemas socio ecológicos y simular el comportamiento dinámico de sus componentes a través del tiempo. En el ámbito de la gestión hídrica, los Mapas Cognitivos Difusos han sido utilizados para identificar variables clave, analizar escenarios y comprender las interacciones entre actores, políticas, factores económicos, prácticas de manejo y variables ambientales que influyen en la gobernanza y sostenibilidad del recurso hídrico (Shahvi, Shervin et al. 2021).

10.7.6 Análisis mediante teoría de grafos

La teoría de grafos constituye una herramienta matemática utilizada para analizar la

estructura de los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Maps, FCM), permitiendo representar, analizar y cuantificar relaciones causales existentes entre las variables que conforman un sistema complejo. En un FCM, cada concepto identificado durante el proceso participativo se representa como un nodo, mientras que las relaciones de influencia entre ellos se representan mediante aristas dirigidos y ponderadas, cuyos pesos expresan la intensidad y dirección del efecto causal entre las variables (Gray, Steven et al. 2021; Özesmi y Özesmi 2004b).

En la presente investigación, la teoría de grafos se empleó para analizar la estructura del sistema de monitoreo del agua para consumo humano en el sector Salache. Este análisis se realizó mediante el cálculo de indicadores estructurales como el grado de salida (outdegree), grado de entrada (indegree), centralidad y densidad (Density) del mapa cognitivo difuso. Estos indicadores facilitaron la identificación de variables impulsoras, receptoras y estratégicas del sistema, diferenciando aquellos factores que generan mayor influencia sobre la red causal de aquellas cuya dinámica depende principalmente de otras variables (Doukas y Nikas 2020; Gray, Steven et al. 2021) (Gray et al., 2015).

El grado de salida (outdegree) representa la influencia total que una variable ejerce sobre las demás variables del sistema. Se calcula mediante la suma de los pesos absolutos de todas las conexiones causales salientes de un nodo determinado. Las variables con valores elevados de Outdegree fueron consideradas factores impulsores del sistema, debido a su capacidad para influir sobre un mayor número de variables (Chen 2022; Özesmi y Özesmi 2004).

Ec. 1

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

Donde:

$od(v_i)$: grado de salida de la variable i .

a_{ik} : peso de la relación causal entre la variable i y la variable k .

N : número total de variables del modelo.

El grado de entrada (Indegree), representa la influencia total recibida por una variable a partir de las demás variables presentes en el sistema. Se calcula mediante la suma de los pesos absolutos de todas las conexiones dirigidas hacia un nodo determinado. Las variables con valores elevados de Indegree se consideran variables receptoras, ya que su comportamiento en mayor medida de los cambios producidos por otros componentes del sistema (Chen 2022; Solana-Gutiérrez et al. 2017).

Ec. 2

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

Donde:

$id(v_i)$: grado de entrada de la variable i .

a_{ki} : peso de la relación causal entre la variable k y la variable i .

N : número total de variables del modelo.

La centralidad (Centrality) representa la importancia estructural de cada variable dentro del mapa y se obtiene mediante la suma de grado de salida y el grado de entrada. Las variables con mayor centralidad corresponden a los conceptos más relevantes del sistema, debido a que simultáneamente ejercen influencia sobre otras variables y reciben influencia de ellas, desempeñando un papel estratégico dentro de la dinámica del modelo (Chen 2022; Gray, Steven

et al. 2021).

Ec. 3

$$C_i = od(V_i) + id(V_i)$$

Donde:

C_i : centralidad de la variable i.

$od(V_i)$: grado de salida.

$id(V_i)$: grado de entrada.

Además, se evaluó la densidad del mapa cognitivo difuso con el propósito de determinar el nivel de conectividad existente entre las variables identificadas. Este indicador representa la proporción entre el número de relaciones causales existentes y el número máximo posible de conexiones dentro del modelo. Una mayor densidad indica un sistema con mayor interacción entre sus componentes, mientras que valores bajos representan sistemas con relaciones más limitadas entre variables (Doukas y Nikas 2020).

Ec. 4

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

Donde

D: densidad del mapa cognitivo.

C: número total de conexiones existentes.

N: número de variables del sistema.

Otros componentes estructurales incluyen el índice de jerarquía, que determina si el sistema es democrático o está centralizado.

El índice de jerarquía se calcula mediante la siguiente expresión:

Ec. 5

$$h = \frac{12}{(N-1)N(N+1)} \sum_i \left[\frac{od(v1) - (\sum od(vi)) / N}{N} \right]^2$$

Donde:

h = índice de jerarquía.

N = número total de conceptos (nodos) del mapa cognitivo.

od(V_i) = grado de salida (*outdegree*) del concepto V_i , correspondiente a la suma de los pesos absolutos de las conexiones salientes del nodo.

$\sum od(V_i)$ = suma de los grados de salida de todos los conceptos.

Finalmente, los indicadores estructurales obtenidos permitieron identificar las variables impulsoras, receptoras y estratégicas del sistema de monitoreo de agua para consumo humano en la comunidad Salache, Esta información constituyó la base para el desarrollo de la inferencia difusa y percepciones de los actores involucrados dentro de una estructura matemática, facilitando el análisis de sistemas socioambientales donde la información cuantitativa es limitada (Fonseca et al. 2022a).

10.7.7 Inferencia difusa y simulación de escenarios

La inferencia difusa constituye una etapa fundamental dentro del análisis de los Mapas Cognitivos Difusos (Fuzzy Cognitive Map, FCM), debido a que permite evaluar el comportamiento dinámico de sistemas complejos mediante la propagación de las relaciones causales establecidas entre las variables del modelo. A diferencia de los métodos estadísticos convencionales, la inferencia difusa incorpora incertidumbre, conocimiento experto y percepciones de los actores involucrados dentro de una estructura matemática, facilitando el análisis de sistemas socioambientales donde la información cuantitativa puede ser limitada (Doukas y Nikas 2020; Özesmi y Özesmi 2004b).

En esta investigación, la inferencia difusa se aplicó a partir de la matriz de adyacencia obtenida durante la construcción del Mapa Cognitivo Difuso, en la cual las variables simples derivadas del análisis PESTEL fueron representadas como nodos interconectados mediante relaciones causales con valores ponderados. Los pesos asignaron permitieron representar intensidad y dirección de la influencia entre variables, transformando el conocimiento generado durante los talleres participativos en un modelo dinámico de análisis para el sistema de monitoreo del agua para consumo humano (Fonseca et al. 2022a; Gray, Steven et al. 2021).

El funcionamiento del modelo se fundamentó en un proceso iterativo en el cual el estado de cada variable se actualiza considerando la influencia acumulada de las variables conectadas y los pesos asignados a sus relaciones causales. Matemáticamente, la actualización del estado de los conceptos se expresa mediante la siguiente ecuación:

Ec. 6

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

Donde:

A_i^{t+1} : valor actualizado de la variable i.

A_j^t : valor de la variable j en la iteración anterior.

w_{ji} : peso de la relación casual desde la variable j hacia la variable i.

n : número total de variable.

f : función de activación que mantiene los resultados dentro del intervalo de valores permitido por el modelo.

Para garantizar la estabilidad del modelo y evitar que los valores obtenidos durante las iteraciones exceden el intervalo permitido, se empleó una función de activación no lineal de tipo sigmoide, ampliamente utilizada en los Mapas Cognitivos Difusos. Esta función permite normalizar los valores obtenidos y favorecer la convergencia del sistema hacia un estado de equilibrio, facilitando la comparación entre diferentes escenarios de simulación (Gray, Steven et al. 2021).

La función sigmoide utilizada se expresa como:

Ec. 7

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

Donde:

$f(x)$: valor de activación de la variable.

x : suma ponderada de las influencias recibidas por la variable.

e : base de los logaritmos naturales ($\approx 2,71828$).

λ : parámetro de pendiente más abruptas, mientras que valores bajos producen cambios más graduales.

La aplicación de esta función permitió mantener los valores de activación dentro de un rango definido durante cada iteración del modelo, evitando incrementos ilimitados y favoreciendo la convergencia del sistema hacia un estado estable.

Con base en este procedimiento, se plantearon diferentes escenarios para evaluar el efecto potencial de la implementación de un sistema de monitoreo del agua para consumo humano basado en los principios de ciencia abierta y ciencia ciudadana. El escenario inicial representó la condición actual del sistema, mientras que el escenario alternativo incorporó el fortalecimiento del monitoreo participativo, el acceso a información hídrico confiable, la generación colaborativa de datos y una

mayor articulación entre los actores comunitarios e institucionales,

La comparación entre escenarios permitió analizar la respuesta del sistema ante la incorporación de estrategias de monitoreo comunitario, identificando los cambios generados en las variables estratégicas y su influencia sobre la gestión del agua para consumo humano en la comunidad Salache. De esta manera, la inferencia difusa constituyó una herramienta para apoyar la toma de decisiones y evaluar el efecto potencial de las estrategias propuestas desde una perspectiva integral, considerando las interacciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales que intervienen en la gestión comunitaria (Fonseca et al., 2022; UNESCO, 2021) (Fonseca et al. 2022a; UNESCO 2021b).

10.7.8 Diseño del manual para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana

El manual metodológico fue diseñado como una herramienta orientadora para facilitar el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad de agua en la comunidad de Salache, integrando los principios de ciencia.

El diseño del manual metodológico constituyó una fase fundamental dentro de la investigación, orientada a proporcionar una herramienta práctica, participativa y replicable que permita a las comunidades rurales implementar sistemas comunitarios de monitoreo del agua basados en los principios de ciencia abierta y ciencia ciudadana (Fonseca et al., 2022). El manual fue estructurado siguiendo un enfoque pedagógico funcional, priorizando instrucciones breves, lenguaje sencillo, secuencias paso a paso y apoyo visual, con el objetivo de reducir errores operativos y promover la autonomía comunitaria en el manejo del sistema (Cassidy et al., 2020; Dominguez Zúñiga, 2025). Mapas Cognitivos Difusos (FCM), considerando los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la gestión del recurso

hídrico en el sector Salache, lo que permitió que el contenido responda a las necesidades y realidades específicas del territorio (Fonseca et al., 2024; Gray et al., 2015). La propuesta del manual constituye un aporte práctico para fortalecer la generación, gestión y disponibilidad de información sobre la calidad del agua mediante la participación activa de los actores comunitarios, promoviendo que las comunidades no sean únicamente receptoras de información, sino participantes activos en la recopilación, interpretación y utilización de datos ambientales para la toma de decisiones (UNESCO, 2021; Warner et al., 2024).

10.8 Diseño estadístico

El diseño estadístico de la presente investigación se orientó al análisis descriptivo de la estructura del Mapa Cognitivo Difuso (Fuzzy Cognitive Map, FCM) construido mediante la integración del conocimiento técnico y comunitario. Debido a la naturaleza participativa y sistémica del estudio, no se aplicaron métodos estadísticos inferenciales, sino indicadores cuantitativos derivados de la teoría de grafos que permitieron evaluar la importancia relativa de las variables dentro del sistema de disponibilidad de agua segura para consumo humano.

El análisis estadístico permitió complementar la interpretación cualitativa obtenida durante los talleres participativos mediante la cuantificación de las relaciones causales establecidas entre las variables identificadas bajo el enfoque PESTEL. De esta manera, los indicadores calculados permitieron determinar las variables con mayor influencia dentro del sistema y evaluar su comportamiento durante la simulación de escenarios mediante inferencia difusa.

Los Mapas Cognitivos Difusos constituyen una herramienta de modelación semicuantitativa que permite representar sistemas complejos mediante conceptos interconectados y relaciones causales ponderadas, facilitando el análisis de sistemas donde existe incertidumbre y conocimiento experto o comunitario disponible (Özesmi & Özesmi, 2004; Fonseca et al., 2022).

10.8.1 Estadístico descriptivo de los índices del mapa cognitivo difuso de la teoría de grafos

Para evaluar la estructura del mapa cognitivo difuso se aplicaron indicadores provenientes de la teoría de grafos, considerando las relaciones existentes entre las variables del sistema. Los índices utilizados fueron el grado de salida (outdegree), grado de entrada (indegree) y centralidad, los cuales permitieron identificar las variables con mayor capacidad de influencia y recepción dentro de la red causal.

El grado de salida representa la influencia que una variable ejerce sobre otras variables del sistema, mientras que el grado de entrada representa la cantidad de influencia recibida desde otros elementos del modelo. La centralidad corresponde a la suma de ambos indicadores y permite determinar la importancia global de una variable dentro del sistema analizado (Özesmi & Özesmi, 2004; Kosko, 1986).

Los valores obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva utilizando medidas de tendencia central y dispersión, considerando parámetros como media aritmética, desviación estándar, valores máximos y mínimos. Estos indicadores permitieron establecer la distribución de la influencia entre las variables y reconocer aquellas que presentan mayor relevancia dentro del sistema comunitario de gestión del agua.

La densidad del mapa también fue considerada como un indicador estructural, debido a que permite determinar el nivel de conectividad existente entre las variables mediante la relación entre el número de conexiones reales y el número máximo de conexiones posibles dentro del modelo (Özesmi & Özesmi, 2004).

10.8.2 Justificación del tamaño muestral para el taller participativo

La selección del número de participantes para la construcción del mapa cognitivo difuso

se fundamentó en criterios propios de la investigación participativa y del muestreo no probabilístico de tipo intencional con selección progresiva de participantes clave. Debido a que el objetivo del estudio no fue obtener una estimación estadística poblacional, sino integrar conocimiento local sobre la gestión del recurso hídrico, en concordancia con el Objetivo Especifico 1 de identificar los principales conceptos PESTEL que afectan la calidad del agua en la comunidad de Salache, el tamaño de muestra fue determinado considerando la experiencia, participación y conocimiento de los actores involucrados en el sistema comunitario de abastecimiento de agua.

En estudios basados en Mapas Cognitivos Difusos participativos, la cantidad de participantes se establece principalmente mediante el criterio de saturación de información, es decir, cuando la incorporación de nuevos participantes no genera nuevas variables o relaciones causales significativas dentro del modelo conceptual (Gray et al., 2015).

Por esta razón, los participantes fueron seleccionados considerando su relación directa con la gestión, uso y conocimiento del sistema de agua comunitario de Salache, incluyendo actores vinculados con la administración del recurso hídrico, usuarios del sistema y miembros de la comunidad.

La selección de los participantes inició con actores clave identificados junto con los dirigentes de las comunidades y la Junta Administradora del Agua. Posteriormente, durante el desarrollo del proceso participativo, estos actores sugirieron la incorporación de otros miembros de la comunidad que contaban con experiencia o conocimiento sobre el abastecimiento, manejo, monitoreo y uso del agua. Esta incorporación progresiva tuvo como finalidad enriquecer la diversidad de perspectivas y fortalecer la construcción colectiva de los conceptos utilizados en el análisis PESTEL y en la elaboración del Mapa Cognitivo Difuso. A diferencia del muestreo por bola de nieve, la incorporación de nuevos participantes no respondió a la búsqueda de poblaciones

difíciles de localizar, sino al criterio metodológico de incluir personas con conocimiento relevantes para el estudio, hasta alcanzar suficiente información para representar la realidad de las comunidades y cumplir los objetivos de la investigación.

