



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE HIDRÁULICA

Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi.

**INFORME FINAL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE
INGENIERO HIDRÁULICO**

AUTORES:

Alison Fernanda Aguisa Cando

TUTOR:

Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mg.

LATACUNGA, ABRIL-AGOSTO 2026



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 **ALISON FERNANDA AGUAISA CANDO**, identificado con cédula de ciudadanía No.0550656086 de estado civil soltera, 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 Hidráulica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán 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 2020 – Marzo 2021

Finalización de la carrera: Abril 2026 – Agosto 2026

Aprobación HCA. Agosto 2026

Tutor: Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mg.

Tema: “**REDISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA EL BARRIO BRAZALES**”

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:

f) 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.

g) La publicación del trabajo de grado.



h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

j) 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, a los 12 días del mes de marzo del 2026.

Alison Fernanda Aguaisa Cando
EL CEDENTE

Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

Latacunga, agosto 11 de 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **Alison Fernanda Aguaisa Cando** declaro ser autor (a) del proyecto de titulación Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi., siendo la **Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mg.**, tutor (a) del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.

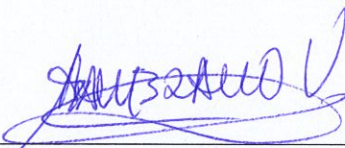


Alison Fernanda Aguaisa Cando
CC.0550656086

Latacunga, agosto 11 de 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi.”, propuesto por el o la estudiante **Alison Fernanda Aguaisa Cando, Steven Alexander Barahona Tonato** de la Carrera de **Ingeniería Hidráulica**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mg.

C.C. 0603324401

TUTOR

Latacunga, agosto del 2026

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal del Proyecto de Investigación con el Título **“Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi”**, propuesto por los estudiantes Alison Fernanda Aguaisa Cando y Steven Alexander Barahona Tonato de la Carrera de Hidráulica, nos permitimos indicar que los estudiantes han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad presencial en virtud de lo cual los postulantes pueden presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

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

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Lector 1 (Presidente)

Patricio Germánico Chávez Zapata
CC:0501305668

Lector 2

Yenson Vinicio Mogro Cepeda
CC:0501657514

Lector 3

Jimmy Xavier Toaza Iza
CC:1717621062

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, por ser mi fortaleza, guiarme y darme la sabiduría y perseverancia necesarias durante estos cinco años de carrera.

A mis padres, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por acompañarme en cada etapa de mi formación y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

También dedico este logro a mi familia, por estar presente, brindarme su apoyo y confiar en mí. Este trabajo representa el resultado de cinco años de esfuerzo, aprendizaje y perseverancia para alcanzar una meta que hoy se hace realidad.

Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios, por darme fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada desafío durante estos cinco años de carrera y permitirme llegar hasta este momento.

A mis padres, por su amor, esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional. Gracias por confiar en mí, acompañarme en cada etapa y motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, Paul, Ángel, Daniel y Emir, por su cariño, apoyo y por estar presentes durante este camino. Gracias por sus palabras de ánimo y por acompañarme en los momentos buenos y difíciles.

A mi familia, por su apoyo y confianza durante mi formación universitaria.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a todos los docentes que contribuyeron a mi formación profesional, compartiendo sus conocimientos y experiencias.

A mi tutora de tesis, por su orientación, paciencia y las observaciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo y me acompañaron durante estos cinco años de formación.

RESUMEN

El sistema existente de captación de agua ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, que abastece al cantón Saquisilí, constituye una infraestructura importante para garantizar la continuidad del servicio de agua y se encuentra expuesto a amenazas asociadas a una eventual erupción del volcán Cotopaxi. La investigación tuvo como objetivo evaluar semicuantitativamente la vulnerabilidad del sistema frente a dichas amenazas, considerando las dimensiones física, funcional u operativa, ambiental y organizativa o administrativa, con el propósito de identificar sus principales debilidades y establecer medidas de prevención y mitigación. La investigación se desarrolló bajo un enfoque semicuantitativa, mediante inspecciones técnicas de campo, observación directa, registro fotográfico, entrevistas, revisión documental, levantamiento topográfico y análisis hidrológico y espacial mediante Sistemas de Información Geográfica. La vulnerabilidad de la obra de captación y del tanque sedimentador se evaluó mediante matrices de valoración y ponderaciones obtenidas mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Finalmente, se plantearon medidas de prevención y mitigación orientadas al fortalecimiento de la infraestructura, la gestión administrativa y la capacidad de respuesta, con el propósito de contribuir a la continuidad y seguridad del abastecimiento de agua del cantón Saquisilí ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi.

Palabras clave: vulnerabilidad semicuantitativa, sistema de captación de agua, AHP, amenaza volcánica, volcán Cotopaxi, gestión del riesgo.

ABSTRACT

The existing water intake system located in San Agustín de Callo, Mulaló Parish, Latacunga Canton, which supplies Saquisilí Canton, is an important infrastructure for ensuring the continuity of the water supply service and is exposed to hazards associated with a potential eruption of Cotopaxi Volcano. The objective of this research was to conduct a semi-quantitative assessment of the system's vulnerability to these hazards, considering the physical, functional or operational, environmental, and organizational or administrative dimensions, in order to identify its main weaknesses and establish prevention and mitigation measures. The research was conducted using a semi-quantitative approach through technical field inspections, direct observation, photographic records, interviews, documentary review, topographic surveying, and hydrological and spatial analysis using Geographic Information Systems. The vulnerability of the water intake structure and sedimentation tank was assessed using evaluation matrices and weighting factors obtained through the Analytic Hierarchy Process (AHP). Finally, prevention and mitigation measures were proposed to strengthen the infrastructure, administrative management, and response capacity, with the aim of contributing to the continuity and safety of the water supply to Saquisilí Canton in the event of a potential eruption of Cotopaxi Volcano.

KEYWORDS: semi-quantitative vulnerability, water intake system, AHP, volcanic hazard, Cotopaxi Volcano, risk management.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

AUTORES: Alison Fernanda Aguaisa Cando y Steven Alexander Barahona Tonato

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Josué Alexander Garzón Tapia con cédula de identidad número: 050407170-5. Magíster en: Pedagogía de los Idiomas Nacionales y Extranjeros con Mención en Enseñanza de Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1045-2025-3046507; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“EVALUACIÓN SEMICUANTITATIVA DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN QUE ABASTECE AL CANTÓN SAQUISILÍ, UBICADO EN SAN AGUSTÍN DE CALLO, PARROQUIA MULALÓ, CANTÓN LATACUNGA, ANTE UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI”** de: **Alison Fernanda Aguaisa Cando y Steven Alexander Barahona Tonato**, egresado/a de la carrera Ingeniería Hidráulica, perteneciente a la Facultad de: Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, 17 de agosto, 2026



Validar únicamente en FirmaDO.
Firmado electrónicamente por:
**JOSUE ALEXANDER
GARZON TAPIA**

.....
Lic. Josué Alexander Garzón Tapia, Mgtr.
CI: 050407170-5

Latacunga, 18 de agosto del 2026

CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el tema: "Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi.", de Alison Fernanda Aguaisa Cando, de la carrera de Hidráulica, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencias del 7%; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.



Página 2 de 103 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::1:3629515969

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el Informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de Integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Texto oculto

319 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mg.