El proceso se desarrolló mediante dos talleres participativos realizados durante los meses de mayo y junio de 2026, con 10 participantes en cada grupo (20 en total), separados para facilitar la dinámica grupal y garantizar la participación activa de todos los asistentes. La saturación de información se alcanzó cuando los conceptos y relaciones causales identificados en el segundo taller no aportaron variables significativamente diferentes a las ya registradas en el primero, consolidando un modelo robusto de 41 conceptos PESTEL validados consolidando un modelo robusto de 41 conceptos PESTEL validados por la comunidad. Esta metodología se corresponde con las actividades y resultados esperados establecidos en la Tabla 2 del presente estudio.

11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.1 Identificación de los principales conceptos PESTEL que inciden en la disponibilidad de agua segura, a partir de la adaptación de la revisión bibliográfica.

La identificación de los conceptos PESTEL se realizó tomando como referencia la propuesta de Alvarado Peralta y De La Cruz Minda (2026), la cual fue adaptada al contexto de la presente investigación y complementada con literatura científica reciente, los cuales permitieron reconocer los factores externos que condicionan la gestión del recurso hídrico y la disponibilidad de agua segura. Posteriormente, estos conceptos fueron organizados y clasificados de acuerdo con cada componente político, económico, social, tecnológico, ecológico y legal, facilitando el análisis integral del sistema estudiado.

Tabla 3. Adaptación de conceptos PESTEL obtenidos de revisión bibliográfica

POLÍTICO

Conceptos	ID	Fuente
Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos.	P1	(Hernández Pasichana et al., 2018)
Acceso a la información hídrica.	P2	(Paris & Marano, 2017)
Información veraz de la calidad del agua.	P3	(French, 2016)
Priorización estatal del abastecimiento seguro.	P4	(Padilla et al., 2013)
ECONÓMICO		
Conceptos	ID	Fuente
Inversión en infraestructura de potabilización.	Ec1	(Sánchez Llanos et al., 2025)
Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.	Ec2	(Arellano et al., 2018)
Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento.	Ec3	(Heredia et al., 2020)
Valoración económica de los servicios ambientales.	Ec4	(Becerra-Perenguez et al., 2023)
Costos de tecnologías de medición.	Ec5	(Wilches-Visbal et al., 2022)
SOCIAL		
Conceptos	ID	Fuente
Percepción del riesgo por contaminación del agua.	S1	(Caputo et al., 2022)
Alfabetización hídrica.	S2	(McCarroll & Hamann, 2020)
Participación comunitaria en la vigilancia ambiental.	S3	(Reyes-García et al., 2022)
Acceso equitativo al agua segura.	S4	(Payes & Melany, 2016)
TECNOLÓGICO		
Conceptos	ID	Fuente

Tecnologías para la detección de contaminantes.	T1	(Huntley et al., 2002)
Tecnologías para la detección de contaminantes emergentes.	T2	(Huntley et al., 2002)
Eficiencia de plantas de tratamiento.	T3	(Cassidy et al., 2020)
Confiabilidad de los sensores.	T4	(Jesus et al., 2014)

ECOLÓGICO

Conceptos	ID	Fuente
Valoración ecológica de los servicios ambientales.	EI1	(Shang et al., 2022)
Disponibilidad hídrica en fuentes naturales.	EI2	(Melaku Melese, 2016)
Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos.	EI3	(Almudi & Sinclair, 2022)
Presencia de contaminantes antropogénicos.	EI4	(Râpă et al., 2023)
Presencia de contaminantes naturales.	EI5	(Espósito et al., 2011)

LEGAL

Conceptos	ID	Fuente
Cumplimiento normativo de la calidad del agua.	L1	(Ćosić-Flajsig & Karleuša, 2014)
Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua.	L2	(Byleveld et al., 2008)
Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad.	L3	(Granada & Muñoz, 2015)

Nota: Adaptado y simplificado a partir revisión bibliográfica de Alvarado y De La Cruz (2026) para evaluar la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciudadana para el sector Salache, provincia de Cotopaxi.

11.2 Resultados de la transformación de conceptos complejos a simples

Figura 4: Conceptos simples

Agua segura para la comunidad:					
P	Ec	S	T	Ecol	L
P1. Mala administración del agua.	Ec1. Falta inversión en sistemas de agua.	S1. Poco conocimiento sobre la contaminación.	T1. Faltan equipos para detectar contaminación.	El 1. Poco cuidado de las fuentes de agua.	L1. No siempre se cumplen las normas.
P2. Falta información sobre el agua.	Ec2. Mantener los sistemas es costoso.	S2. Escasa educación sobre el agua.	T2. Difícil detectar nuevos contaminantes.	El 2. Menor cantidad de agua disponible.	L2. Falta control constante del agua.
P3. Se desconoce la calidad real del agua.	Ec3. Recursos económicos insuficientes.	S3. Baja participación de la comunidad.	T3. Tratamiento de agua poco eficiente.	El 3. Riesgo por sequías e inundaciones.	L3. No está claro quién responde por los daños.
P4. Poco apoyo del Estado al agua segura.	Ec4. Poco valor al cuidado del agua.	S4. No todos tienen agua segura.	T4. Sensores pueden fallar.	El 4. Contaminación causada por personas.	
	Ec5. Equipos de control muy costosos.			El 5. Contaminación natural.	

El proceso participativo permitió adaptar e identificar los principales conceptos relacionados con la disponibilidad de agua segura, organizándolos en las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal (PESTEL). Esta clasificación facilitó la comprensión de los factores analizados por parte de la comunidad y permitió fortalecer su participación en la construcción del modelo conceptual del sistema hídrico.

11.3 Conceptos de las comunidades

A través de un taller participativo realizado con miembros del sector se identificaron conceptos mediante la elaboración manual de un mapa cognitivo difuso, con el uso de materiales didácticos como papelotes, imágenes y semáforo visual con emojis de colores que nos ayudaron a evidenciar las experiencias vividas por los habitantes en relación con la gestión y disponibilidad de agua segura. Este proceso permitió capturar la realidad local de quienes experimentan las

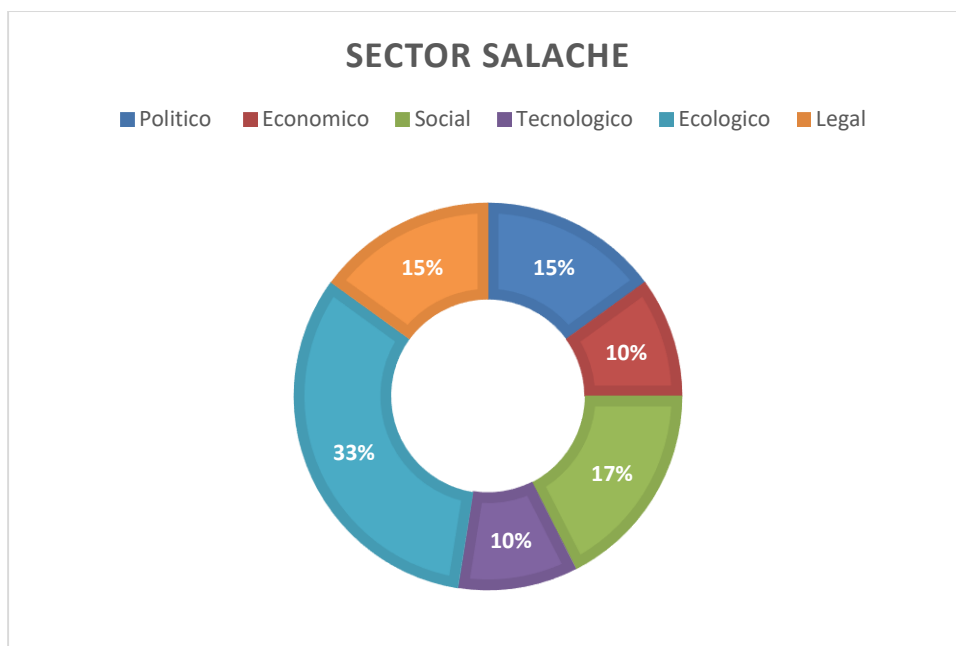
consecuencias de la crisis del agua en su territorio.

11.4 Identificación de los principales conceptos PESTEL que afectan la disponibilidad de agua segura en el sector Salache

Mediante la elaboración de talleres y explicación de la definición de los conceptos PESTEL hacia las comunidades del sector Salache, previamente ya identificados mediante revisión bibliográfica, con el propósito de facilitar la comprensión y permitir que los participantes relacionen estos factores con las condiciones actuales de su territorio. A partir del conocimiento local y experiencias de las comunidades, los conceptos fueron analizados, adaptados y contextualización, permitiendo identificar aquellos factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la disponibilidad de agua segura en su comunidad.

Los conceptos fueron clasificados según las dimensiones del análisis PESTEL y codificados con la letra (C) para identificar su procedencia comunitaria (ver Tabla 4). La comunidad aportó 20 conceptos adicionales, alcanzando un total 40 conceptos relacionados con los conceptos políticos 15.00 % (6 conceptos), económico 10.00% (4 conceptos), social 17.50% (7 conceptos), tecnológico 10.00 % (4 conceptos), ecológico 32.58% (13 conceptos) y legal 15.00% (6 conceptos) (ver Figura 5).

Figura 5: Gráfico de pastel sobre el porcentaje de conceptos PESTEL



11.5 Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL del sector Salache.

Dentro del proceso de diseño del sistema participativo de monitoreo de la calidad de agua en las comunidades del sector Salache, se utilizaron los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) como herramienta para analizar relaciones entre factores identificados mediante el enfoque PESTEL y apoyar la toma de decisiones. Los resultados obtenidos permitieron reconocer variables clave, interacciones y posibles efectos relacionados con la implementación del sistema de monitoreo, constituyendo una base para definir su estructura y funcionamiento. De esta manera, el análisis del FCM facilitó la adaptación del sistema a las condiciones sociales, ambientales, tecnológicas y organizadas de las comunidades, permitiendo plantear una propuesta basada en tecnologías de código abierto y participación ciudadana para fortalecer la gestión del recurso hídrico.

11.5.1 Teoría de grafos

En esta etapa se aplicaron principios de la teoría de grafos con el fin de analizar la estructura

del sistema y las relaciones de influencia entre los 41 conceptos PESTEL que influyen en la calidad del agua.

Partiendo de este análisis se calcularon los índices de centralidad, incluidos los índices de grado de entrada y de salida, los que permiten identificar los conceptos con mayor influencia dentro del sistema. Estos resultados proporcionan una base para la priorizar las variables estratégicas, lo que permite estructurar el diseño de un sistema de monitoreo que aborde los requerimientos específicos de la comunidad.

Tabla 4. Conceptos identificados

POLITICO				
Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo
P1. Acceso a información hídrica	23,87	21,50	44,66	Ordinario
P2. Información veraz de la calidad	27,21	24,87	52,08	Ordinario
P3. Priorización estatal del abastecimiento seguro	30,17	25,54	55,71	Ordinario
PC1. Gestión deficiente del manejo comunitario del agua para consumo humano	31,20	29,59	60,79	Ordinario

PC2. Limitada capacidad comunitaria para la gestión de agua	24,15	21,15	45,30	Ordinario
PC3. Débil articulación institucional para abastecimiento de agua	27,18	27,88	55,06	Ordinario
ECONOMICO				
Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	28,86	26,22	55,08	Ordinario
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento	23,54	14,19	37,73	Ordinario
Ec3. Valoración económica de los servicios ambientales	25,47	23,19	48,66	Ordinario
EcC1. Inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua	31,19	27,93	59,12	Ordinario
SOCIAL				
S1. Percepción del riesgo por contaminación del agua	27,19	18,55	45,74	Ordinario

S2. Alfabetización hídrica	23,82	25,18	49,00	Ordinario
S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	27,16	26,21	53,37	Ordinario
S4. Acceso equitativo al agua segura	29,52	19,85	49,37	Ordinario
S5. Disponibilidad de agua segura	19,48	33,57	53,05	Ordinario
SC1. Desperdicio comunitario de agua	23,82	19,84	43,66	Ordinario
SC2. Acceso inequitativo al agua	29,56	19,50	49,06	Ordinario
SC3. Interrupciones en el servicio de agua	28,87	24,24	53,11	Ordinario
TECNOLOGICO				
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	25,19	24,49	49,68	Ordinario
T2. Confiabilidad de los sensores	25,86	24,82	50,68	Ordinario
TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos	21,83	14,87	36,70	Ordinario

TC2. Monitoreo permanente insuficiente	30,19	30,54	60,73	Ordinario
---	-------	-------	-------	-----------

ECOLÓGICO

EI1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	25,46	21,84	47,30	Ordinario
EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	20,84	21,54	42,38	Ordinario
EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	14,55	27,81	42,36	Ordinario
EI4. Presencia de contaminantes antropogénicos	23,85	28,21	52,06	Ordinario
EI5. Presencia de contaminantes naturales	11,57	19,18	30,75	Ordinario
EIC1. Afectación a la biodiversidad	24,83	17,18	42,01	Ordinario
EIC2. Periodos prolongados de sequía	6,63	25,51	32,14	Ordinario
EIC3. Mayor demanda de agua por crecimiento poblacional	6,64	23,84	30,78	Ordinario

EIC4. Agua dura por alta concentración de minerales	6,94	10,25	17,19	Ordinario
EIC5. Riesgo percibido por metales pesados en el agua	21,87	21,86	43,73	Ordinarios
EIC6. Impacto de ganadería	17,45	25,48	42,93	Ordinario
EIC7. Déficit de reforestación en zona hídricas	18,18	22,76	40,94	Ordinario
EIC8. Incremento de la demanda hídrica por expansión de la población estudiantil	16,22	22,51	38,73	Ordinario
LEGAL				
L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua	31,19	28,88	60,07	Ordinario
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	30,87	29,19	60,07	Ordinario
L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	27,50	25,83	53,33	Ordinario
LC1. Cumplimiento de la normativa del Municipio y Prefectura	29,86	26,82	56,68	Ordinario

LC2. Responsabilidad	29,19	28,85	58,04	Ordinario
Institucional ante afectaciones				
del agua en la salud pública				

ESTRATEGIAS

Implementación de un sistema	0,00	25,87	25,87	Impulsor de la
de monitoreo de calidad de agua				política
Ampliación de la capacidad de	0,00	19,88	19,88	Impulsor de la
almacenamiento de agua potable				política
para garantizar el abastecimiento				
ante el incremento de la				
demandas población				

Nota: Se resaltan en negrita el concepto con mayor centralidad, así como los mayores valores de grado de entrada y grado de salida.

Los resultados del análisis estructural revelan que el concepto PC1, que se refiere a la gestión deficiente del manejo comunitario del agua para consumo humano, tiene la mayor centralidad del sistema (CI = 60,79). Esto lo posiciona como el nodo principal que influye de manera decisiva en el comportamiento de las demás variables. Este hallazgo subraya que una mala gestión del recurso hídrico juega un papel crucial, condicionando cómo se comportan otros elementos del sistema. Según Borgatti et al. (2022), los nodos con alta centralidad tienen una mayor capacidad de influencia, ya que su ubicación en la red les permite impactar significativamente en la dinámica general del sistema. Es importante señalar que PC1 no solo tiene la mayor centralidad, sino que también presenta el mayor grado de entrada (id = 31,20) y un alto grado de salida (od = 29,59). Este comportamiento dual, con valores elevados tanto de entrada como de salida, lo convierte en un nodo muy activo y receptivo. Se establece, así como un elemento

clave que, aunque es influenciado por otras variables, también tiene la capacidad de proyectar sus efectos hacia el resto de la red. Este resultado confirma que las deficiencias en la gestión de la calidad del agua generan efectos directos y retroalimentaciones en múltiples componentes del sistema. Según Bendahman y Lotfi (2024), los nodos con un alto grado de salida ocupan posiciones estratégicas en redes dirigidas, ya que concentran la capacidad de propagar influencias y generar cambios en la estructura y el comportamiento del sistema. En este sentido, el elevado grado de salida de PC1 refuerza su importancia como un concepto clave en la configuración del sistema.

Por otro lado, el concepto TC2, que se refiere al monitoreo permanente insuficiente, también muestra una alta centralidad ($CI = 60,73$), muy cercana a la de PC1. Esto pone de manifiesto que la falta de un monitoreo continuo es un factor crítico que impacta en varias dimensiones del sistema. Este concepto también tiene el mayor grado de salida del sistema ($od = 30,54$) y un alto grado de entrada ($id = 30,19$), lo que sugiere que no solo recibe influencias de otros factores, sino que también tiene un impacto significativo en el resto del sistema. Esto refuerza la idea de que la falta de monitoreo permanente es tanto una consecuencia de la debilidad institucional como una causa que perpetúa la mala gestión, la contaminación y la escasez de información confiable.

En cuanto a los conceptos legales L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua y L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua, ambos presentan una centralidad de $60,07$, lo que resalta la relevancia del marco legal en la gestión del agua. Cada uno de estos conceptos muestra altos grados de entrada ($id = 31,19$ e $id = 30,87$, respectivamente) y grados de salida también elevados ($od = 28,88$ y $od = 29,19$). Esto indica que el cumplimiento normativo es un factor estructural que influye en el comportamiento de todo el sistema, al mismo tiempo que se ve afectado por otros elementos como la capacidad institucional y la priorización

política.

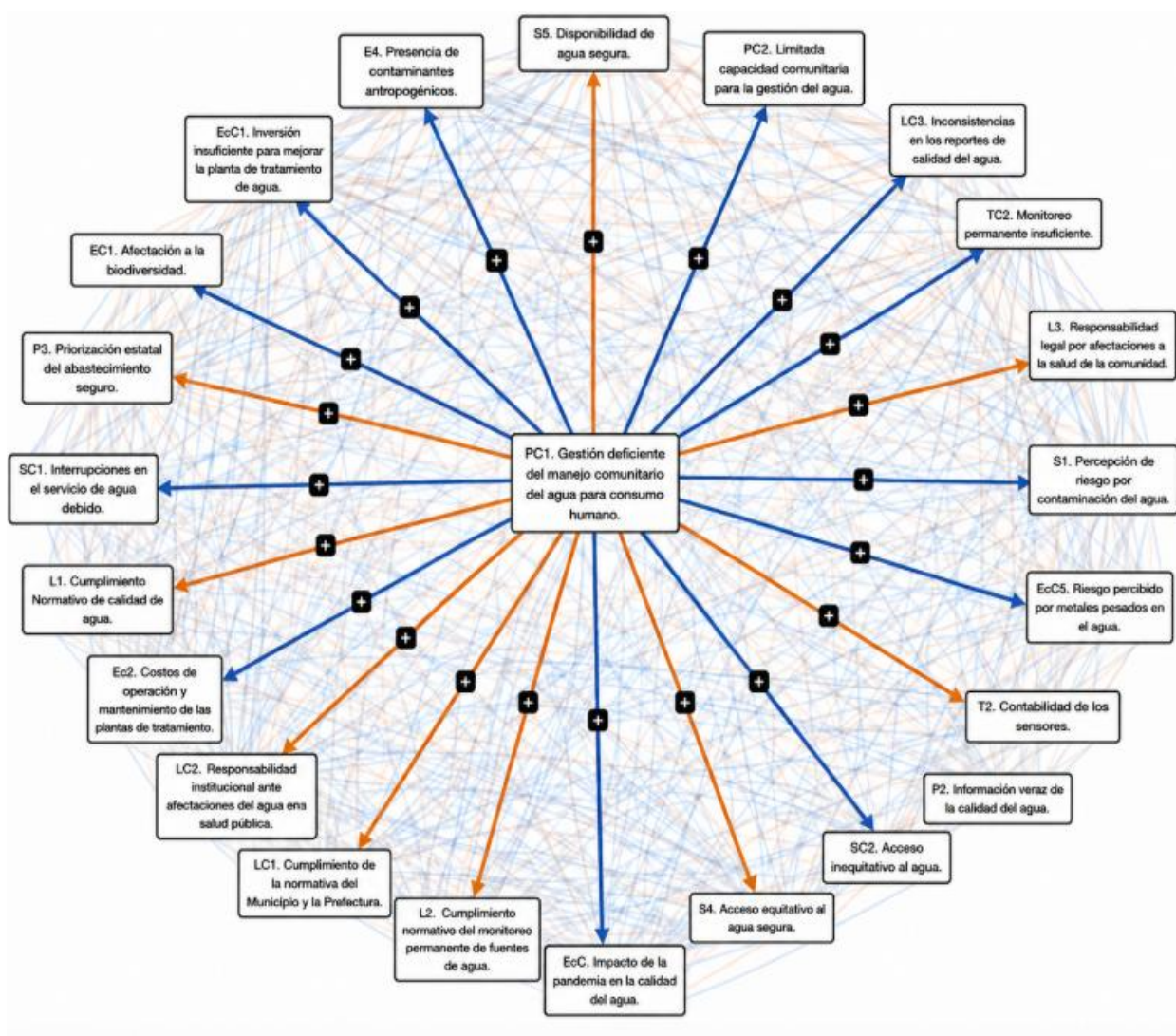
En cuanto a los conceptos legales, L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua y L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua, ambos tienen una centralidad de 60,07, lo que resalta lo crucial que es el marco legal en la gestión del agua. Estos conceptos muestran altos grados de entrada ($id = 31,19$ e $id = 30,87$, respectivamente) y también grados de salida significativos ($od = 28,88$ y $od = 29,19$). Esto sugiere que el cumplimiento normativo es un elemento fundamental que influye en el comportamiento de todo el sistema, al mismo tiempo que se ve afectado por otros factores como la capacidad institucional y la priorización política. Por otro lado, el concepto S5. Disponibilidad de agua segura destaca con el mayor grado de salida del sistema ($od = 33,57$). Esto significa que la disponibilidad de agua segura no solo es un resultado del sistema, sino que también tiene un impacto activo en otros factores. Cuando hay acceso a agua segura, se traduce en beneficios para la salud de la comunidad, mejora la productividad agrícola, reduce los conflictos por el agua y genera confianza en las instituciones. En otras palabras, la disponibilidad de agua segura actúa tanto como un efecto como una causa que promueve el bienestar general del sistema. Este hallazgo refuerza la idea de que la variable dependiente del estudio no es solo el objetivo final, sino también un motor que impulsa mejoras en otros aspectos del sistema.

El concepto EcC1. La inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua muestra una alta centralidad ($CI = 59,12$) y un notable grado de entrada ($id = 31,19$), lo que indica una fuerte dependencia de otros conceptos. Su comportamiento está influenciado principalmente por las interacciones dentro del sistema, especialmente por factores económicos, políticos y de gestión. Este patrón se alinea con lo que dice la teoría de grados, que sostiene que las variables con un alto grado de entrada acumulan impactos de otras partes del sistema, ayudando a identificar

componentes que son particularmente sensibles y dependientes (Bendahman y Lotfi, 2024). Por otro lado, se identificaron dos conceptos que el modelo clasifica como impulsores de política, ambos con un grado de entrada de cero: la "Implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua" ($od = 25,87$) y la "Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable" ($od = 19,88$). Estos factores son bastante independientes de otras variables y tienen un impacto directo en el resto del sistema, lo que confirma que las estrategias propuestas son herramientas que pueden activarse de forma autónoma para provocar cambios en la dinámica del sistema. Este hallazgo respalda la viabilidad de las estrategias planteadas en la investigación y apoya la hipótesis alternativa.

Finalmente, no se encontraron conceptos clasificados como tipo receptor con un grado de salida igual a cero. Esto significa que todos los conceptos que se analizaron tienen algún nivel de influencia sobre el resto del sistema. Este hallazgo resalta la alta interconexión y complejidad del sistema de gestión del agua en el sector Salache, donde las interacciones entre las variables son clave para entender su comportamiento y dinámica general. Según Özesmi y Özesmi (2004), la densidad es una medida del nivel de conectividad en el mapa cognitivo, lo que ayuda a identificar sistemas con diferentes grados de interacción entre sus componentes y proporciona información valiosa para identificar variables estratégicas y apoyar la toma de decisiones en el sistema analizado.

Figura 6: Mapa cognitivo difuso del sistema según el grado de salida



La Tabla 5 presenta los indicadores estructurales del sistema permite caracterizar la configuración y complejidad del Mapa Cognitivo Difuso. El número de conceptos ($N= 41$) representa la dimensión del sistema analizado, mientras que el número de conexiones ($C= 1467$) refleja el nivel de interacción existentes entre variables. Por su parte, la densidad ($D= 0,87$) nos permite evaluar el grado de interrelación global del sistema, mostrando la proporción de conexiones que existen en comparación con el número máximo posible de relaciones entre los conceptos. Estos indicadores facilitan la interpretación del sistema como una estructura compleja, en el cual las interacciones entre variables condicionan su comportamiento y dinámica general. De

acuerdo con Özesmi y Özesmi (2004), la densidad constituye una medida del nivel de conductividad del mapa cognitivo, permitiendo identificar sistemas con diferentes grados de interacción entre sus componentes y proporcionando información relevante para la identificación de variables estratégicas y el apoyo a la toma de decisiones dentro del sistema analizado

Tabla 5. *Análisis del mapa cognitivo social a partir de la teoría de grafos*

Indicador	Sector Salache
Número de conceptos (N)	41
Número de conexiones (C)	1467
Número de conceptos receptores	0
Número de conceptos ordinarios	41
Número de conceptos impulsores (drivers)	2
Densidad (D)	0.87
Promedio de conexiones por concepto	1640

11.5.2 Análisis del mapa cognitivo difuso

El cálculo del índice de jerarquía propuesto por Özesmi y Özesmi (2024) mostro que el mapa cognitivo presenta una estructura modernamente jerárquica, caracterizada por una diferencia notable entre la centralidad del concepto dominante y el promedio del sistema. Esta configuración posiciona a PC1. Gestión deficiente del manejo comunitariomdel agua para consumo humano como el nodo central que coordina que conecta las distintas dimensiones del sistema (ver Figura 7).

La naturaleza jerárquica de mapa sugiere que las intervenciones dirigidas a este concepto

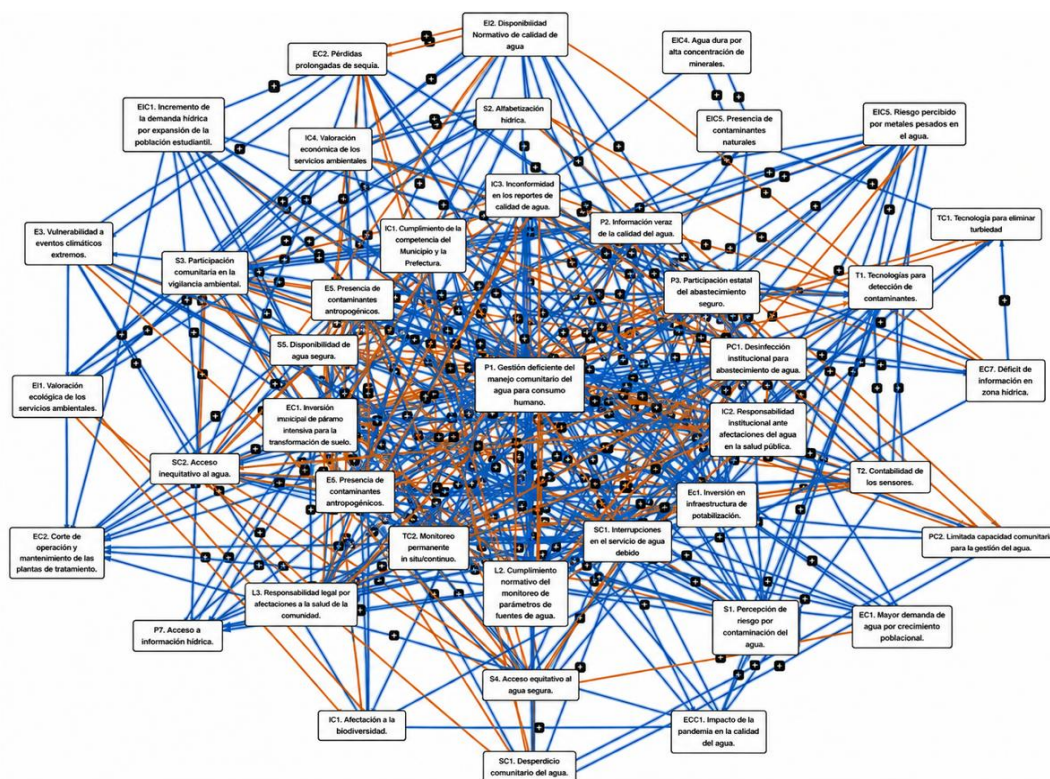
podrían generar efectos en cascada significativos en todo el sistema. Al mismo tiempo, esta estructura revela una vulnerabilidad estructural, ya que un debilitamiento en la gestión integral podría desarticular simultáneamente múltiples componentes. Según Obiedat, Mohammad y Samarasinghe, Sandhya 2011, los nodos con alta centralidad constituyen puntos focales prioritarios para los tomadores de decisiones, debido a su capacidad de incidir de forma relevante en la dinámica global del sistema. En esta misma línea, estudios sobre sistemas de gestión del agua han demostrado que la estructura de la red influye en la toma de decisiones compartida, permitiendo identificar nodos clave para las intervenciones de alto impacto (Castro, Carney, y de Brito 2023).

La gestión deficiente del manejo comunitario de agua para consumo humano se consolida como el concepto mayor centralidad, actuando como núcleo articulador del sistema socio ecológico del sector Salache. Esta posición dominante implica que no solo ejerce influencia sobre múltiples factores, sino que también recibe retroalimentación de diversos elementos, funcionando como un canal bidireccional clave dentro de la red Borgatti y Everett (2006) indican que los nodos de alta centralidad concentran una mayor capacidad de influencia en la dinámica general del sistema. Asimismo, investigaciones realizadas en comunidades ecuatorianas han evidenciado que los conceptos con mayor centralidad en los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) suelen estar asociados los problemas estructurales de gobernanza y gestión (Fonseca et al., 2022).