C.C. 0603324401

TUTOR

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL.....	15
2.	INTRODUCCIÓN	16
2.1.	Situación Problemática	17
2.2.	Formulación del problema	18
2.3.	Objeto y Campo de Acción.....	18
2.3.1.	Objeto de la investigación.....	18
2.3.2.	Campo de acción.....	18
2.4.	Beneficiarios	18
2.4.1.	Directo.....	18
2.4.2.	Indirecto	18
2.5.	Justificación	18
2.6.	Objetivos	19
2.6.1.	General.....	19
2.6.2.	Específicos	19
2.7.	Sistemas de Tareas.....	19
3.	MARCO TEÓRICO	21
3.1.	Fuente de abastecimiento.....	22
3.1.1.	Concepto de captación de agua.....	22
3.1.2.	Superficial	22
3.1.3.	Subterránea	22
3.1.4.	Componentes del sistema de captación superficial.....	22
3.1.5.	Captación superficial	22
3.1.6.	Bocatoma	22
3.1.7.	Muros de ala.....	23

3.1.8.	Compuerta de regulación	23
3.1.9.	Caja de dirección.....	23
3.1.10.	Línea de conducción	23
3.1.11.	Tanque de almacenamiento	23
3.2.	Gestión del riesgo de desastre.....	23
3.3.	Amenaza	24
3.4.	Vulnerabilidad.....	24
3.4.1.	Vulnerabilidad física.....	24
3.4.2.	Vulnerabilidad operativa.....	24
3.4.3.	Vulnerabilidad organizativa.....	24
3.4.4.	Vulnerabilidad ambiental.....	24
3.4.5.	Riesgo	24
3.4.6.	Amenaza natural	24
3.4.7.	Amenaza volcánica	25
3.5.	Erupción volcánica.....	25
3.5.1.	Caída de ceniza	25
3.5.2.	Flujos piroclásticos	25
3.5.3.	Lahares.....	25
3.5.4.	Gases volcánicos.....	26
3.6.	Historial eruptivo relevante.....	26
3.7.	Ubicación geográfica del volcán Cotopaxi	27
3.8.	Plan de mitigación.....	30
3.9.	Plan de medidas o intervención	30
4.	HIPOTESIS	30
5.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	30

5.1.	Enfoque de la investigación	30
5.2.	Diseño de la investigación	31
5.3.	Esquema Metodológico	32
5.4.	Área de estudio	33
5.5.	Reconocimiento de los elementos de la obra de captación y tanque sedimentador 33	
5.6.	Levantamiento de Información mediante topografía.....	34
5.7.	Análisis hidrológico del terreno y evaluación espacial de la exposición mediante superposición con cartografía oficial de amenazas.....	37
5.7.1.	Análisis hidrológico y geomorfológico del terreno	38
5.7.2.	Análisis de pendientes del terreno	39
5.7.3.	Determinación de dirección del flujo superficial.....	40
5.7.4.	Análisis de acumulación de escorrentía.....	40
5.7.5.	Delimitación de red hídrica y cuencas	41
5.8.	Evaluación de amenazas volcánicas	42
5.8.1.	Recopilación de cartografía oficial de amenazas.....	42
5.8.2.	Análisis de amenaza por lahares	43
5.8.3.	Análisis de caída de ceniza volcánica.....	43
5.8.4.	Elaboración del mapa de exposición.....	45
5.9.	Identificación de amenazas y evaluación de la exposición.....	45
5.10.	Identificación de la amenaza por lahares y flujos piroclásticos.....	45
5.11.	Identificación de la amenaza por caída de ceniza	46
5.12.	Evaluación de la exposición.....	46
5.13.	Matriz de trazabilidad entre amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad	46
5.14.	Evaluación de vulnerabilidad de la obra de captación y el tanque sedimentador	

5.14.1.	Asignación de la calificación de los elementos de evaluación	51
5.14.2.	Técnicas e instrumentos de recopilación	52
5.14.3.	Ponderación de indicadores y dimensiones mediante el método AHP	52
5.14.4.	Organización de las dimensiones e indicadores	53
5.14.5.	Comparación de los indicadores por pares	53
5.14.6.	Valoración de los expertos.....	54
5.14.7.	Integración de los criterios de los expertos.....	55
5.14.8.	Obtención de los pesos de los indicadores.....	55
5.14.9.	Comprobación de la consistencia de las matrices.....	56
5.14.10.	Cálculo de la Razón de Consistencia	57
5.14.11.	Obtención del Índice de Condición ponderado.....	57
5.14.12.	Ponderación de las dimensiones	59
5.14.13.	Obtención del Índice de Condición global	59
5.14.14.	Conversión del Índice de Condición en vulnerabilidad.....	59
5.15.	Análisis de sensibilidad del resultado global	61
5.16.	La matriz de identificación de impactos	61
5.17.	Formulación de medidas de prevención y mitigación	62
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	63
6.1.	Resultados del objetivo 1	63
6.1.1.	Levantamiento topográfico del sistema	65
6.1.2.	Mapa Hidrológico	67
6.1.3.	Mapa de amenazas de lahares y flujos piroclásticos del volcán Cotopaxi ...	68
6.1.4.	Mapa de amenaza por caída de ceniza del volcán Cotopaxi.....	69
6.1.5.	Mapa de exposición volcánica en el sistema de captación de San Agustín de Callo.	70

6.2.	Resultados del objetivo 2.....	71
6.2.1.	Evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación.	71
6.2.2.	Evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación 73	
6.2.3.	Evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación	75
6.2.4.	Evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa de la obra de captación 76	
6.2.5.	Evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador	78
6.2.6.	Evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador 79	
6.2.7.	Evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador	81
6.2.8.	Evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador 82	
6.2.9.	Vulnerabilidad integral mediante AHP del sistema de captación.....	84
6.3.	Identificación y evaluación de los posibles impactos sobre la infraestructura y el servicio de agua potable.....	85
6.4.	Resultados del objetivo 3:.....	86
6.4.1.	Medidas de prevención	87
6.4.2.	Medidas de mitigación.....	90
6.4.3.	Vista general de los 3 resultados.....	94
7.	CONCLUSIONES.....	97
8.	RECOMENDACIONES	98
9.	REFERENCIAS.....	99
10.	ANEXOS.....	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista Flanco Norte del Volcán Cotopaxi[33]	28
Figura 2: Zona de influencia norte[34].....	28
Figura 3: Zona sur de influencia[34].	29
Figura 4: Zona oriental de influencia	29
Figura 5. Esquema metodológico	32
Figura 6. Reconocimiento del área de estudio.....	33
Figura 7. Diagrama del procesamiento del levantamiento topográfica	36
Figura 8: Diagrama de Análisis hidrológico del terreno y evaluación espacial de la exposición mediante superposición con cartografía oficial de amenazas	38
Figura 9. Plano topográfico de la zona de estudio.....	66
Figura 10: Mapa Hidrológico de la zona de estudio.....	68
Figura 11: Mapa de amenazas por lahares y flujos piroclásticos del volcán Cotopaxi.....	69
Figura 12: Mapa de amenazas por caída de ceniza del volcán Cotopaxi	70
Figura 13: Mapa de exposición espacial del sistema de captación ante amenazas volcánicas del Cotopaxi	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modalidad de Titulación	15
Tabla 2: Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	15
Tabla 3: Sistema de tareas	19
Tabla 4: Clases de gradiente de pendiente FAO (2006). Guía para la descripción de suelos (4. ^a ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. p. 12, Tabla 7. [1].....	39
Tabla 5: Parámetro morfométrico	41
Tabla 6: Cartografías oficial de amenazas.....	42
Tabla 7: Información cartográfica utilizada para la evaluación espacial de la exposición ante la amenaza por lahares	43
Tabla 8: Procedimiento metodológico para el análisis de amenaza por caída de ceniza volcánica	44
Tabla 9: Matriz de trazabilidad.....	47
Tabla 10: Escala aplicada	51
Tabla 11: Técnicas e instrumentos de recopilación.....	52
Tabla 12: Escala fundamental de Saaty utilizada en la investigación	54
Tabla 13: Rangos de interpretación del Índice de Condición.....	60
Tabla 14: Rangos de interpretación del nivel de vulnerabilidad	60
Tabla 15: Componentes inspeccionados del sistema.....	67
Tabla 16: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación mediante el método AHP.	71
Tabla 17: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad física de la obra de captación	72
Tabla 18: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación mediante el método AHP.....	73
Tabla 19: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación	74
Tabla 20: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación mediante el método AHP.	75
Tabla 21: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad ambiental de la obra de captación	76

Tabla 22:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad organizativa o administrativa de la obra de captación mediante el método AHP.	76
Tabla 23:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad organizacional o administrativa de la obra de captación.	78
Tabla 24:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador mediante el método AHP.	78
Tabla 25:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad física del tanque sedimentador	79
Tabla 26:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador mediante el método AHP.	80
Tabla 27:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador	80
Tabla 28:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador mediante el método AHP.	81
Tabla 29:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador	82
Tabla 30:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador mediante el método AHP.....	82
Tabla 31:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador	83
Tabla 32:Identificación de impactos amenaza, infraestructura y servicio	85
Tabla 33:Medidas de prevención propuestas	88
Tabla 34: Medidas de mitigación propuestas	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 35:Escala del Índice de Condición (IC)	109
Tabla 36:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores físicos de la obra de captación.	110
Tabla 37:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores funcionales u operativos de la obra de captación.	112
Tabla 38:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores ambientales de la obra de captación.	114
Tabla 39:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores organizativos o administrativos de la obra de captación.	116

Tabla 40:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores físicos del tanque sedimentador	119
Tabla 41:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores funcionales u operativos del tanque sedimentador.....	122
Tabla 42:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores ambientales del tanque sedimentador.	124
Tabla 43:Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores organizativos o administrativos del tanque sedimentador.....	126
Tabla 44:Resultados del cálculo de ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obra de captación.	129
Tabla 45:Resultados del cálculo de ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para el tanque sedimentador.	131
Tabla 46:Análisis de sensibilidad del Índice de Condición global del sistema de captación ante variaciones en la ponderación entre componentes	158
Tabla 47:Análisis de sensibilidad del IC global y nivel de vulnerabilidad del sistema de captación	158

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Entrevista al responsable del sistema de agua potable	106
ANEXO 2: Escala de referencia (IC y Vulnerabilidad)	109
ANEXO 3: Matrices de comparación por pares (AHP) elaboradas por los tres expertos para la evaluación de la vulnerabilidad de la obra de captación y del tanque sedimentador.....	110
ANEXO 4: Ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obra de captación.	129
ANEXO 5: Ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para el tanque sedimentador.	131
ANEXO 6: Matrices de la obra de captación	133
ANEXO 7: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación.	133
ANEXO 8: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación	135
ANEXO 9: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación.	137
ANEXO 10: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional de la obra de captación.	139
ANEXO 11: Matrices del tanque sedimentador	143
ANEXO 12: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador. .	143
ANEXO 13: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador.	146
ANEXO 14: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador.	149
ANEXO 15: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional del tanque sedimentador.	151
ANEXO 16: Resultado del cálculo AHP integral de la vulnerabilidad del sistema de captación	155
ANEXO 17: Mapa de pendientes del terreno en el área de influencia del sistema de captación de San Agustín de Callo.....	159

ANEXO 18: Fotografías de verificación de la matriz vulnerabilidad física de la obra de captación	159
ANEXO 19: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Funcional de la obra de captación	161
ANEXO 20: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Ambiental de la obra de captación	162
ANEXO 21: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Física del tanque sedimentador	164
ANEXO 22: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Funcional u Operativa del tanque sedimentador	167
ANEXO 23: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Ambiental	169

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS DE VERIFICACIÓN DE LAS MATRICES

Fotografía 1:Presenta desprendimiento del material	159
Fotografía 2:Los muros mantienen su verticalidad y alineamiento original y alineamiento original	160
Fotografía 3:Sin presencia de fisuras hay un leve desgaste del material en la caja de recolección	160
Fotografía 4:No hay pérdidas del caudal y hay una leve infiltración en las paredes en la caja de recolección	160
Fotografía 5:Maleza y zona de desgaste y erosión leve en el canal (acequia)	161
Fotografía 6:Se observa el caudal que ingresa sin obstrucciones a la obra de captación.	161
Fotografía 7:El caudal mantiene continuidad en condiciones normales	161
Fotografía 8:La caja de recolección no presenta perdidas del caudal	162
Fotografía 9:Tubería enterrada en esta sección de la caja de recolección.....	162
Fotografía 10:Presencia de cobertura vegetal abundante alrededor de la obra de captación, que favorece la protección del suelo.	162
Fotografía 11:Muros de ala tapados por vegetación y no existe ninguna obra de drenaje	163
Fotografía 12:Vegetación abundante, no dispone de una área de protección	163
Fotografía 13:Presencia de actividades ganadería y pastoreo	163
Fotografía 14:No se presenta fisuras tampoco grietas.....	164
Fotografía 15:Muros estables, presenta desprendimiento del concreto.....	164
Fotografía 16:Presencia de humedad en el tanque	164
Fotografía 17:Presencia desgaste por los años y no se presenta fisuras.....	165
Fotografía 18:Tubería en buen estado	165
Fotografía 19:Abre y cierra con dificultad	165
Fotografía 20:Corrosión por humedad en las compuertas.....	166
Fotografía 21:Tubería en buen estado, pero con sedimentos	166
Fotografía 22:No dispone de cubierta, no cuenta con cerramiento	166
Fotografía 23:No presenta fallas estructurales en el tanque sedimentador	166
Fotografía 24:El caudal tiene leves sedimentos y no presenta obstrucciones	167

Fotografía 25:El caudal puede regularse adecuadamente	167
Fotografía 26:El tanque sí retiene sedimentos.....	168
Fotografía 27:El nivel de agua puede manejarse correctamente	168
Fotografía 28:El agua sedimentada si sale correctamente.....	168
Fotografía 29:El tanque mantiene su funcionamiento.....	169
Fotografía 30:El tanque continúa operando con incremento de sedimentos y vegetación acuática	169
Fotografía 31:Vegetación abundante alrededor del tanque sedimentador	169
Fotografía 32:El terreno no presenta procesos erosivos.....	169
Fotografía 33:Actividad agrícola y ganadera	170
Fotografía 34:Exceso de vegetación en el tanque sedimentador.....	170

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Evaluación semicuantitativa de la vulnerabilidad del sistema de captación que abastece al Cantón Saquisilí, ubicado en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga, ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi.

Modalidad de Titulación:

Tabla 1: Modalidad de Titulación

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Proyecto de investigación	Informe de proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

- Alison Fernanda Aguaisa Cando
- Steven Alexander Barahona Tonato

Tutor de Titulación: Ing. Mariella Fernanda Zambrano Valverde, Mgs.

Área de Conocimiento:

Tabla 2: Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

33 Ciencias Tecnológicas	3308 Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente	3308.01 Control de la Contaminación Atmosférica
		3308.04 Ingeniería de la Contaminación
		3308.11 Control de la Contaminación del Agua

Línea de investigación: Meteorología, Hidrología, Mecánica de fluidos, Sistema y obras hidráulicas.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Gestión y manejo sostenible y/o sustentable del recurso hídrico.

2. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso necesario para el desarrollo de las actividades de la población, por lo que mantener en funcionamiento la infraestructura encargada de su abastecimiento es fundamental. Dentro de estos sistemas, las obras de captación permiten incorporar el recurso hídrico al sistema y, por su ubicación, están condicionadas por las características del terreno y del entorno. La presencia de amenazas naturales puede afectar estas estructuras y dificultar la continuidad del servicio[1][2].

En Ecuador, esta situación tiene particular importancia debido a la presencia de varios volcanes activos. El país forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico y, por sus características geológicas, algunas zonas e infraestructuras se encuentran expuestas a fenómenos relacionados con la actividad volcánica[2][3]. Entre estos fenómenos se encuentran los lahares y la caída de ceniza, cuyos efectos pueden variar de acuerdo con la ubicación y las condiciones de cada infraestructura.

El volcán Cotopaxi representa una de las principales amenazas volcánicas para las poblaciones ubicadas en su zona de influencia. Su historial eruptivo, la presencia de nieve y hielo en su parte superior y las características del terreno favorecen la formación de lahares durante determinados eventos eruptivos. Se estima que más de 300.000 personas podrían encontrarse en zonas susceptibles a este fenómeno. La caída de ceniza también podría extenderse hacia diferentes sectores de la Sierra y la Costa del Ecuador[4].

En la zona de San Agustín de Callo, perteneciente a la parroquia Mulaló del cantón Latacunga, se encuentra el sistema de captación que contribuye al abastecimiento de agua potable del cantón Saquisilí. Para esta investigación se consideran principalmente dos componentes: la obra de captación y el tanque sedimentador. Debido a su ubicación, ambos elementos pueden estar expuestos a los efectos de una eventual erupción del volcán Cotopaxi, especialmente frente a lahares y caída de ceniza[5].

La Vertiente de la Virgen registra un caudal de 34,43 L/s, que representa el 66,28 % del caudal concesionado total, por lo que constituye una fuente importante para el abastecimiento del cantón Saquisilí[6]. En el caso de un lahar, los muros de ala y la caja de dirección de la captación podrían quedar expuestos al ingreso de lodo, sedimentos y material transportado. La acumulación de estos materiales podría generar obstrucciones y dificultar el funcionamiento de la captación[7].