Desde el punto de vista de la implementación, la elevada centralidad de este concepto subraya que la sostenibilidad del sistema de monitoreo depende de su integración efectiva en las estructuras de gobernanza local, particularmente en las Juntas de Administradoras de Agua, y de su incorporación en los instrumentos de planificación territorial. Esta situación también pone de manifiesto la limitada autonomía de las comunidades locales en la gestión del recurso Rippey et al. (2024). resaltan que los FCM permiten caracterizar la percepción de los actores sobre el sistema

socioecológico, identificando barreras y oportunidades para la gestión colectiva, y facilitando el diseño de estrategias que incorporen el conocimiento y las percepciones locales de los involucrados.

Figura 7: Mapa cognitivo difuso



11.6 Inferencia Difusa

11.6.1 Análisis de escenarios: escenario de peor caso (worst-case scenario).

En esta sección se analiza el escenario del peor caso, obteniendo a partir de la matriz generada de FCMapper. Este escenario nos muestra qué pasaría si empeora la PC1. Gestión deficiente de la calidad de agua para consumo humano, considerando como el nodo motor más importante del sistema, es decir el que tiene más centralidad de influir sobre los demás. A partir de esta condición, se evaluaron los cambios producidos en los demás conceptos del sistema, observándose tanto incrementos como disminuciones en su comportamiento, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 6.

Resultados consistentes han sido reportado por Jetter y Kok (2014) Quienes observaron que la activación de variables impulsó en los mapas cognitivos difusos genera respuestas sistemáticas amplificadas, particularmente en contextos de gestión de recursos naturales. De manera similar Karatzinis y Boutalis (2025). Documentaron que los escenarios extremos vinculados a fallas de gestión provocan incrementos y disminuciones simultáneos en múltiples variables, reflejando estados críticos del sistema.

Tabla 6. Escenario del peor caso

% de conceptos cambiados		
Escenario 2	95,24 %	
	Fuerza	Fuerza
Cambios Positivos	(positiva)	Cambios negativos (Negativa)
PC2. Limitada Capacidad comunitaria para la gestión del agua	3	-4
		P1. Acceso a información hídrica
PC3. Débil articulación institucional para mejorar la planta de tratamiento de agua	4	-4
		P2. Información veraz de la calidad de agua
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua	3	-4
		P3. Priorización estatal del abastecimiento seguro

EcC1. Inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua	4	Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	-4
S1. Percepción de riesgo por contaminación del agua	1	Ec3. Valoración económica de los servicios ambientales	-4
SC1.Desperdicio comunitario de agua	4	S2. Alfabetización hídrica	-4
SC2. Acceso inequitativo al agua	4	S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	-4
SC3. Interrupciones en el servicio de agua	4	S4. Acceso equitativo al agua segura	-4
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	4	S5. Disponibilidad de agua segura	-2
TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos	4	T2. Confiabilidad de los sensores	-4
TC2. Monitoreo permanente en el servicio de agua	4	EI1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	-4
EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	2	EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	-4

EI4. Presencia de contaminantes antropogénicos		L1. Cumplimiento	-4
		normativo de la calidad de agua	
EI5. Presencia de contaminantes naturales	1	L2. Cumplimiento	-4
		normativo de monitoreo permanente de fuentes de agua	
EiC1. Afectación a la biodiversidad	3	L3. Responsabilidad legal	-1
		por afectaciones a la salud de la comunidad	
EiC2. Periodos prolongados de sequía	2	LC1. Cumplimiento de la	-4
		Normativa del Municipio y la Prefectura	
EiC3. Mayor demanda de agua por crecimiento poblacional	1	LC2. Responsabilidad	-4
		institucional ante afectaciones del agua en la salud publica	
EiC5. Riesgo percibido por metales pesados en el agua	1		
EiC6. Impacto de la ganadería en la calidad del agua	2		

EiC7. Déficit reforestación en zonas hídricas	2
EiC8. Incremento de la demanda hídrica por expansión de la población estudiantil	3
LC3. Inconsistencias en los reportes de la calidad de agua	4

Los resultados del escenario del peor caso muestran que el concepto. PC1. Gestión deficiente del manejo comunitario del agua para consumo humano genera el aumento de conceptos como PC3. Débil articulación institucional para abastecimiento de agua y también incrementa los costos vinculados al sistema, siendo estos EcC1. Inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua junto con impactos en la dimensión social que se evidencian en SC1. Desperdicio comunitario del agua, SC2. Acceso inequitativo al agua y SC3. Interrupciones en el servicio de agua. También están aumentando factores climáticos como EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos y ambientales como la presencia de contaminación antropogénicos EI4 y naturales EI5. Asimismo, se observaron cambios generando condiciones críticas como la afectación a la biodiversidad EiC1, periodos prolongados de sequía EiC2, mayor demanda de agua por crecimiento poblacional EiC3, riesgos percibidos por metales pesados EiC5, impacto de la ganadería EiC6, déficit de reforestación EiC7 de incremento de la demanda hídrica por expansión poblacional estudiantil EiC8.

Por lo contrario, se evidencian disminuciones en variables vinculadas a capacidades de gestión, soporte y sostenibilidad del sistema, en donde se ve afectado P2. Información veraz de la calidad de agua. De igual manera, se evidencian disminuciones en la inversión en procesos de potabilización Ec1, en la valoración económica de los servicios ambientales Ec3 y en el acceso equitativo al agua segura S4. A ellos se suma la reducción de factores sociales facilitadores como percepción de riesgo por contaminación del agua S1, la alfabetización hídrica S2 y participación comunitaria en la vigilancia ambiental S3, junto con una disminución en el desempeño de las tecnologías de monitoreo T1. Tecnologías para detención de contaminantes, T2. Confiabilidad de los sensores y TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos, así como en el cumplimiento de las regulaciones referidas a la calidad de agua L1. Cumplimiento normativo de la calidad de agua, L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua, L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad, LC1. Cumplimiento de la normativa del Municipio y la Prefectura y LC2. Responsabilidad institucional ante afectaciones del agua en la salud pública (ver Tabla 6)

Lo más preocupante es lo que disminuye. Conceptos fundamentales como el P1. Accesos a la información hídrica y la P2. información veraz de la calidad de agua caen con la máxima fuerza. Sin información confiable, la comunidad queda a ciegas, si poder saber si el agua que consume es segura. EC1. La Inversión en infraestructura de potabilización también disminuye drásticamente, lo que significa que, en un escenario de mala gestión, no solo no se invierte en mejorar el sistema, si no que se abandona. S2. La alfabetización hídrica y la S3. Participación comunitaria también desploman, lo que indica que la gente se desentiende y pierde la confianza en el sistema. Es un escenario donde la desesperanza y el abandono se apoderan de la gestión del agua.

11.6.2 Análisis del mejor escenario: Implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua participativo con la comunidad.

Este escenario es el corazón de nuestra propuesta. Evaluación de que pasaría si implementamos un sistema de monitoreo de calidad del agua, basado en ciencia abierta y ciudadana. En primera instancia, el prototipo para el sistema de monitoreo de la calidad de agua es un sistema tecnológico integrado diseñado para la monitorización automatizada de la calidad del agua mediante el uso de hardware el código abierto. Su estructura principal se basa en un microcontrolador ESP32, el cual procesa señales captadas por una red de sensores especialidades en la medición de parámetros fisicoquímicos como pH, la conductividad eléctrica, la turbidez, temperatura y el caudal que muestran los datos en tiempo real. Los datos recolectados son gestionados a través de un ecosistema digital que permite la visualización en tiempo real mediante una pantalla LCD física, una plataforma IoT (Blynk) y el almacenamiento seguro de la información tanto en la nube como en dispositivos físicos (tarjetas Micro SD) para su posterior análisis técnico.

Previo a la simulación del escenario, el prototipo fue presentado a los miembros de la comunidad durante los talleres, en la cual explicó el funcionamiento general del sistema, el principio de operación de los sensores y la utilidad de la información generada para la vigilancia de la calidad del agua. Este proceso permitió fortalecer la apropiación social de la tecnología y evidenció el interés de los participantes por incorporar herramientas de monitoreo dentro de las actividades de gestión comunitaria del agua.

Los resultados obtenidos mediante la inferencia difusa muestran que la implementación del sistema de monitoreo genera una influencia transformadora, afectando positivamente al 95.45% sobre una parte importante de las variables que integran el modelo socio ecológico construido por las comunidades. La disponibilidad continua de información técnica mejora la capacidad local para

identificar alteraciones en las fuentes de abastecimiento, reduciendo la incertidumbre asociada al estado del recurso y favoreciendo decisiones basadas en evidencia en la Tabla 7.

Entre las variables que más aumentan están en el P1. Acceso a la información hídrica y P2. La información veraz de la calidad de agua. Estos resultados indican que ayuda a que la comunidad ya no a oscuras y sabe exactamente que hay en su agua. Este conocimiento es poder. Empodera a la Junta de Agua para tomar decisiones informadas y a la comunidad para exigir derechos. En el ámbito social, el efecto es igualmente potente. S2. La Alfabetización hídrica y la S3. Participación comunitaria aumentan enormemente. La gente se involucra porque ahora tiene una herramienta tangible para cuidar su recurso. Ya no son sujetos pasivos que recibe agua; son vigilantes activos de su calidad. Esto a su vez, mejora el S4. Acceso equitativo al agua segura y S5. La Disponibilidad de Agua segura. El monitoreo permite detectar problemas a tiempo y actuar antes de que se convierta en crisis. Desde el punto de vista tecnológico, el uso de equipos de bajo costo y código abierto reduce las limitaciones económicas que suelen estar asociadas al monitoreo convencional. Además, hace más fácil la sostenibilidad operativa del sistema a largo plazo. Varios estudios recientes han mostrado que los sistemas basados en ESP32 ofrecen niveles adecuados de precisión y estabilidad para aplicaciones de monitoreo ambiental en tiempo real, creando una alternativa viable para comunidades rurales con acceso limitado a infraestructura especializada.

Es necesario destacar cómo este escenario logra resolver la paradoja de la gestión deficiente y fragmentada que solía dominar el servicio hídrico, así como describe (Martínez-Moscoso y Ortiz 2020). en su estudio donde menciona que: La experiencia muestra que existe una falsa creencia de que las comunidades son un todo integrado. No obstante, las mismas se caracterizan por presentar en su interior arraigadas jerarquías e inequidades, por lo que, si no se consideran estas realidades, los procesos de participación llegarían incluso a reforzar los patrones de inequidad. A pesar de que

este factor representaba un obstáculo mayor, su ubicación en el espectro negativo de los resultados confirma que el desorden administrativo es neutralizado por la rigurosidad que impone el flujo de datos en tiempo real. En resumen, este escenario nos dice que la implementación del sistema de monitoreo no es solo una cuestión técnica. Es una herramienta de transformación social. Democratiza en conocimiento, fortalece la gobernanza local y convierte a la comunidad en el eje de la gestión de agua.

Tabla 7. Escenario del mejor caso: Implementación de un sistema de monitoreo

% de conceptos cambiados			
Escenario 2 (D1)		95,45%	
Cambios positivos	Fuerza (pos)	Cambios Negativos	Fuerza (neg)
P1. Acceso a información hídrica	4	PC1. Gestión deficiente del manejo comunitario del agua para consumo humano	4
P2. Información veraz de la calidad de agua	4	PC2. Limitada capacidad comunitaria para la gestión del agua	3
P3. Priorización estatal del abastecimiento seguro	4	PC3. Débil articulación institucional para abastecimiento de agua	4

Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	4	EcC1. Inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua	4
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	3	S1. Percepción de riesgo por contaminación	2
Ec3. Valoración económica de los servicios ambientales	4	SC1. Desperdicio comunitario del agua	4
S2. Alfabetización hídrica	4	SC2. Acceso inequitativo al agua	4
S3. Participación comunitaria en vigilancia ambiental	4	SC3. Interrupciones en el servicio de agua	4
S4. Acceso equitativo al agua segura	4	TC2. Monitoreo permanente insuficiente	4
S5. Disponibilidad de agua segura	3	EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	3
T1. Tecnologías para detención de contaminantes	4	EI4. Presencia de contaminantes antropogénicos	4

T2. Confiabilidad de los sensores	4	EI5. Presencia de contaminantes naturales	1
TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos	4	EiC1. Afectación a la biodiversidad	4
EI1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	4	EiC2. Periodos prolongados de sequía	2
EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	4	EiC3. Mayor demanda de agua por crecimiento poblacional	1
L1. Cumplimiento Normativo de la calidad de agua	4	EiC4. Agua dura por alta concentración de minerales	1
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	4	EiC5. Riesgo percibido por metales pesados	1
LC1. Cumplimiento de la normativa del Municipio y la Prefectura	4	EiC6. Impacto de la ganadería en la calidad del agua	3
		EiC8. Incremento de la demanda hídrica por	2

expansión de la población estudiantil	
L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	1
LC2. Responsabilidad institucional ante afectaciones del agua en la salud pública	3
LC3. Inconsistencias en los reportes de la calidad del agua	4

11.6.3 Análisis del mejor escenario: Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable para garantizar el abastecimiento ante el incremento de la demanda de la población.

Este escenario nació de las voces de las comunidades durante los talleres participativos, los habitantes del sector Salache identificaron que uno de los problemas más grave es la falta de capacidad de almacenamiento de agua potable, especialmente ante el crecimiento de la población y el incremento estacional de la demanda. Por eso propusieron como estrategia prioritaria la Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable.

Simulamos este escenario para entender cómo esta estrategia, pensada desde la experiencia cotidiana de la comunidad, afectaría al sistema de gestión del agua en su conjunto. Los resultados (Tabla 8) muestran un impacto muy positivo afectando al 95,35% de las variables.

Tabla 8. Escenario del mejor: Ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua

potable para garantizar el abastecimiento ante el incremento de la demanda de la población

% de conceptos cambiados			
Escenario 3 (D1)		95.35%	
Cambios positivos	Fuerza (pos)	Cambios Negativos	Fuerza (neg)
P3. Priorización estatal del abastecimiento seguro	4	P1. Acceso a información hídrica	4
PC1. Gestión deficiente de manejo comunitario de agua para consumo humano	4	P2. Información veraz de la calidad del agua	4
Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	4	PC2. Limitada capacidad comunitaria para la gestión del agua	4
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento	3	PC3. Débil articulación institucional para abastecimiento del agua	4
Ec3. Valoración económica de los servicios ambientales	4	EcC1. Inversión insuficiente para mejorar la planta de tratamiento de agua	4

S2. Alfabetización hídrica	4	S1. Percepción de riesgo por contaminación del agua	2
S3. Participación comunitaria en vigilancia ambiental	4	SC1. Desperdicio comunitario del agua	4
S4. Acceso equitativo al agua segura	4	SC2. Acceso inequitativo al agua	4
S5. Disponibilidad de agua segura	3	SC3. Interrupciones en el servicio de agua debido	4
T2. Confiabilidad de los sensores	4	T1. Tecnologías para detección de contaminantes	4
EI1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	4	TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos	4
EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	4	TC2. Monitoreo permanente insuficiente	4
EI5. Presencia de contaminantes naturales	2	EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	3
EiC4. Agua dura por alta concentración de minerales	2	EI4. Presencia de contaminantes antropogénicos	4

EiC6. Impacto de la ganadería a la calidad del agua	4	EiC1. Afectación a la biodiversidad	4
EiC7. Déficit reforestación en zonas hídricas	4	EiC2. Periodos prolongados de sequía	2
L1. Cumplimiento Normativo de la calidad de agua	4	EiC3. Mayor demanda de agua por crecimiento poblacional	1
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	4	EiC5. Riesgos percibidos por metales pesados en el agua	1
LC1. Cumplimiento de la normativa del Municipio y la Prefectura	4	EiC8. Incremento de la demanda hídrica por expansión de la población estudiantil	2
		L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	1

LC2. Responsabilidad	4
institucional ante afectaciones	
del agua en la salud publica	
LC3. Inconsistencias en los	4
reportes de calidad del agua	

Los resultados de este escenario nos muestran que la ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable, propuesta por la comunidad, genera una transformación profunda en el sistema de gestión del agua. Se observa que la P3. Priorización estatal del abastecimiento seguro y la Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización aumentan con la máxima fuerza (4), lo que indica que la comunidad, al demostrar organización e inversión en su propio sistema, logra un mayor respaldo institucional y financiero por parte de las autoridades. Es decir, se genera un círculo virtuoso donde el compromiso comunitario atrae apoyo estatal, y este apoyo, a su vez fortalece la infraestructura hídrica local.

En la dimensión social. Los cambios son profundos. La S2. Alfabetización hídrica y la S3. participación comunitaria en vigilancia ambiental se incrementan con la máxima fuerza (4). Esto refleja que la estrategia de ampliación de almacenamiento no es solo una acción técnica, si no un proceso que involucra a la comunidad en la planificación, construcción y gestión de la infraestructura. Al participar activamente, los comuneros aprenden sobre su sistema hídrico, se organizan y fortalecen su capacidad de autogestión. El S4. Acceso equitativo al agua segura y la S5. Disponibilidad de agua segura también aumentan, lo que confirma que contar con mayor capacidad de almacenamiento reduce desigualdades en el acceso y garantiza que el agua llegue a todos los hogares, incluso en épocas de alta demanda.

En el ámbito ecológico, se evidencian mejoras significativas. La EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales aumenta, lo que indica que la ampliación del almacenamiento está vinculada a la protección de las fuentes de agua. El EiC6. Impacto de la ganadería y el EiC7. Déficit de reforestación disminuye (aparecen como cambios positivos porque se están reduciendo), lo que sugiere que la comunidad, al implementar esta estrategia, también se está tomando conciencia de la necesidad de proteger las zonas de recarga hídrica mediante el control del pastoreo y la reforestación. La EiC4. Agua dura por alta concentración de minerales también disminuye, lo que indica que un mejor almacenamiento podría estar asociado a una gestión más adecuada del recurso.

En dimensión legal, el L1, L2. Cumplimiento normativo y el LC1. Cumplimiento de la normativa del Municipio y la Prefectura aumentan, lo que evidencian que la estrategia de almacenamiento ayuda a la comunidad alinearse con las regulaciones vigentes y a demostrar su compromiso con la gestión sostenible del agua.

Sin embargo, el escenario también revela limitaciones importantes. El P1. acceso a información hídrica y la P2. Información veraz de la calidad del agua disminuye con la máxima fuerza (4). Esto indica que la ampliación de almacenamiento, por sí sola, no genera información sobre la calidad del agua, la comunidad puede tener más agua almacenada, pero no sabe si esa agua es segura para el consumo humano. Es decir, la estrategia resuelve el problema de la disponibilidad física del agua, pero no aborda el problema de su calidad sanitaria.

Asimismo, la PC2. Limitada capacidad comunitaria y la PC3. Débil articulación institucional disminuye, lo que sugiere que la estrategia, al ser liderada principalmente por la comunidad, puede no estar integrada adecuadamente con las instituciones gubernamentales, limitando su alcance y sostenibilidad a largo plazo. En el plano tecnológico, la disminución de T1.

Tecnologías para detección de contaminantes y TC1. Tecnologías para eliminar sedimentos confirma que la estrategia de almacenamiento no prioriza la implementación de tecnologías de monitoreo o tratamiento. El TC2. Monitoreo permanente insuficiente disminuye, lo que es preocupante porque indica que la ampliación del almacenamiento no viene acompañada de un sistema de vigilancia continua de la calidad del agua.

Los resultados de este escenario, propuesto por la comunidad demuestran que la ampliación de la capacidad de almacenamiento de agua potable es una estrategia fundamental y necesaria para garantizar el abastecimiento ante el incremento de la demanda poblacional. Esta estrategia fortalece la organización comunitaria, mejora el acceso equitativo al agua, reduce las interrupciones del servicio y fomenta la inversión en infraestructura. Sin embargo, también evidencian sus limitaciones: el almacenamiento no es monitoreo. Tener más agua no significa tener agua segura. La comunidad puede haber resuelto el problema de la escasez, pero sigue expuesta al riesgo de consumir agua contaminada. Por esta razón, la estrategia 2 (ampliación de almacenamiento) debe ser complementada con la estrategia 1 (sistema de monitoreo participativo). Juntas, estas dos estrategias garantizan que el agua no solo llegue a todos los hogares, sino que llegue en condiciones seguras para el consumo humano, en concordancia con lo establecido en la Norma Técnica NTE INEN 1108.2023 y con los principios de la gestión integral del recurso hídrico.

11.7 Manual metodológico para el diagnóstico comunitario

11.7.1 Diseño del manual metodológico

Como parte del cumplimiento del tercer objetivo específico de la investigación, se elaboró un manual metodológico para el diagnóstico comunitario y la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua, orientado a proporcionar a la comunidad del sector Salache una herramienta práctica.

El manual se diseñó a partir de los resultados obtenidos en las distintas etapas de la investigación, en particular en el diagnóstico comunitario, la identificación de factores PESTEL, la construcción y el análisis del Mapa Cognitivo Difuso y la evaluación de escenarios. Por lo tanto, el contenido del manual integra los conocimientos y resultados generados durante el proceso participativo, en lugar de constituir una propuesta independiente.

El propósito principal del manual es facilitar que la comunidad reconozca factores que influyen en la gestión y calidad del agua, organice la información obtenida a través del diagnóstico, comprenda las relaciones entre los distintos factores y utilice esta información como apoyo en la toma de decisiones.

11.7.2 Objetivo del manual

El objetivo del manual es guiar a la comunidad en la realización de un diagnóstico participativo sobre la gestión del agua y en la implementación de un sistema de monitoreo de su calidad, mediante procedimientos accesibles para aplicar el análisis PESTEL, interpretar la información obtenida y emplearla como apoyo en la toma de decisiones comunitarias.

Este objetivo está directamente relacionado con el tercer objetivo específico planteado en

la investigación.

11.7.3 Fundamentación para la elaboración del manual

La elaboración del manual surge de la necesidad de convertir los resultados técnicos de la investigación en una herramienta comprensible y útil para la comunidad.

Durante el desarrollo del estudio se identificaron diversos factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que inciden en la gestión del agua en el sector Salache. El análisis PESTEL permitió organizar estos factores y reconocer los aspectos que pueden favorecer o limitar la implementación de un sistema comunitario de monitoreo.

Posteriormente, mediante el Mapa Cognitivo Difuso se establecieron las relaciones de influencia entre los conceptos identificados, lo que permitió analizar la estructura del sistema hídrico local y evaluar posibles escenarios de intervención.

Por lo tanto, el manual integra estos resultados en una secuencia metodológica que permite pasar de la identificación del problema, a la generación de información, posteriormente a su interpretación y finalmente a la toma de decisiones.

11.7.4 Estructura metodológica del manual

El manual fue estructurado considerando cuatro componentes principales:

1. Diagnóstico comunitario

Esta etapa permite reconocer la situación actual del recurso hídrico desde el conocimiento y experiencia de los habitantes. Se identifican los principales problemas, actores, recursos, riesgos y condiciones que pueden afectar la calidad y disponibilidad del agua.

El diagnóstico constituye el punto de partida para comprender la problemática local antes de implementar acciones de monitoreo.

2. Aplicación del análisis PESTEL

El análisis PESTEL permite organizar los factores que influyen en la gestión del agua en seis dimensiones:

- **Política:** instituciones, autoridades, gestión y participación.
- **Económica:** recursos económicos, costos y capacidad de inversión.
- **Social:** participación, organización y percepción comunitaria.
- **Tecnológica:** disponibilidad y uso de tecnologías para el monitoreo.
- **Ecológica:** condiciones ambientales y posibles fuentes de contaminación.
- **Legal:** normativa, responsabilidades y cumplimiento de las disposiciones relativas al agua.

En el manual, cada dimensión se acompaña de preguntas orientadoras que permiten adaptar el análisis al contexto comunitario y facilitar la participación de los usuarios.

3. Implementación e interpretación del sistema de monitoreo

El manual establece una secuencia para organizar el proceso de monitoreo:

Observar → Registrar → Analizar → Interpretar → Decidir → Actuar.

La observación consiste en la identificación y medición de las condiciones del agua; el registro permite conservar los datos obtenidos; el análisis permite identificar cambios o situaciones que requieren atención; la interpretación relaciona los resultados con los valores de referencia correspondientes; y, finalmente, la información se utiliza para establecer acciones comunitarias.

De esta manera, el monitoreo no se limita a la obtención de datos, sino que busca convertirlos en información útil para la gestión del recurso hídrico.

4. Apoyo a la toma de decisiones comunitarias

La información generada mediante el diagnóstico, el análisis PESTEL y el monitoreo permite identificar problemas prioritarios y establecer posibles acciones de respuesta.

El manual propone que las decisiones se tomen de manera participativa, considerando la

información disponible, el conocimiento de la comunidad y las condiciones locales.

Este componente permite relacionar los resultados técnicos de la investigación con las necesidades reales de la comunidad, fortaleciendo la capacidad local para responder a problemas relacionados con la calidad y la disponibilidad del agua.

11.7.5 Procedimiento para el diagnóstico comunitario

El diagnóstico comunitario propuesto en el manual se desarrolla mediante actividades participativas que permiten recopilar información sobre la situación del recurso hídrico.

El procedimiento comprende las siguientes etapas:

Etapas 1. Reconocimiento del territorio.

Se identifican la fuente de abastecimiento, la infraestructura, el recorrido del agua, la población beneficiaria y las actividades desarrolladas en el área.

Etapas 2. Identificación de problemas.

Los participantes reconocen las principales dificultades relacionadas con la calidad, la disponibilidad y la gestión del agua.

Etapas 3. Priorización.

Los problemas identificados se organizan según su importancia y la percepción de su impacto en la comunidad.

Etapas 4. Identificación de causas y efectos.

Se establecen las relaciones entre los factores que originan los problemas y sus posibles consecuencias.

Etapas 5. Análisis del contexto mediante PESTEL.

Los problemas y factores identificados se organizan según las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal.

11.7.6 Procedimiento para aplicar el análisis PESTEL

Para facilitar la aplicación del análisis PESTEL en la comunidad, el manual propone transformar los conceptos técnicos en expresiones sencillas y en preguntas orientadoras.

El procedimiento consiste en:

1. Presentar a los participantes las seis dimensiones del análisis PESTEL.
2. Explicar cada dimensión mediante ejemplos relacionados con el agua.
3. Identificar los factores presentes en la comunidad.
4. Registrar los factores mencionados por los participantes.
5. Clasificarlos según la dimensión PESTEL correspondiente.
6. Analizar su influencia en la gestión y la calidad del agua.
7. Priorizar los factores considerados más relevantes.
8. Registrar los resultados obtenidos.

Este procedimiento permite aplicar el análisis PESTEL desde la percepción y la experiencia de los habitantes, evitando que la metodología se limite a una evaluación exclusivamente técnica.

11.7.7 Procedimiento para la implementación del sistema de monitoreo

La implementación del sistema de monitoreo se plantea como un proceso participativo en el que la comunidad interviene en la generación y uso de la información.

El procedimiento comprende:

Planificación: definir qué se monitoreará, dónde, cuándo y quién será responsable.

Muestreo y medición: realizar la toma de muestras y mediciones utilizando los instrumentos y procedimientos establecidos.

Registro: almacenar de forma organizada los resultados obtenidos.

Análisis: revisar los datos para identificar cambios o posibles alteraciones.

Interpretación: comparar los resultados con los valores de referencia establecidos para determinar su significado.

Comunicación: compartir los resultados con los responsables de la gestión del agua y con la comunidad.

Acción: establecer medidas de respuesta ante la identificación de problemas.

La propuesta de monitoreo participativo se relaciona con el diseño de la investigación, que se basa en tecnologías de código abierto y en la participación comunitaria.

11.7.8 Interpretación de la información obtenida

Uno de los componentes fundamentales del manual es la interpretación de los resultados del monitoreo.

Para ello, se establece una secuencia de análisis:

Dato obtenido → comparación → identificación del problema → análisis de causas → decisión → acción.

Los datos deben revisarse periódicamente para identificar tendencias, cambios o resultados que requieran atención.

Cuando un resultado presente una condición que pueda representar un riesgo, debe analizarse en conjunto con otros factores identificados durante el diagnóstico y el análisis PESTEL.

Esta integración permite evitar interpretaciones aisladas y considerar que la calidad del agua está relacionada con diversas condiciones ambientales, sociales, económicas, tecnológicas, políticas y legales.

11.7.9 Utilización de la información para la toma de decisiones

La información generada por el sistema de monitoreo debe utilizarse como herramienta de apoyo para la toma de decisiones comunitarias.

El manual propone que, ante un problema identificado, la comunidad siga el siguiente procedimiento:

1. **Identificar:** reconocer el problema a partir de los datos obtenidos.
2. **Analizar:** determinar posibles causas y factores relacionados.
3. **Priorizar:** establecer el nivel de atención requerido.
4. **Decidir:** seleccionar la alternativa de respuesta más adecuada.
5. **Actuar:** implementar la acción acordada.
6. **Evaluar:** verificar posteriormente si la medida aplicada produjo una mejora.

Este procedimiento permite convertir la información generada por el monitoreo en acciones concretas de gestión.

11.7.10 Adaptación del manual al contexto del sector Salache

El manual fue adaptado a las condiciones identificadas en el sector Salache mediante el proceso participativo desarrollado durante la investigación.

Los factores identificados mediante el análisis PESTEL permitieron reconocer que la problemática del agua no depende únicamente de aspectos relacionados con su calidad física, química o microbiológica, sino también de la organización comunitaria, la disponibilidad de recursos, la tecnología, las condiciones ambientales, la gestión institucional y el cumplimiento de la normativa.