El tanque sedimentador presenta una condición diferente, debido a que no dispone de una cubierta que limite el ingreso de materiales desde el exterior. En una eventual caída de ceniza, las partículas podrían ingresar al tanque y acumularse en su interior, lo que podría aumentar las actividades de limpieza y mantenimiento necesarias para su operación[8]. En este estudio se considera esta condición como parte de la evaluación de vulnerabilidad, sin determinar los posibles cambios que la ceniza podría producir en la calidad del agua.

La infraestructura fue construida considerando una vida útil de 30 años. Sin embargo, no se cuenta con información técnica suficiente para comprobar los criterios empleados en su diseño y construcción, ni con una evaluación previa de su vulnerabilidad frente a las amenazas volcánicas consideradas. Por esta razón, se analizan las condiciones actuales de la obra de captación y del tanque sedimentador, tomando en cuenta aspectos físicos, funcionales, administrativos y ambientales[9].

Finalmente, se identifican de forma cualitativa los posibles mecanismos de afectación asociados a los lahares y la caída de ceniza, utilizando la información técnica disponible, las observaciones realizadas durante las inspecciones de campo y los antecedentes sobre la actividad del volcán Cotopaxi[10]. El estudio no incluye una modelación para determinar la pérdida de capacidad hidráulica, la reducción del caudal, el tiempo de interrupción del servicio, la profundidad o velocidad de un lahar, la carga estructural ocasionada por la ceniza ni la probabilidad de falla de la infraestructura.

2.1. Situación Problemática

La Municipalidad del Cantón Saquisilí tiene derecho al uso y aprovechamiento del agua proveniente de la Vertiente de la Virgen, ubicada en San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga. Mediante la resolución emitida por la entonces Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), se concedió un caudal de 34,43 L/s para el abastecimiento de agua destinada al consumo humano del cantón Saquisilí. El sistema de captación se encuentra en los drenajes de la propiedad de la Hacienda San Agustín de Callo y constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable del cantón.

De acuerdo con el Informe Técnico N.º IT-GADMICS-DSP-02-2025, el sistema abastece a 14.760 habitantes, cuenta con 2.949 conexiones o usuarios, alcanzando un porcentaje real de abastecimiento del 100,1 %, con información correspondiente al año base 2025 [6].

El sistema se encuentra en una zona donde existe exposición frente a amenazas asociadas a una eventual erupción del volcán Cotopaxi. Para esta investigación se consideran los lahares y la caída de ceniza como amenazas principales. La exposición se determina considerando la ubicación de la obra de captación y del tanque sedimentador y las condiciones de su entorno. Posteriormente, la vulnerabilidad se evalúa mediante las dimensiones física, funcional, ambiental y administrativa, utilizando una metodología semicuantitativa.

Los posibles mecanismos mediante los cuales estas amenazas podrían afectar los componentes se analizan de forma cualitativa. Esto permite relacionar las condiciones de exposición con las características de la infraestructura, sin atribuir al estudio una capacidad de predicción sobre la magnitud o duración de una futura erupción.

2.2. Formulación del problema

¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad del sistema de captación en San Agustín de Callo y cuáles son sus mecanismos de afectación ante lahares y caída de ceniza por una erupción del volcán Cotopaxi?

2.3. Objeto y Campo de Acción

2.3.1. Objeto de la investigación

Evaluación del nivel de vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica ante una erupción volcánica.

2.3.2. Campo de acción

El campo de acción del estudio corresponde al **3308** Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente

2.4. Beneficiarios

2.4.1. Directo

- ❖ Los 2.949 usuarios y 14.760 habitantes del cantón Saquisilí abastecidos por el sistema de captación de San Agustín de Callo.
- ❖ El GAD Municipal del Cantón Saquisilí.

2.4.2. Indirecto

- ❖ Comunidad Científica y Académica
- ❖ Comunidades aledañas y gobiernos locales de la Provincia de Cotopaxi.

2.5. Justificación

La evaluación de la vulnerabilidad del sistema de captación de agua de San Agustín de Callo es importante debido a su aporte al abastecimiento de agua potable del cantón Saquisilí y a su ubicación en una zona expuesta a una posible erupción del volcán Cotopaxi. Según el Informe Técnico N.º IT-GADMICS-DSP-02-2025, la Vertiente de la Virgen representa el 66,28 % del

caudal concesionado total, por lo que su funcionamiento es fundamental para garantizar el suministro de agua a la población [6].

Una eventual erupción podría provocar caída de ceniza, lahares y otros fenómenos que afectarían las obras de captación, la calidad del agua y la continuidad del servicio. Por ello, esta evaluación permitirá identificar los componentes más vulnerables y determinar los posibles impactos sobre el sistema.

La información obtenida constituirá una herramienta técnica para apoyar la planificación y la toma de decisiones del GAD Municipal Intercultural del Cantón Saquisilí y de las entidades responsables de la gestión del recurso hídrico, favoreciendo la implementación de medidas de prevención, mitigación y respuesta ante una eventual emergencia volcánica. De esta manera, la investigación contribuirá a fortalecer la resiliencia del sistema de abastecimiento y a garantizar un servicio de agua potable más seguro y confiable para la población del cantón Saquisilí.

2.6. Objetivos

2.6.1. General

- Evaluar integralmente la vulnerabilidad del sistema existente de captación de agua ubicado en San Agustín de Callo frente a las amenazas asociadas a una eventual erupción del volcán Cotopaxi, con el fin de identificar los componentes más vulnerables y proponer medidas de prevención y mitigación que contribuyan a mantener su operatividad.

2.6.2. Específicos

- Caracterizar los componentes y las condiciones del entorno del sistema de captación de agua en San Agustín de Callo, para posteriormente analizar las amenazas asociadas a los lahares y la caída de ceniza por una posible erupción del volcán Cotopaxi.
- Identificar y evaluar los posibles impactos hacia la infraestructura existente que podrían afectar al servicio de agua
- Formular medidas orientadas a la prevención y mitigación de la vulnerabilidad del sistema de captación de agua, con base en los resultados de la evaluación realizada, para contribuir a mantener su operatividad durante y después de un evento eruptivo del volcán Cotopaxi

2.7. Sistemas de Tareas

Tabla 3:Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividad (Tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Caracterizar los componentes y las condiciones del entorno del sistema de captación de agua en San Agustín de Callo, para posteriormente analizar las amenazas asociadas a los lahares y la caída de ceniza por una posible erupción del volcán Cotopaxi.	Realizar el reconocimiento del área de estudio y recopilar la información técnica disponible sobre los componentes del sistema.	Información técnica recopilada e identificación de los componentes y condiciones generales del sistema.	Revisión documental, observación directa, inspección de campo, entrevista, registro fotográfico y libreta de campo.
	Realizar el levantamiento y procesamiento de la información topográfica de los componentes del sistema y del área de influencia.	Plano topográfico, coordenadas georreferenciadas, curvas de nivel y Modelo Digital del Terreno (MDT).	Receptor GNSS, estación total, prisma, jalones, trípode, AutoCAD.
Identificar y evaluar los posibles impactos hacia la infraestructura existente que podrían afectar al servicio de agua	Analizar las condiciones geomorfológicas e hidrológicas del terreno y realizar la evaluación espacial de las amenazas y exposición del sistema.	Identificación de las condiciones de exposición del sistema frente a los lahares y la caída de ceniza y reconocimiento de sus posibles mecanismos de afectación.	DEM, cartografía oficial, QGIS, análisis espacial, análisis hidrológico y geomorfológico.