El análisis mediante el Mapa Cognitivo Difuso permitió representar las relaciones entre los distintos factores y evaluar escenarios de intervención. Los resultados evidenciaron la importancia de fortalecer el monitoreo y la disponibilidad de información para apoyar la gestión comunitaria

del agua.

Por esta razón, el manual integra el diagnóstico, el análisis del contexto, el monitoreo y la toma de decisiones como partes de un mismo proceso metodológico.

11.7.11 Resultado de la elaboración del manual

Como resultado del tercer objetivo específico, se elaboró un **manual metodológico para el diagnóstico comunitario y la implementación del sistema de monitoreo de la calidad del agua**, diseñado como herramienta de apoyo para la comunidad.

El manual permite:

- Orientar el diagnóstico participativo.
- Identificar problemas relacionados con el agua.
- Aplicar el análisis PESTEL.
- Organizar y analizar la información comunitaria.
- Orientar el proceso de monitoreo.
- Interpretar los resultados obtenidos.
- Relacionar los resultados con los factores que inciden en la gestión del agua.
- Apoyar la toma de decisiones comunitarias.

En consecuencia, el manual constituye el producto final del tercer objetivo específico y representa la transformación de los resultados obtenidos durante la investigación en una herramienta práctica para su aplicación en el contexto comunitario.

11.8 Guía para la ejecución del taller

Se elaboraron los siguientes pasos para el desarrollo del taller participativo, donde se explicaron los conceptos simples que representan a cada uno de los conceptos PESTEL obtenidos

con anterioridad mediante la revisión bibliográfica. Esta adaptación permitió explicar de manera clara y sencilla a los participantes cada uno de los conceptos, de forma que pudieran establecer las conexiones causales positivas o negativas según su percepción y experiencia. Para facilitar la comprensión y participación de la comunidad, el equipo investigador adaptó la escala tradicional de ponderación mediante un sistema visual tipo semáforo elaborado con fomix y emojis, donde el color rojo (emoji llorando) representó un impacto leve (magnitud 1), el naranja (emoji triste) un impacto moderado (magnitud 2) y el verde (emoji feliz) un impacto fuerte (magnitud 3). Durante la dinámica, los participantes discutieron y consensuaron el nivel de impacto ejercido por cada variable sobre las demás, mientras que el equipo investigador registró las relaciones identificadas y representó gráficamente las conexiones. La evaluación de fuerza se determinó mediante consenso grupal, priorizando la agilidad del proceso participativo.

11.9 Respuesta a la pregunta de investigación

¿Cómo influye un sistema de monitoreo de agua de consumo humano, basado en ciencia abierta y ciudadana, sobre los factores PESTEL que determinan el acceso al agua segura en el sector Salache?

La implementación de un sistema comunitario de monitoreo de agua basado en código abierto tiene un impacto profundo y multifacético que aborda las barreras históricas al acceso al agua potable en el sector Salache. Desde el punto de vista económico y tecnológico, el uso de hardware libre y asequible, como el microcontrolador ESP32, transforma la forma en que se asignan los recursos. Esto convierte lo que antes era una limitación financiera en una oportunidad para la sostenibilidad y la autonomía de la comunidad. Esta democratización de la tecnología permite que la gestión del agua se realice de manera independiente, lo que reduce los costos operativos a largo plazo y elimina la necesidad de depender de financiamientos externos y

evaluaciones costosas.

el ámbito político y social, el acceso libre a datos sobre el agua fortalece la gobernanza local, ya que otorga a la Junta Administradora de Agua la legitimidad técnica necesaria para tomar decisiones fundamentadas. La disponibilidad de información sobre la calidad del agua se incrementa notablemente, lo que permite a los miembros de la comunidad actuar de manera informada en la protección de sus fuentes de agua. Además, la alfabetización hídrica y la participación comunitaria en la vigilancia ambiental también experimentan un aumento significativo, empoderando a los habitantes para que se conviertan en gestores activos de su recurso, en lugar de ser meros receptores del servicio.

En los ámbitos ecológicos y legales, el sistema establece una capacidad de vigilancia continua que facilita la detección en tiempo real de contaminantes, como la presencia de contaminantes antropogénicos, metales pesados o impactos por actividades de ganadería, asegurando el cumplimiento de las normativas de salud pública y los estándares de calidad establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108:2023. La valoración ecológica de los servicios ambientales y la disponibilidad hídrica en fuentes naturales se incrementan con la máxima fuerza (4), reflejando una mayor conciencia y protección de los ecosistemas que proveen el agua.

Finalmente, el sistema de monitoreo aborda directamente el factor más crítico del sistema: la "Gestión deficiente de la calidad del agua para consumo humano" (PC1), identificado como el nodo de mayor centralidad ($CI = 60,79$), reduciendo su impacto negativo sobre el resto de las variables. La simulación del escenario óptimo demostró que esta estrategia genera una influencia transformadora positiva en el 95,45% de las variables del modelo socio-ecológico, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones y fortaleciendo la gobernanza comunitaria mediante la

generación de datos en tiempo real, lo que garantiza la sostenibilidad técnica y social del proyecto.

11.10 Comprobación de hipótesis

La validación de las hipótesis de investigación, respaldada por el modelado dinámico a través de Mapas Cognitivos Difusos (FCM) y procesos de inferencia difusa, permite aceptar la hipótesis alternativa (H_a). Esto se debe a que se ha confirmado que la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua es muy viable en el sector Salache. El análisis de centralidad ha revelado que la variable "PC1. Gestión deficiente de la calidad del agua para consumo humano" tiene el mayor peso sistémico, con un índice de 60,79, actuando como el nodo crítico que el sistema propuesto logra mitigar. Esto se logra al integrar el conocimiento local de 16 conceptos empíricos con 25 parámetros técnicos bibliográficos, lo que resulta en un total de 41 conceptos validados directamente con la comunidad. Además, el análisis estructural ha mostrado que el concepto TC2. Monitoreo permanente insuficiente ($CI = 60,73$) y los conceptos legales L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua y L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua ($CI = 60,07$ cada uno) ocupan posiciones clave dentro del sistema. Esto confirma que la falta de monitoreo continuo y el debilitamiento del marco legal perpetúan la gestión deficiente y la contaminación del recurso hídrico. La alta densidad del mapa ($D = 0,87$), con 1467 conexiones entre los 41 conceptos, evidencia la profunda interconexión del sistema, donde las interacciones entre variables condicionan su comportamiento y dinámica general.

Los resultados de los escenarios hipotéticos muestran que el uso de tecnologías de ciencia abierta y de bajo costo tiene un impacto transformador muy positivo en el 95,45% de las variables del sistema socio-ecológico. Esto ayuda a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones y a fortalecer la gobernanza comunitaria al generar datos en tiempo real. Por otro lado, la simulación del peor escenario reveló que, sin políticas correctivas, el 95,24% de las variables se ven afectadas

negativamente, con caídas drásticas en el acceso a información sobre el agua, la inversión en infraestructura y el cumplimiento de normativas. En cuanto a la estrategia de aumentar la capacidad de almacenamiento, que fue propuesta por la comunidad, se observó un impacto positivo del 95,35%. Esto ha fortalecido la organización comunitaria, mejorado el acceso equitativo al agua y reducido las interrupciones en el servicio. Sin embargo, esta estrategia también mostró limitaciones importantes: la disminución en los conceptos de P1. Acceso a información hídrica y P2. Información veraz sobre la calidad del agua, con una fuerza máxima de (-4), confirmó que simplemente aumentar el almacenamiento no garantiza información sobre la calidad del agua. Aunque la comunidad puede tener más agua almacenada, sigue corriendo el riesgo de consumir agua contaminada, lo que resalta la necesidad de combinar ambas estrategias.

Por lo tanto, se decide rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_a), lo que confirma que poner en marcha un sistema de monitoreo de agua para el consumo humano, basado en la ciencia abierta y la participación ciudadana, es una opción viable para mejorar la gestión comunitaria del recurso hídrico en el sector Salache. La evidencia recopilada asegura la sostenibilidad tanto técnica como social del proyecto, mostrando que la tecnología no solo introduce nuevos instrumentos de medición, sino que también transforma de manera integral la gestión del agua en Salache. Esto se realiza bajo un enfoque de trabajo coordinado, coherente y fundamentado en evidencia verificable, alineándose con los principios de la ciencia abierta promovidos por la UNESCO (2021) y con lo que establece la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108:2023.

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

La investigación logró identificar 41 conceptos clave que impactan la calidad del agua en

el sector Salache, organizados según el marco PESTEL. De todos los conceptos encontrados, la dimensión ecológica se destacó como la más relevante, representando un 32,58% (13 conceptos), seguida de la dimensión social con un 17,50% (7 conceptos). Esto pone de manifiesto que los problemas ambientales y sociales son las principales preocupaciones de la comunidad y afectan la disponibilidad de agua segura en la región. Además, las dimensiones política y legal alcanzaron un 15% cada una (6 conceptos cada una), lo que subraya la importancia de la gobernanza y el marco normativo en la gestión del recurso hídrico. El análisis estructural a través de la teoría de grafos reveló que el concepto PC1. Gestión deficiente del manejo comunitario del agua para consumo humano tiene la mayor centralidad en el sistema ($CI = 60,79$), consolidándose como el núcleo que articula el sistema socioecológico local y condiciona el éxito de cualquier intervención técnica. Este concepto no solo muestra la mayor centralidad, sino que también presenta el mayor grado de entrada ($id = 31,20$) y un alto grado de salida ($od = 29,59$), lo que confirma que la gestión deficiente es tanto una consecuencia de otros factores como una causa que perpetúa los problemas hídricos. Asimismo, el concepto TC2. Monitoreo permanente insuficiente ($CI = 60,73$) y los conceptos legales L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua y L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua ($CI = 60,07$ cada uno) ocupan posiciones clave dentro del sistema, evidenciando que la falta de monitoreo continuo y el debilitamiento del marco legal son factores críticos que perpetúan la gestión deficiente y la contaminación del recurso hídrico.

El diseño del sistema utilizando Mapas Cognitivos Difusos (FCM) permitió combinar el conocimiento científico de 25 conceptos bibliográficos con 16 conceptos que provienen del saber local, logrando un total de 41 conceptos que reflejan de manera precisa la complejidad hídrica de la comunidad. La alta densidad del mapa ($D = 0,87$) y las 1467 conexiones entre los conceptos

demuestran que el sistema está profundamente interconectado, donde las interacciones entre las variables influyen en su comportamiento y dinámica general. Este nivel de conectividad sugiere que cualquier intervención en un concepto específico puede desencadenar efectos en cadena sobre múltiples componentes del sistema, lo que resalta la importancia de adoptar enfoques integrales y multidimensionales para la gestión del recurso hídrico. El análisis de escenarios mediante inferencia difusa mostró que la implementación del sistema de monitoreo basado en hardware libre (microcontrolador ESP32) tiene un impacto transformador del 95,45% sobre las variables del sistema, confirmando que el modelado sistémico es una herramienta efectiva para mejorar la toma de decisiones y la sostenibilidad en la gestión del agua. Los resultados indicaron que el sistema de monitoreo no solo desempeña una función técnica de vigilancia, sino que también refuerza los procesos de organización social y corresponsabilidad en torno al recurso hídrico, empoderando a la comunidad con información confiable y en tiempo real sobre la calidad del agua que consume.

almacenamiento que propuso la comunidad, y los resultados fueron bastante alentadores, con un impacto positivo del 95,35%. Esto no solo fortaleció la organización comunitaria, sino que también mejoró el acceso equitativo al agua y redujo las interrupciones en el servicio. Sin embargo, esta estrategia también mostró algunas limitaciones importantes: la caída en los indicadores P1. Acceso a información hídrica y P2. Información veraz sobre la calidad del agua, con una fuerza máxima de -4, dejó claro que simplemente aumentar el almacenamiento no garantiza información sobre la calidad del agua. Aunque la comunidad pueda tener más agua almacenada, sigue corriendo el riesgo de consumir agua contaminada. Esto resalta la necesidad de combinar ambas estrategias para asegurar una seguridad hídrica integral. Se elaboró un manual metodológico de ocho módulos, adaptado a la realidad sociocultural del sector Salache, donde conviven adultos mayores y jóvenes con diferentes niveles de educación. Estos módulos orientan a la comunidad desde el diagnóstico

participativo (que incluye la identificación de la fuente, el mapeo comunitario y la priorización de problemas) hasta la toma de decisiones fundamentadas en evidencia. También abordan el análisis de relaciones causa-efecto, la aplicación del análisis PESTEL y el uso de un sistema de monitoreo. Las pautas del manual son esenciales para democratizar el acceso al conocimiento y asegurar la transferencia tecnológica, permitiendo que la comunidad se apropie de las herramientas de ciencia abierta y actúe como guardiana de sus fuentes hídricas de manera autónoma, en línea con los principios de la ciencia ciudadana promovidos por la UNESCO (2021).

12.2 Recomendaciones

Se sugiere al Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Parroquial de Eloy Alfaro y a la Junta Administradora de Agua de Salache que integren la matriz de 41 conceptos PESTEL que se ha generado en este estudio. Este instrumento técnico es clave para la planificación estratégica del recurso hídrico. Es crucial que las autoridades locales pongan en primer lugar políticas públicas que busquen mitigar la "Gestión deficiente del manejo comunitario del agua de consumo humano" (PC1), ya que este factor tiene la mayor centralidad sistémica (60,79) y actúa como el eje central del desorden administrativo que se ha identificado. La implementación de estas políticas facilitará una gestión institucional más coordinada y transparente, fortaleciendo la conexión entre la comunidad y las entidades gubernamentales, en línea con lo que establece la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).

Para el ámbito académico y científico, se anima a los investigadores de la Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC) a aplicar los principios de ciencia abierta y metodología de Mapas Cognitivos Difusos en diferentes territorios rurales de la región andina. Esta transferencia de conocimiento es fundamental para validar si las dinámicas de influencia de las variables hídricas se mantienen constantes o fluctúan según el entorno sociocultural. De esta manera, se podrá crear

una base de datos regional sólida sobre la vulnerabilidad y resiliencia de los sistemas hídricos comunitarios, promoviendo soluciones tecnológicas accesibles de bajo costo y hardware libre adaptadas a cada situación, contribuyendo de esta manera al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento).

A los dirigentes y habitantes del sector Salache, se recomienda la adopción y aplicación rigurosa del manual metodológico de ocho módulos desarrollado en esta investigación. La sostenibilidad operativa del sistema de monitoreo y la vida útil de los sensores dependen directamente de la disciplina comunitaria en el seguimiento de los protocolos de limpieza, mantenimiento preventivo y registro diario de la información. Se debe evitar cualquier manipulación técnica del hardware que no esté contemplada en los lineamientos pedagógicos establecidos, asegurando así la integridad de los datos generados.