	Evaluar la vulnerabilidad física, funcional, ambiental y administrativa mediante matrices de evaluación y el método AHP.	Determinación del Índice de Condición y nivel de vulnerabilidad de la obra de captación, tanque sedimentador y sistema evaluado, e identificación y evaluación de los posibles impactos sobre la infraestructura y el servicio de agua potable.	Inspección de campo, matrices de vulnerabilidad, matrices de comparación por pares, valoración de expertos, método AHP, matriz de impactos y hojas de cálculo.
Formular medidas de prevención y mitigación orientadas a reducir la vulnerabilidad del sistema de captación de agua y contribuir a mantener su operatividad durante y después de una eventual erupción del volcán Cotopaxi.	Analizar los resultados de la evaluación de vulnerabilidad y condiciones críticas de los componentes del sistema.	Identificación de los principales factores que requieren acciones de prevención y mitigación.	Análisis de resultados, matrices de vulnerabilidad y observación de campo.
	Formular medidas de prevención y mitigación con base en los resultados obtenidos y la revisión de información técnica y científica.	Propuesta de medidas de prevención y mitigación para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la operatividad del sistema.	Revisión bibliográfica y documental, análisis de resultados y criterios técnicos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Fuente de abastecimiento

El agua es un recurso natural presente en el planeta que los seres vivos pueden utilizar; en el caso de las personas, resulta imprescindible para cubrir necesidades básicas como la alimentación, la higiene y el consumo diario[11].

Dentro de todo sistema de agua potable, la fuente de abastecimiento representa el componente más crítico, motivo por el cual requiere niveles adecuados de seguridad y protección [12].

3.1.1. Concepto de captación de agua

Se entiende por captación al conjunto de obras y mecanismos —ya sea a nivel superficial o subterráneo— contruidos con el fin de recolectar agua proveniente de fuentes naturales [12].

Existen distintos tipos:

3.1.2. Superficial

Se denomina agua superficial a aquella que se mantiene en contacto directo con la atmósfera, es decir, que resulta visible y no se encuentra bajo tierra. Este tipo de agua se nutre de la escorrentía de lluvias, manantiales y otras fuentes similares, y cuando cuenta con una salida, termina desembocando en cuerpos de agua de mayor tamaño, como ríos que llegan al océano[13].

3.1.3. Subterránea

En este caso, parte del agua de lluvia que cae sobre las cuencas se infiltra en el suelo hasta alcanzar la zona de saturación, dando origen a las aguas subterráneas. La posibilidad de aprovechar estas reservas está condicionada por las características hidrológicas y geológicas del acuífero correspondiente.

3.1.4. Componentes del sistema de captación superficial

Un sistema de este tipo integra una estructura hidráulica encargada de recolectar, regular y transportar el agua desde su fuente original hasta un tanque de almacenamiento[14].

3.1.5. Captación superficial

Corresponde al aprovechamiento del agua proveniente de ríos, lagos o embalses, mediante estructuras que pueden operar por gravedad, según la topografía del terreno, o a través de bombeo, siempre con el objetivo de garantizar un abastecimiento confiable[15]. Sus principales componentes son los siguientes:

3.1.6. Bocatoma

Es la estructura destinada a captar total o parcialmente el agua de un río, lago o canal, con fines tan diversos como el riego, el abastecimiento de agua potable o la generación eléctrica[16].

Actualmente está conformada por los siguientes elementos:

3.1.7. Muros de ala

Conocidos también como muros de encauzamiento, tienen la función de guiar y proteger el ingreso del agua hacia la caja de dirección, evitando además la erosión de los bordes del canal[17]. Su ancho depende de la estabilidad estructural del sector, y normalmente se disponen formando un ángulo de entre 45° y 60° respecto al centro del río, lo que permite conducir el flujo sin generar turbulencias abruptas[17].

3.1.8. Compuerta de regulación

Se trata de un componente clave del sistema hidráulico, ya que permite controlar y limitar el paso del agua desde el río, embalse o riachuelo hacia la caja de dirección, ajustando el caudal captado según las condiciones de la fuente. Debe fabricarse con materiales resistentes a la corrosión y a la presión del agua, y su accionamiento debe realizarse mediante un mecanismo simple de operar[18].

3.1.9. Caja de dirección

Se instala en los puntos donde es necesario cambiar la orientación del flujo hacia la línea de conducción. Generalmente construida en hormigón armado o mampostería, esta estructura absorbe los esfuerzos originados por los cambios de dirección del agua y, al mismo tiempo, protege los accesorios internos, facilitando su mantenimiento[19].

3.1.10. Línea de conducción

Está formada por un conjunto de tuberías y accesorios cuya función es trasladar el agua desde la fuente hasta los tanques de almacenamiento o distribución[20].

3.1.11. Tanque de almacenamiento

Estructura hidráulica que regula la presión y almacena el volumen necesario para cubrir las variaciones en el consumo de agua potable de la población. Constituye uno de los elementos esenciales para asegurar un abastecimiento continuo hacia las redes de distribución. En zonas urbanas, el agua suele pasar antes por procesos de desinfección en una planta de tratamiento; en zonas rurales, en cambio, el agua captada llega directamente al tanque de almacenamiento antes de ser distribuida a la población[21].

3.2. Gestión del riesgo de desastre

3.3. **Amenaza**

Corresponde a cualquier proceso, fenómeno o actividad de origen humano capaz de generar pérdida de vidas, lesiones, afectaciones a la salud, daños materiales, alteraciones sociales y económicas, o perjuicios ambientales[22].

3.4. **Vulnerabilidad**

Conjunto de condiciones generadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que incrementan la probabilidad de que una persona, comunidad, bien o sistema sufra los efectos negativos de una amenaza[23]. Tipos de vulnerabilidad:

3.4.1. **Vulnerabilidad física**

Hace referencia al nivel de exposición de una estructura a sufrir daños, considerando aspectos como los materiales empleados en su construcción, la calidad de la obra, su estado de conservación actual y su capacidad de resistencia[24].

3.4.2. **Vulnerabilidad operativa**

Se refiere a la disminución o pérdida de la capacidad de un sistema, infraestructura o servicio para cumplir con sus funciones habituales como consecuencia de un evento adverso.

3.4.3. **Vulnerabilidad organizativa**

Permite evaluar la capacidad institucional, empresarial o administrativa de una comunidad en función de su nivel de organización, experiencia y recursos disponibles. En muchos casos, la falta de preparación y capacitación institucional convierte a este factor en uno de los puntos más débiles frente a una amenaza[25].

3.4.4. **Vulnerabilidad ambiental**

Describe la relación entre las personas y su entorno natural. Por un lado, ciertos ambientes pueden representar riesgos climáticos o naturales para la población; por otro, los propios ecosistemas se ven afectados por la actividad humana, lo que deteriora la calidad del agua, del aire y del suelo[25].

3.4.5. **Riesgo**

Según la UNDRR, se define como la probabilidad de pérdida de vidas humanas, lesiones o destrucción de bienes que puede afectar a un sistema, sociedad o comunidad en un periodo determinado, calculada en función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta existente[26].

3.4.6. **Amenaza natural**

Constituye un peligro latente vinculado a procesos geológicos, geomorfológicos, climáticos u oceanográficos, es decir, fenómenos de origen natural como sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, tormentas tropicales o crecidas fluviales inusuales[27].

3.4.7. **Amenaza volcánica**

Representa la probabilidad de que un volcán entre en un proceso eruptivo capaz de afectar determinada zona. Esta amenaza se manifiesta a través de distintos peligros volcánicos[28], entre ellos la caída de ceniza, los lahares, los flujos de lava, las corrientes piroclásticas y las avalanchas de escombros. El alcance de cada uno depende principalmente de si el material es expulsado hacia la atmósfera o si forma flujos que se desplazan sobre la superficie del terreno alejándose del volcán[29].

3.5. **Erupción volcánica**

Consiste en la salida de magma —roca fundida a altísimas temperaturas— desde el interior de la Tierra hacia la superficie [30]. La periodicidad de estos eventos varía enormemente: algunos volcanes entran en erupción de forma casi continua, mientras que otros permanecen inactivos durante miles de años[31].

Existen dos tipos principales de erupciones:

Erupciones explosivas

Ocurren cuando el gas contenido en las rocas fundidas se libera y expande rápidamente al acercarse a la superficie[31].

Erupciones efusivas

En este caso, el principal peligro no proviene de explosiones, sino del desplazamiento de materiales, que puede variar en tipo (lodo, ceniza o lava) y en volumen[32]. Productos volcánicos

3.5.1. **Caída de ceniza**

Pese a su nombre, la ceniza volcánica es en realidad roca finamente pulverizada. Una capa de apenas una pulgada puede pesar diez libras por pie cuadrado al depositarse, y frecuentemente contiene fragmentos de piedra pómez o escoria volcánica. Se caracteriza por ser áspera, ácida, arenosa, de textura vidriosa y con un olor desagradable[3].

3.5.2. **Flujos piroclásticos**

Son nubes ardientes formadas por ceniza, material piroclásticos y aire caliente, que descienden a gran velocidad por las laderas del volcán generando avalanchas densas y pesadas[32].

3.5.3. **Lahares**

Corresponden a una mezcla de agua, lodo, arena y bloques de roca que se desplaza velozmente por las laderas volcánicas. Se originan cuando el material incandescente entra en contacto con masas de hielo o glaciares, generando flujos que descienden por quebradas y drenajes, pudiendo recorrer distancias de varios cientos de kilómetros desde el volcán.

3.5.4. Gases volcánicos

Antes, durante y después de una erupción, los volcanes liberan grandes cantidades de gases, principalmente vapor de agua, junto con concentraciones variables de dióxido de carbono, dióxido de azufre, hidróxido de azufre, entre otros[5].

3.6. Historial eruptivo relevante

Desde la época de la conquista española, el volcán Cotopaxi ha atravesado cinco grandes periodos eruptivos: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880. En todos los casos se registraron fenómenos volcánicos de alta peligrosidad, y existe consenso científico en que episodios similares podrían repetirse en las próximas décadas. Los últimos cuatro periodos eruptivos generaron pérdidas socioeconómicas considerables para Ecuador.

El principal peligro del Cotopaxi radica en su capacidad de generar grandes lahares que descenderían por drenajes cercanos a zonas densamente pobladas, como el Valle Interandino entre Mulaló y Latacunga, así como parte del valle de los Chillos. Se calcula que actualmente más de 300.000 personas habitan en zonas expuestas a este riesgo, en caso de repetirse erupciones similares a las de los siglos XVIII y XIX.

A partir de 2015, el volcán mostró señales de actividad anómala —mayor deformación, sismicidad y emisión de gases—, lo que derivó en una erupción entre agosto y noviembre de ese año. Aunque de baja magnitud (VEI 1), la caída de ceniza afectó de forma importante las actividades agrícolas y turísticas de la provincia.

Posteriormente, desde octubre de 2022 hasta julio de 2023, se registró un nuevo periodo eruptivo, con emisiones de gas y ceniza de menor intensidad que en 2015, aunque de mayor duración. Este episodio motivó el refuerzo del monitoreo y la actualización de los planes de emergencia[4].

Actualmente, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional mantiene informes especiales sobre la actividad del volcán. Desde noviembre de 2024 se han detectado pequeñas anomalías en parámetros como gases, sismicidad y deformación, que se intensificaron a partir de agosto de 2025 tras un enjambre sísmico registrado cerca del volcán Sincholagua. Estas señales

sugieren una intrusión magmática pequeña y profunda. Desde marzo de 2026 se observa un aumento de eventos sísmicos de largo periodo, lo cual indicaría movilización de fluidos en el sistema volcánico, aunque la baja energía de estos eventos apunta a un proceso de escala reducida. No se han detectado patrones de aceleración en la deformación ni señales claras de presurización significativa, por lo que, según los parámetros monitoreados, no existen indicios de una evolución hacia una erupción en el corto plazo.

3.7. Ubicación geográfica del volcán Cotopaxi

El Cotopaxi es un estratovolcán activo ubicado en la cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos, a 60 km al sureste de Quito y 45 km al norte de Latacunga. Se trata de un volcán de alto riesgo, cubierto de glaciares en su parte superior y rodeado por vegetación de páramo en sus laderas bajas, mientras que en las zonas más altas la vegetación es casi inexistente y predominan extensos arenales[33].

- **Altitud**

Alcanza una altura de 5.897 metros sobre el nivel del mar, con una base de 16 x 19 km y un relieve de 3.000 metros. Sus flancos superiores presentan pendientes de entre 30° y 35°, como se observa en la vista del flanco norte del volcán (**Figura 1**)[33].



Figura 1: Vista Flanco Norte del Volcán Cotopaxi[33]

Zonas de influencia

El Cotopaxi ejerce influencia sobre tres zonas: norte, sur y oriente.

Zona norte: al pie del flanco norte se extiende la llanura de Limpiopungo, caracterizada por pendientes suaves y cauces amplios, pero poco profundos. Estas condiciones morfológicas facilitan el desbordamiento de posibles lahares hacia los ríos El Salto, Pita, Santa Clara y San Pedro[34]. **(Figura 2)**

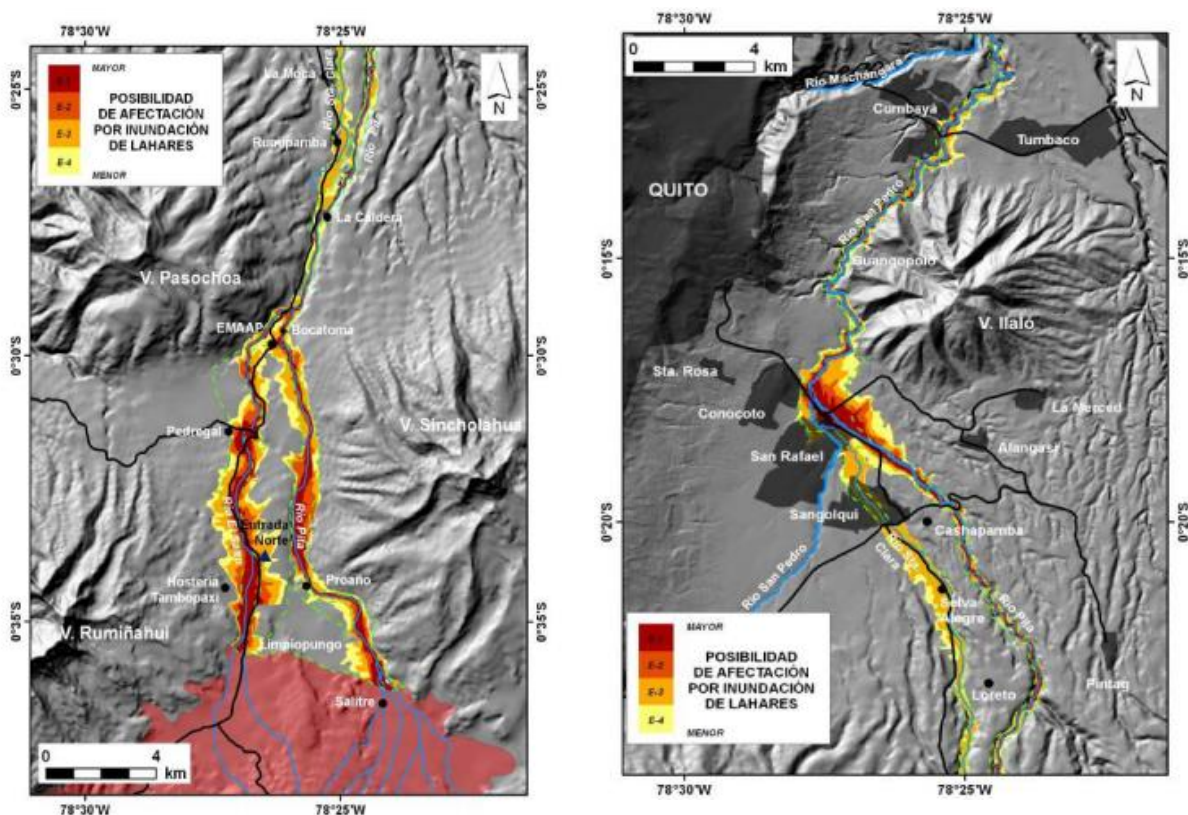


Figura 2: Zona de influencia norte[34].