Es fundamental fortalecer la colaboración entre la academia y la comunidad mediante procesos constantes de alfabetización hídrica y actualización tecnológica dirigidos a jóvenes, adultos y personas mayores de Salache. La creación de información precisa y en tiempo real debe convertirse en una herramienta de empoderamiento social, asegurando la protección de nuestras fuentes naturales frente a las amenazas ecológicas y humanas que hemos identificado en el modelo socioecológico. Esto incluye problemas como la contaminación derivada de actividades ganaderas, la falta de reforestación en áreas hídricas, la presencia de contaminantes generados por el ser humano y la vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos. Solo a través de una corresponsabilidad informada de los usuarios, junto con el apoyo constante de las instituciones académicas y gubernamentales, podremos garantizar el acceso a agua segura y la resiliencia del sistema de abastecimiento a largo plazo, contribuyendo así a la sostenibilidad del recurso hídrico para las futuras generaciones.

13 BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Regulación y Control del Agua. 2022a. *Regulación Nacional Nro. DIR-ARCA-RG-012-2022. Norma técnica para el control a la calidad del agua de consumo humano*. ARCA. Regulaciones del Sector Hídrico – ARCA.

Agencia de Regulación y Control del Agua. 2022b. *Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-012-2022. Norma técnica para el control a la calidad del agua de consumo humano*. DIR-ARCA-RG-012-2022. Agencia de Regulación y Control del Agua. https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/2022/03/Regulaci%C3%B3n-DIR-ARCA-RG-012-2022-Calidad-del-agua_-signed.pdf.

Agencia de Regulación y Control del Agua. 2023. *Guía para la conformación y fortalecimiento de las Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento (JAAPS)*. Quito, Ecuador: Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). <https://www.regulacionagua.gob.ec>.

Agencia de Regulación y Control del Agua. 2023b. *GUÍAS ALIANZAS PC – CC Y GUÍA DE TARIFAS – Agencia de Regulacion y Control del Agua*. Quito, Ecuador: Agencia de Regulación y Control del Agua. <https://www.regulacionagua.gob.ec/guia-para-la-conformacion-de-alianzas-publico-comunitarias-y-comunitarias/>.

Aguirre, Kelly Andrea, y Diego Paredes Cuervo. 2023. «Water Safety and Water Governance: A Scientometric Review». *Sustainability* 15(9):7164. doi:10.3390/su15097164.

Alvarado Peralta, Jeremmy Paul, y Kenneth Sebastián De La Cruz Minda. 2026. «Evaluación de la viabilidad de implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta para la comunidad Ponce Quilotoa, Provincia de Cotopaxi». Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: (UTC).

Armijos-Arcos, Freddy, Cristian Salazar, Andrés A. Beltrán-Dávalos, Anna I. Kurbatova, y Elena V. Savenkova. 2025. «Assessment of Water Quality and Ecological Integrity in an Ecuadorian Andean Watershed». *Sustainability* 17(8):3684. doi:10.3390/su17083684.

Asamblea Constituyente. 2008. *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial No. 449. Ecuador. <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/ley-organica-de-recursos-hidricos-usos-y-aprovechamiento-d-0>.

Asamblea Nacional del Ecuador. 2014a. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua*. Quito, Ecuador: Asamblea Nacional del Ecuador. <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/publicacion/53802-ley-organica-de-recursos-hidricos-uso-y>.

Asamblea Nacional del Ecuador. 2014b. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. Quito, Ecuador: Asamblea Nacional del Ecuador. https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/ley_organica_de_recursos_hidricos.pdf.

Asamblea Nacional del Ecuador. 2021. *Constitución de la República del Ecuador*. Asamblea Nacional del Ecuador. https://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/constitucion_de_la_republica_del_ecuador.

Bakhtavar, Ezzeddin, Valipour, Yousefi, Sadiq, y Hewage. 2021. «Fuzzy cognitive maps in systems risk analysis: a comprehensive review | Complex & Intelligent Systems | Springer Nature Link». 621-37.

Barbrook-Johnson, Pete, y Alexandra S. Penn. 2022. «Fuzzy Cognitive Mapping». Pp. 79-95 en *Systems Mapping: How to build and use causal models of systems*, editado por P. Barbrook-Johnson y A. S. Penn. Cham: Springer International Publishing.

Bendahman, Nada, y Dounia Lotfi. 2024. «Unveiling Influence in Networks: A Novel

Centrality Metric and Comparative Analysis through Graph-Based Models». *Entropy* 26(6):486. doi:10.3390/e26060486.

Bhuiyan, Miraj Ahmed, Qiannan Zhang, Wu Xuan, Muhammad Khalilur Rahman, y Vikas Khare. 2023a. «Does Good Governance Promote Sustainable Tourism? A Systematic Review of PESTEL Analysis». *SN Business & Economics* 3(1):33. doi:10.1007/s43546-022-00408-x.

Bhuiyan, Miraj Ahmed, Qiannan Zhang, Wu Xuan, Muhammad Khalilur Rahman, y Vikas Khare. 2023b. «Does Good Governance Promote Sustainable Tourism? A Systematic Review of PESTEL Analysis». *SN Business & Economics* 3(1):33. doi:10.1007/s43546-022-00408-x.

Bilalova, Shahana, Newig, Jens, Tremblay-Lévesque, Laurent-Charles, Roux, Julianne, Herron, Colin, y Crane, Stuart. 2023. «Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management». *Journal of Environmental Management* 343:118179. doi:10.1016/j.jenvman.2023.118179.

Blanco-Ramírez, Sara, Camila Bañales-Seguel, Clara Guardado-Torrez, Jan Seibert, y Ilja van Meerveld. 2025. «Implementation of a Global Citizen Science App in Community-Based Water Monitoring: Lessons Learned from the CrowdWater Experiences in Latin America». *Citizen Science: Theory and Practice* 10(1). doi:10.5334/cstp.749.

Blanco-Ramírez, Sara, Bañales-Seguel, Camila, Guardado-Torrez, Clara, Seibert, Jan, y van Meerveld, Ilja. 2025. «Implementation of a Global Citizen Science App in Community-Based Water Monitoring: Lessons Learned from the CrowdWater Experiences in Latin America». 1-5.

Bogdan, Razvan, Camelia Paliuc, Mihaela Crisan-Vida, Sergiu Nimara, y Darius Barmayoun. 2023. «Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas». *Sensors* 23(8):3919. doi:10.3390/s23083919.

Bonney, Patrick R., Birgita D. Hansen, y Claudia Baldwin. 2023. *Citizen Science and*

Natural Resource Management: A Social Network Analysis of Two Community-Based Water Monitoring Programs. Routledge. doi:10.1080/08941920.2023.2183445.

Bonney, Rick, Tina B. Phillips, Heidi L. Ballard, y Jody W. Enck. 2016. «Can Citizen Science Enhance Public Understanding of Science?» *Public Understanding of Science* 25(1):2-16. doi:10.1177/0963662515607406.

Borgatti, Stephen P., y Martin G. Everett. 2006. «A Graph-theoretic perspective on centrality». *Social Networks* 28(4):466-84. doi:10.1016/j.socnet.2005.11.005.

Cajas, Rocio del Pilar Guaña, Lizeth Macías Ayala, y Nilda Avellán Herrera. 2023. «Control interno y resultados económicos en las Juntas Administradoras de Agua Potable del cantón Latacunga: Internal control and economic results in the drinking water management boards of the Latacunga canton». *Revista Científica RES NON VERBA* 13(2):28-45. doi:10.21855/resnonverba.v13i2.794.

de Camargo, Edson Tavares, Fabio Alexandre Spanhol, Juliano Scholz Slongo, Marcos Vinicius Rocha da Silva, Jaqueline Pazinato, Adriana Vechai de Lima Lobo, Fábio Rizental Coutinho, Felipe Walter Dafico Pfrimer, Cleber Antonio Lindino, Marcio Seiji Oyamada, y Leila Droprinchinski Martins. 2023. «Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review». *Sensors* 23(9):4424. doi:10.3390/s23094424.

Castro, Cyndi Vail, Clint Carney, y Mariana Madruga de Brito. 2023. «The Role of Network Structure in Integrated Water Management: A Case Study of Collaboration and Influence for Adopting Nature-Based Solutions». *Frontiers in Water* 5. doi:10.3389/frwa.2023.1011952.

Castro, Juan Cristóbal. 2012a. «Diseño de una propuesta de tratamiento y purificación del agua de consumo humano en el centro de experimentación y producción Salache (CEYPSA) de la universidad técnica de Cotopaxi.» <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/578>.

Castro, Juan Cristóbal. 2012b. «Diseño de una propuesta de tratamiento y purificación del agua de consumo humano en el centro de experimentación y producción Salache (CEYPSA) de la universidad técnica de Cotopaxi.» <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/578>.

Chen. 2022. «Knowledge-oriented methodologies for causal inference relations using fuzzy cognitive maps: A systematic review». *Computers & Industrial Engineering* 171:108500. doi:10.1016/j.cie.2022.108500.

Chinnasamy, Pennan, y Meeta Gupta. 2024. «Participatory approaches for water monitoring and harvesting: Case study from India». *Cambridge Prisms: Water* 2:e2. doi:10.1017/wat.2023.18.

Danielsen, Finn, Hajo Eicken, Mikkel Funder, Noor Johnson, Olivia Lee, Ida Theilade, Dimitrios Argyriou, y Neil D. Burgess. 2022. «Community Monitoring of Natural Resource Systems and the Environment». *Annual Review of Environment and Resources* 47(Volume 47, 2022):637-70. doi:10.1146/annurev-environ-012220-022325.

Di Vaio, Assunta, Lourdes Trujillo, Gabriella D'Amore, y Rosa Palladino. 2021. «Water governance models for meeting sustainable development Goals:A structured literature review». *Utilities Policy* 72:101255. doi:10.1016/j.jup.2021.101255.

Dominguez-Rendón, Edith, Mariana Villada-Canela, y Dalia Marcela Muñoz-Pizza. 2024a. «“Community strengthening through citizen monitoring of water quality: A systematic review”». *PLOS ONE* 19(7):e0305723. doi:10.1371/journal.pone.0305723.

Dominguez-Rendón, Edith, Mariana Villada-Canela, y Dalia Marcela Muñoz-Pizza. 2024b. «“Community strengthening through citizen monitoring of water quality: A systematic review”». *PLOS ONE* 19(7):e0305723. doi:10.1371/journal.pone.0305723.

Doukas, Haris, y Alexandros Nikas. 2020. «Decision support models in climate policy».

European Journal of Operational Research 280(1):1-24. doi:10.1016/j.ejor.2019.01.017.

Essamlali, Ismail, Hasna Nhaila, y Mohamed El Khaili. 2024. «Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review». *Heliyon* 10(6):e27920. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e27920.

Essamlali, Ismail, Hasna Nhaila, y Mohamed El Khaili. 2024. «Advances in Machine Learning and IoT for Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review». *Heliyon* 10(6). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e27920.

Estadísticas - Censo Ecuador. s.f. Recuperado 13 de julio de 2026. <https://www.censoecuador.gob.ec/estadisticas/>.

Etter, Simon, Barbara Strobl, Ilja van Meerveld, y Jan Seibert. 2020. «Quality and Timing of Crowd-Based Water Level Class Observations». *Hydrological Processes* 34(22):4365-78. doi:10.1002/hyp.13864.

Fonseca, Kalina, Juan S. Acero Triana, Miguel Ramírez, William Martínez, Mercy Ilbay, Edgar Espitia-Sarmiento, y Lutz Breuer. 2024. «Assessing the potential of nature-based solutions as sustainable land and water management strategies in the high tropical Andean páramo ecosystem». *Journal of Environmental Management* 372:123350. doi:10.1016/j.jenvman.2024.123350.

Fonseca, Kalina, Edgar Espitia, Lutz Breuer, y Alicia Correa. 2022a. «Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities». *Journal of Cleaner Production* 377:134246.

Fonseca, Kalina, Edgar Espitia, Lutz Breuer, y Alicia Correa. 2022b. «Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities». *Journal of Cleaner Production* 377:134246.

doi:10.1016/j.jclepro.2022.134246.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2024. «Water governance | Land, Soil and Water | FAO». <https://www.fao.org/land-water/water/governance/en>.

Gray, Steven, Brelsford, Christa, Singer, Alison, Jordan, Rebecca, Nyaki, A., y Gagnon, A. 2021. «Fuzzy Cognitive Maps of Social-Ecological Complexity: Applying Mental Modeler to the Bonneville Salt Flats». *Ecological Complexity* 47:100950. doi:10.1016/j.ecocom.2021.100950.

Gray, Steven, Stefan Gray, Jean-Luc Kok, A. Helfgott, Barry O'Dwyer, Rebecca Jordan, y Angela Nyaki. 2015. «Using fuzzy cognitive mapping as a participatory approach to analyze change, preferred states, and perceived resilience of social-ecological systems». *Ecology and Society* 20. doi:10.5751/ES-07396-200211.

Hacker, Josiah, Fatima Iqbal, Matías Osuna, Osely Perea, Keiner Sánchez, Christopher Page, Jamie Torres, Md. Nizam Uddin, Hannah Walden, Mikko Westerbeke, Astana Woody, Nazly Enith Rubio Murillo, Francisco Cubas, Farith A. Díaz-Arriaga, y Lewis S. Rowles. 2025a. «Aquatic quality watch informed by communities (AQWIC) facilitating the adoption of low-cost sensor systems for underserved communities: a review and tutorial». *Environmental Science: Advances* 4(4):512-29. doi:10.1039/d4va00332b.

Hacker, Josiah, Fatima Iqbal, Matías Osuna, Osely Perea, Keiner Sánchez, Christopher Page, Jamie Torres, Md. Nizam Uddin, Hannah Walden, Mikko Westerbeke, Astana Woody, Nazly Enith Rubio Murillo, Francisco Cubas, Farith A. Díaz-Arriaga, y Lewis S. Rowles. 2025b. «Aquatic quality watch informed by communities (AQWIC) facilitating the adoption of low-cost sensor systems for underserved communities: a review and tutorial». *Environmental Science: Advances* 4(4):512-29. doi:10.1039/d4va00332b.

INEC. 2022. *Censo de Población y Vivienda 2022*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censo. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2023. *NTE INEN 1108:2023 Agua para consumo humano. Requisitos*. NTE INEN 1108:2023. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2023. *Ecuador - Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2022*. Quito, Ecuador. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/municipales-2022/>.

Jabbar, Waheb A., Tan Mei Ting, M. Fikri I. Hamidun, Ajwad H. Che Kamarudin, Wenyan Wu, Jamil Sultan, AbdulRahman A. Alsewari, y Mohammed A. H. Ali. 2024. «Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas». *Expert Systems with Applications* 242:122862. doi:10.1016/j.eswa.2023.122862.

Jaramillo-Cañas, Winston, Frank Britto-Bisso, Cesar Fernandez-Valiente, y Fanny L. Casado. 2023. «Open-Source Perfusion System for Medium-Scale Fabrication of Demineralized Bone Matrix Chip Grafts». *HardwareX* 13. doi:10.1016/j.ohx.2022.e00378.

Jetter, Antonie J., y Kasper Kok. 2014. «Fuzzy Cognitive Maps for futures studies—A methodological assessment of concepts and methods». *Futures* 61:45-57. doi:10.1016/j.futures.2014.05.002.

Karatzinis, Georgios D., y Yiannis S. Boutalis. 2025. «A Review Study of Fuzzy Cognitive Maps in Engineering: Applications, Insights, and Future Directions». *Eng* 6(2):37. doi:10.3390/eng6020037.

Kaveh Madani. 2026. *Global Water Bankruptcy: Living Beyond Our Hydrological Means in the Post-Crisis Era*. UNU-INWEH Research Report. Richmond Hill, Ontario, Canada: United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH).

doi:10.53328/INR26KAM001.

Kosovac, Anna, Avril C. Horne, y Erin O'Donnell. 2023a. «Community perceptions of environmental water: a review». *Environmental Conservation* 50(2):73-82. doi:10.1017/S0376892923000036.

Kosovac, Anna, Avril C. Horne, y Erin O'Donnell. 2023b. «Community perceptions of environmental water: a review». *Environmental Conservation* 50(2):73-82. doi:10.1017/S0376892923000036.

Lopolito, Antonio, Pasquale Marcello Falcone, Piergiuseppe Morone, y Edgardo Sica. 2020. «A Combined Method to Model Policy Interventions for Local Communities Based on People Knowledge». *MethodsX* 7:100877. doi:10.1016/j.mex.2020.100877.

Machado, Anna V. M., Pedro A. D. Oliveira, y Patrick G. Matos. 2022. «Review of Community-Managed Water Supply—Factors Affecting Its Long-Term Sustainability». *Water* 14(14):2209. doi:10.3390/w14142209.

Mamun, Abdullah Al, y David C. Natcher. 2023. «The Promise and Pitfalls of Community-Based Monitoring with a Focus on Canadian Examples». *Environmental Monitoring and Assessment* 195(4):445. doi:10.1007/s10661-022-10841-y.

Martínez-Moscoso, Andrés, y Adriana Abril Ortiz. 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. doi:10.32719/26312484.2020.34.4.

Mendez, Diego, Manuel Pérez, lejandro Farfan, y Eduardo Gerlein. 2022. «IDC Sensor for Low-Cost Water Quality Monitoring Applications». *Ingeniería y Universidad* 26:1-20. doi:10.11144/Javeriana.iyu26.islc.

Metshein, Margus, Varje-Riin Tuulik, Viiu Tuulik, Monika Kumm, Mart Min, y Paul

Annus. 2023. «Electrical Bioimpedance Analysis for Evaluating the Effect of Pelotherapy on the Human Skin: Methodology and Experiments». *Sensors* 23(9):4251. doi:10.3390/s23094251.

Moretta, Patricio Yáñez, Daniel Pacheco Peña, y Luis Fernando Lema. 2022. «Cogestión del agua a nivel comunitario en zonas andinas de Ecuador en un contexto de adaptación al Cambio Climático». *Polo del Conocimiento* 7(10):1051-61. doi:10.23857/pc.v7i10.4773.

Mourhir, Asmaa. 2021a. «Scoping review of the potentials of fuzzy cognitive maps as a modeling approach for integrated environmental assessment and management». *Environmental Modelling & Software* 135:104891. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104891.

Mourhir, Asmaa. 2021b. «Scoping review of the potentials of fuzzy cognitive maps as a modeling approach for integrated environmental assessment and management». *Environmental Modelling & Software* 135:104891. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104891.

Newig, Jens, Jager, Nicolas W., Challies, Edward, y Kochskämper, Elisa. 2023. «Does stakeholder participation improve environmental governance? Evidence from a meta-analysis of 305 case studies». *Global Environmental Change*, septiembre 1, 102705.

Obiedat, Mamoon, y Sandhya Samarasinghe. 2022. «Modelling Socio-ecological Systems: Implementation of an Advanced Fuzzy Cognitive Map Framework for Policy development for addressing complex real-life challenges».

Obiedat, Mohammad y Samarasinghe, Sandhya. 2011. «A New Method for Identifying the Central Nodes in Fuzzy Cognitive Maps Using Consensus Centrality Measure». Pp. 1084-90 en *Proceedings of the 19th International Congress on Modelling and Simulation*. Perth, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand (MSSANZ), Inc.

OECD. 2021. «Toolkit for Water Policies and Governance: Converging Towards the OECD Council Recommendation on Water». OECD Publishing.

https://www.oecd.org/en/publications/toolkit-for-water-policies-and-governance_ed1a7936-en.html.

OECD. 2022. «Financing a Water Secure Future». *OECD Studies on Water*. doi:10.1787/a2ecb261-en.

Organización de las Naciones Unidas. 2015a. *Transformar Nuestro Mundo: La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible*. Nueva York, Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240060807>.

Organización de las Naciones Unidas. 2015b. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Organización de las Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/2030agenda>.

Organización Mundial de la Salud. 2022a. *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. Geneva: World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>.

Organización Mundial de la Salud. 2022b. *State of the World's Drinking Water: An Urgent Call to Action to Accelerate Progress on Ensuring Safe Drinking Water for All*. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240060807>.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2022. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization.

Ozerol, Gül, Joanne Vinke-de-Kruijf, Marie Claire Brisbois, Cesar Casiano Flores, Pranjal Deekshit, Corentin Girard, Christian Knieper, S. Jalal Mirnezami, Mar Ortega-Reig, Pranay Ranjan, Nadine J. S. Schröder, y Barbara Schröter. 2018. «Comparative Studies on Water Governance: A Systematic Review». doi:10.5751/ES-10548-230443’].

Özesmi, Uygur, y Stacy L. Özesmi. 2004a. «Ecological models based on people's

knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach». *Ecological Modelling* 176(1):43-64. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027.

Özesmi, Uygur, y Stacy L. Özesmi. 2004b. «Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach». *Ecological Modelling* 176(1):43-64. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027.

Papageorgiou, Elpiniki I., y Peter Groumpos. 2023. «An Overview of Energy Management Using Fuzzy Cognitive Maps». *Journal of Smart Environments and Green Computing* 3(2):18-36. doi:10.20517/jsegc.2022.21.

Papageorgiou, Elpiniki I. y Salmeron, Jose L. 2013. «A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade». 66-79.

Parreño, Lenin, y Federico Pablo-Martí. 2024. «Fuzzy cognitive maps for municipal governance improvement | PLOS One». febrero 29.

Patel, Darshil, Krishi Koradia, y Prachi Sharma. 2025. «IoT-Based Water Quality Monitoring System using ESP32». Pp. 1-5 en *2025 7th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*.

Portilla, Villacrés, y Tatiana Geovanna. 2025. «Normativa legal vigente para la correcta gestión de los recursos hídricos en el Ecuador». *Siembra*.

Prompt, Sommart, Somkiat Maithomklang, y Chawalit Panya-isara. 2023. «Design and Analysis Performance of IoT-Based Water Quality Monitoring System Using LoRa Technology». *TEM Journal* 29-35. doi:10.18421/TEM121-04.

Ramesh, Reshma, Efrat Frank, Aswathi Padmavilochanan, Yuval Barda, Itay Eldar, Hanna Wolf, Asaf Pras, Dana Pousty, Parameswari Anita, Lekha Shekar, J. Sophie von Lieres, Bhavani Rao R, Hadas Mamane, y Ram Fishman. 2024. «Reliable Water Quality Monitoring by Women

in Low-Resource Communities». *ACS ES&T Water* 4(9):3832-41. doi:10.1021/acsestwater.4c00164.

Remko, Voogd, Rudberg g, Peter M. Peter, y de Vries R. Jasper. 2022. «A systematic review on the role of trust in the water governance literature». *Water Research X* 16:100147. doi:10.1016/j.wroa.2022.100147.

Rippy, Megan A., Benjamin H. Roston, Emily Z. Berglund, Payam Aminpour, Lauren Krauss, Shantanu V. Bhide, Todd Schenk, Kristin Rowles, Shalini Misra, Thomas A. Birkland, Sujay S. Kaushal, y Stanley B. Grant. 2024a. «Caracterización del sistema socioecológico para la salinización de aguas dulces continentales mediante mapas cognitivos difusos: implicaciones para la gestión colectiva - Ecología y Sociedad». *Ecology and Society* 29(4). doi:10.5751/ES-15536-290447.

Rippy, Megan A., Benjamin H. Roston, Emily Z. Berglund, Payam Aminpour, Lauren Krauss, Shantanu V. Bhide, Todd Schenk, Kristin Rowles, Shalini Misra, Thomas A. Birkland, Sujay S. Kaushal, y Stanley B. Grant. 2024b. «Characterizing the Social-Ecological System for Inland Freshwater Salinization Using Fuzzy Cognitive Maps: Implications for Collective Management - Ecology & Society». *Ecology and Society* 29(4). doi:10.5751/ES-15536-290447.

Roque, Alexandra, Wutich, Amber, Quimby, Beth, Porter, Stephanie, Zheng, Meng, Hossain, Mohammed Jobayer, y Brewis, Alexandra. 2022. «Participatory approaches in water research: A review - Roque - 2022 - WIREs Water - Wiley Online Library».

Rüfenacht, Samuel, Eva Schilling, y Philip J. Ward. 2023. «Citizen science approaches for water quality measurements». *Science of The Total Environment* 897:165436. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165436.

Salamanca-Cano, Angie Katherin, y Pamela Durán-Díaz. 2023. «Stakeholder Engagement

around Water Governance: 30 Years of Decision-Making in the Bogotá River Basin».

Sarmiento, Iván, Anne Cockcroft, Anna Dion, Loubna Belaid, Hilah Silver, Katherine Pizarro, Juan Pimentel, Elyse Tratt, Lashanda Skerritt, Mona Z. Ghadirian, Marie-Catherine Gagnon-Dufresne, y Neil Andersson. 2024. «Fuzzy cognitive mapping in participatory research and decision making: a practice review». *Archives of Public Health* 82:76. doi:10.1186/s13690-024-01303-7.

Sarmiento, Iván, Anne Cockcroft, Anna Dion, Sergio Paredes-Solís, Abraham De Jesús-García, David Melendez, Anne Marie Chomat, Germán Zuluaga, Alba Meneses-Rentería, y Neil Andersson. 2022. «Combining Conceptual Frameworks on Maternal Health in Indigenous Communities—Fuzzy Cognitive Mapping Using Participant and Operator-Independent Weighting». *Field Methods* 34(3):223-39. doi:10.1177/1525822X211070463.

Shahvi, S., Mellander, P. E., Jordan, P., y 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142193.

Shahvi, Shervin, Mellander, Per-Erik, Jordan, Phil, y Fenton, Owen. 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. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142193.

Sharma, Saurabh, Mishra, Devansh, Yadav, Ayush, Gami, Bibek, y Madhan, E. S. 2026. «An Intelligent, low-cost water quality monitoring system with on-device machine learning and cloud integration».

Solana-Gutiérrez, Joaquín, Gonzalo Rincón, Carlos Alonso, y Diego García-de-Jalón. 2017. «Using fuzzy cognitive maps for predicting river management responses: A case study of

the Esla River basin, Spain». *Ecological Modelling* 360:260-69. doi:10.1016/j.ecolmodel.2017.07.010.

Trotta, Vincenzo, Oussama Baaloudj, y Monica Brienza. 2024. «Risks Associated with Wastewater Reuse in Agriculture: Investigating the Effects of Contaminants in Soil, Plants, and Insects». *Frontiers in Environmental Science* 12. doi:10.3389/fenvs.2024.1358842.

UNESCO. 2021a. *UNESCO Recommendation on Open Science*. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://www.unesco.org/en/legal-affairs/recommendation-open-science>.

UNESCO. 2021b. *UNESCO Recommendation on Open Science - UNESCO Biblioteca Digital*. Paris: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949>.

UNESCO. 2023. *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. Institución*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/es/download>.

UNESCO. 2024a. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: agua para la prosperidad y la paz - UNESCO Biblioteca Digital*. Paris: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195>.

UNESCO. 2024b. *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace - UNESCO Biblioteca Digital*. Paris, France: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>.

United Nations. 2024. *United Nations*. New York. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/>.

UN-Water. 2021. *Progress on Integrated Water Resources Management – 2021 Update*. United Nations. <https://www.unwater.org/publications/progress-integrated-water-resources-management-2021-update>.

Vamsi Thalatham, M. N., Pratibha Lanka, y J. N. V. R. Swarup Kumar. 2023. «An IoT Based Smart Water Contamination Monitoring System». Pp. 387-91 en *2023 International Conference on Intelligent Systems for Communication, IoT and Security (ICISCoIS)*.

van Vliet, Michelle T. H., Josefin Thorslund, Maryna Stokol, Nynke Hofstra, Martina Flörke, Heloisa Ehalt Macedo, Albert Nkwasa, Ting Tang, Sujay S. Kaushal, Rohini Kumar, Ann van Griensven, Lex Bouwman, y Luke M. Mosley. 2023. «Global River Water Quality under Climate Change and Hydroclimatic Extremes». *Nature Reviews Earth & Environment* 4(10):687-702. doi:10.1038/s43017-023-00472-3.

Vollmer, Derek, Kremena Burkhard, Blal Adem Esmail, Paulina Guerrero, y Nidhi Nagabhatla. 2022. «Incorporating Ecosystem Services into Water Resources Management—Tools, Policies, Promising Pathways». *Environmental Management* 69(4):627-35. doi:10.1007/s00267-022-01640-9.

Warner, Stuart, Sara Blanco Ramírez, Sandra de Vries, Nancy Marangu, Henriette Ateba Bessa, Carla Toranzo, Madina Imaralieva, Tommaso Abrate, Enock Kiminta, José Castro, Marcelo Luiz de Souza, Abdul Ghaffar Memon, Steven Loiselle, y Mohamed Sahr E. Juanah. 2024. «Empowering Citizen Scientists to Improve Water Quality: From Monitoring to Action». *Frontiers in Water* 6. doi:10.3389/frwa.2024.1367198.

White, Corey T., Helena Mitsova, Todd K. BenDor, Kevin Foy, Okan Pala, Jelena Vukomanovic, y Ross K. Meentemeyer. 2021. «Spatially Explicit Fuzzy Cognitive Mapping for Participatory Modeling of Stormwater Management». *Land* 10(11):1114. doi:10.3390/land10111114.

Wilkinson, Mark D., Dumontier, Michel, Aalbersberg, IJsbrand J. J., Appleton, Gabrielle, Axton, Myles, Baak, Arie, Blomberg, Niklas, Boiten, Jan Willem, da Silva Santos, Luiz B., y

Bourne, Philip E. 2016. «The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship».

World Health Organization. 2022. *State of the world's drinking water: An urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all*.

Yevenes, Mariela A., Helen Pereira, y Rafael Bermudez. 2022. «Citizen Science as a Co-Creative Measure to Water Quality: Chemical Data and Local Participation in a Rural Territory». *Frontiers in Environmental Science* 10. doi:10.3389/fenvs.2022.940778.