Zona sur: las quebradas Cutuchi y Pucahuaycu presentan cauces estrechos y profundos hasta su punto de confluencia, cerca de San Agustín de Callo. A partir de ahí, los cauces se ensanchan y atraviesan una amplia llanura que va desde el Cerro de Callo hasta Latacunga, generando también inundaciones menores a lo largo de los ríos Cutuchi y Saquimala. El río Alagues, por su parte, discurre por profundos cañones formados por antiguos depósitos volcánicos del Cotopaxi[34]. **(Figura 3)**

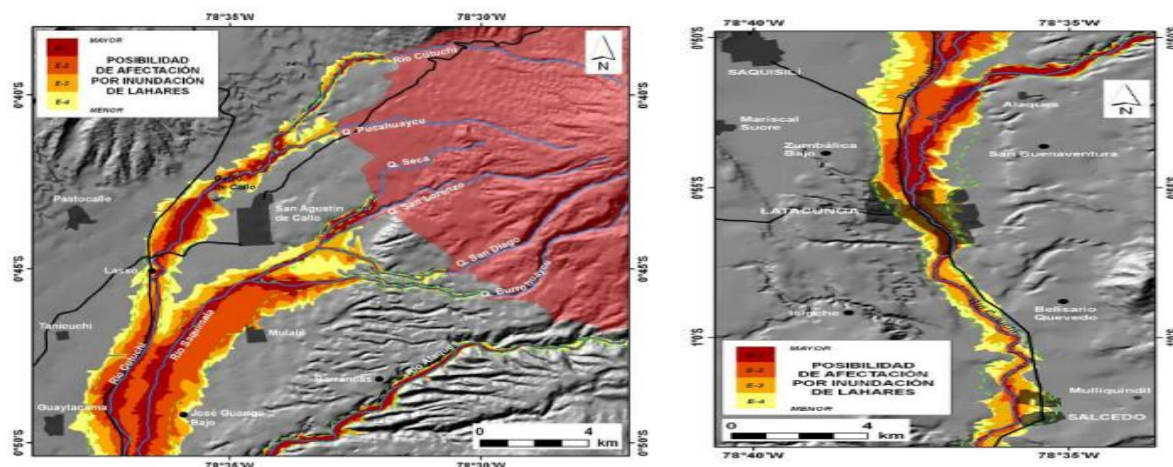


Figura 3: Zona sur de influencia[34].

Zona oriental: al pie oriental del volcán se extiende una gran planicie por donde transitarían los flujos laháricos. Aunque no existen poblaciones significativas en esta zona, algunas haciendas podrían verse gravemente afectadas. Los principales drenajes en este sector son los ríos Tambo, Tamboyaku, Verde, Jatunyaku y Napo[34]. **(Figura 4)**

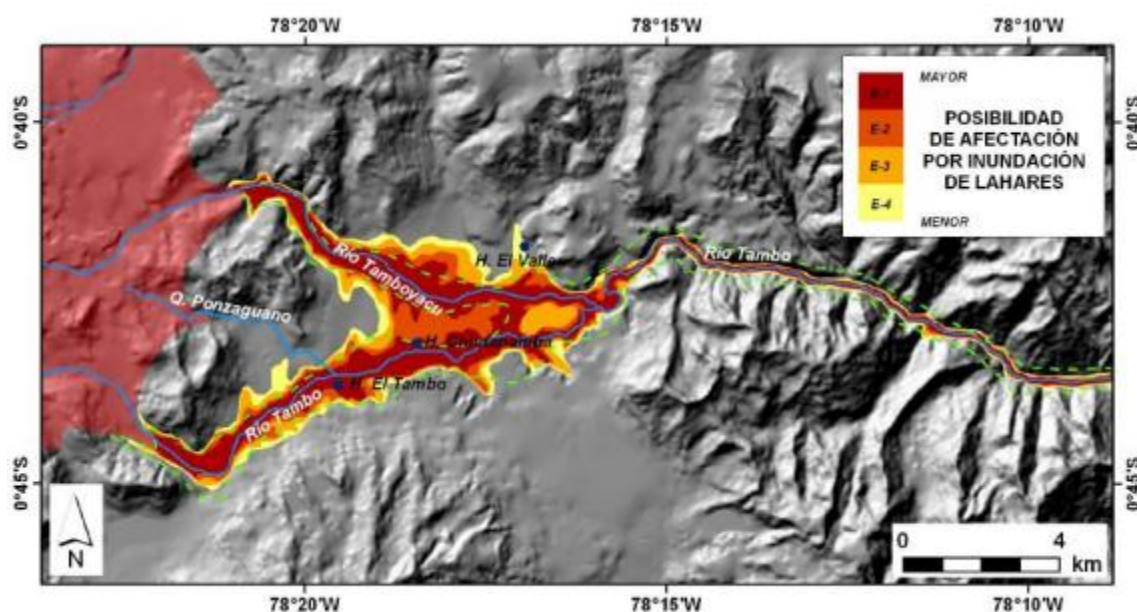


Figura 4: Zona oriental de influencia

Estilos eruptivos del Cotopaxi

El volcán presenta cuatro escenarios eruptivos posibles. El primero, con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 1-2, incluye erupciones leves de tipo estromboliano hasta otras más intensas

de tipo vulcaniano, capaces de generar lahares secundarios. El segundo escenario (VEI 2-3) presenta explosiones de menor intensidad, asociadas a una desgasefacción gradual del magma. El tercer escenario (VEI 3-4) corresponde a erupciones moderadas a grandes, con columnas de ceniza de hasta 20 km de altura y lahares de gran magnitud provocados por el derretimiento del glaciar debido a los flujos piroclásticos. Finalmente, se registra un evento histórico de VEI 4 ocurrido hace aproximadamente 1000 años, que produjo enormes columnas de ceniza —más de 20 km³ de material— debido al colapso de la columna eruptiva, además de la caída regional de pómez y escoria[35].

3.8. Plan de mitigación

Consiste en el conjunto de acciones orientadas a reducir o minimizar los efectos negativos de una amenaza. Si bien un evento natural no puede prevenirse por completo ni predecirse con exactitud, su impacto y magnitud sí pueden atenuarse mediante estrategias adecuadas[36].

3.9. Plan de medidas o intervención

Reúne los protocolos y estrategias diseñados para prevenir, mitigar y responder ante situaciones de desastre[37].

La gestión del riesgo de desastres abarca tres ejes fundamentales: la gestión prospectiva, orientada a prevenir nuevos riesgos mediante una adecuada planificación territorial; la correctiva, centrada en mitigar vulnerabilidades existentes en la infraestructura actual; y la compensatoria o residual, enfocada en la respuesta, resiliencia y mecanismos financieros ante eventos inevitables[38].. Asimismo, estos enfoques se complementan con la gestión comunitaria y el reconocimiento de los saberes ancestrales de los pueblos locales, garantizando una participación activa en el territorio[38]... Por ello, los planes de gestión del riesgo deben alinearse con marcos internacionales como Sendai 2015-2030 e integrarse a los instrumentos de desarrollo local, adaptándose a las condiciones geográficas específicas del área de estudio con responsables y recursos definidos[38]..

4. HIPOTESIS

Las amenazas asociadas a los lahares y la caída de ceniza por una eventual erupción del volcán Cotopaxi pueden afectar las condiciones de vulnerabilidad del sistema de captación de agua en San Agustín de Callo y comprometer la continuidad y operatividad del servicio que abastece al cantón Saquisilí.

5. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

5.1. Enfoque de la investigación

La evaluación se desarrolló mediante matrices de vulnerabilidad adaptadas de COSUDE (2013) [25] y OPS/OMS (2004) [31], considerando las características del sistema estudiado. Los indicadores fueron valorados en una escala ordinal de 1 a 5, desde Muy malo hasta Muy bueno, tomando como referencia criterios técnicos de CENEPRED [39] y ARCA[40] . Posteriormente, se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para establecer las ponderaciones de los indicadores y dimensiones según su importancia relativa. Con estos valores se calcularon los índices de condición y el nivel de vulnerabilidad de los componentes evaluados.

Como parte del procedimiento, se utilizó una matriz de trazabilidad para diferenciar amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad, evitando considerar una misma condición en más de una dimensión. Los resultados permitieron identificar las principales condiciones que podrían afectar el funcionamiento de la infraestructura y, por tanto, el servicio de agua potable, sirviendo como base para plantear medidas de prevención y mitigación.

Finalmente, los resultados de las matrices y las ponderaciones AHP permitieron determinar los índices de condición y el nivel de vulnerabilidad de la obra de captación y del tanque sedimentador. Exclusivamente para el sistema de captación, se realizó un análisis de sensibilidad mediante diferentes escenarios de ponderación entre ambos componentes, con el propósito de comprobar si modificaciones razonables en los pesos alteraban de manera significativa el IC global o el nivel de vulnerabilidad obtenido.

5.2. Diseño de la investigación

La investigación corresponde a un estudio de caso con diseño no experimental, transversal y de carácter descriptivo-evaluativo. No es experimental debido a que las condiciones físicas, funcionales, ambientales y administrativas del sistema fueron observadas y evaluadas sin manipular deliberadamente las variables ni modificar el funcionamiento de la infraestructura.

El estudio es transversal debido a que la recopilación de información de campo se realizó durante el período establecido para la investigación, permitiendo caracterizar las condiciones existentes de la obra de captación y del tanque sedimentador al momento de la evaluación, sin efectuar un seguimiento temporal de su comportamiento.

Asimismo, corresponde a un estudio descriptivo-evaluativo porque se caracterizan las condiciones actuales de los componentes del sistema y posteriormente se determina su nivel de vulnerabilidad mediante una metodología semicuantitativa multicriterio basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

El alcance de la investigación permite identificar mecanismos potenciales de afectación asociados a las amenazas volcánicas mediante inspección técnica y superposición cartográfica con información oficial. No contempla la modelación hidráulica de lahares, la cuantificación del espesor o carga de ceniza, ni la determinación probabilística de falla estructural o hidráulica.

5.3. Esquema Metodológico

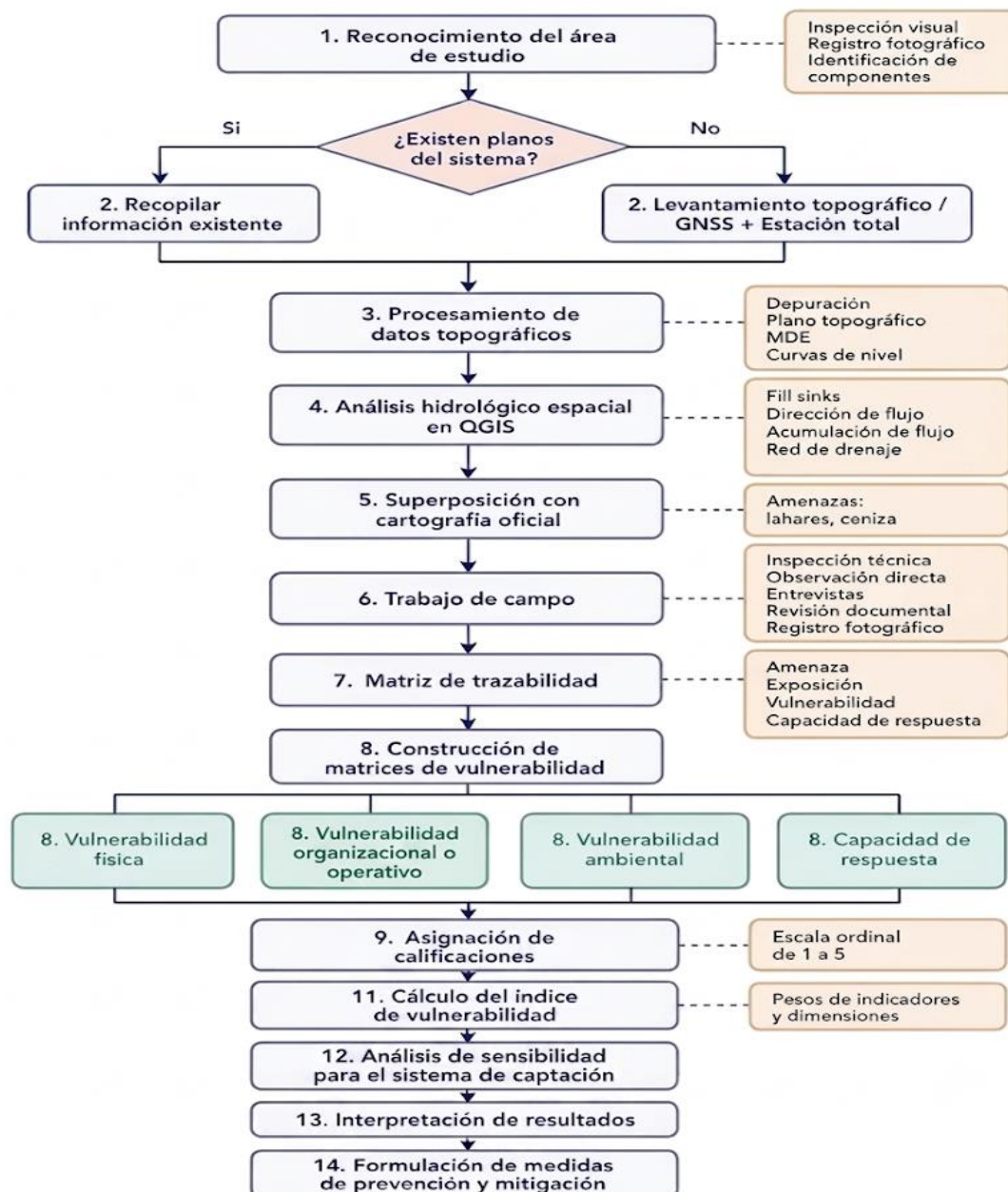


Figura 5. Esquema metodológico

5.4. Área de estudio

La presente investigación se encuentra localizada en la República del Ecuador, provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga, específicamente en la parroquia Mulaló, comunidad rural San Agustín de Callo.

En la **Figura 6** se puede observar y se presenta la ubicación geográfica del sistema de captación superficial, indicando su localización respecto al país, provincia, cantón y parroquia donde se desarrolla la investigación.

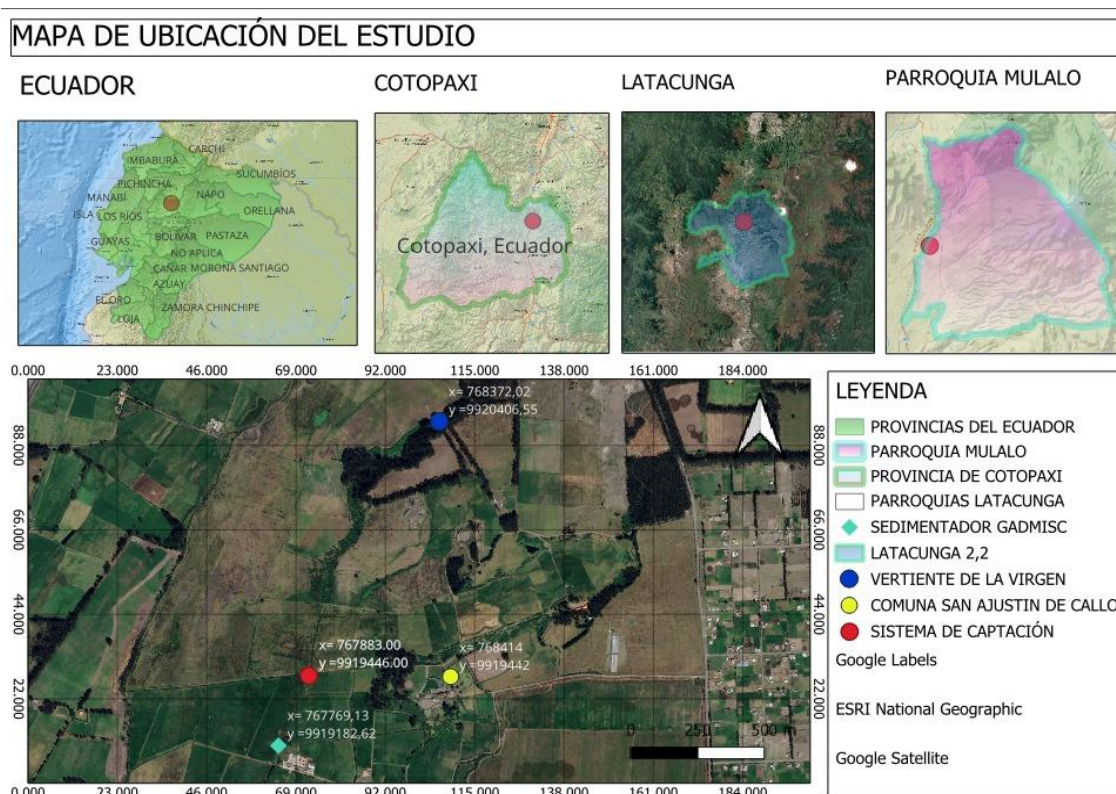


Figura 6.Reconocimiento del área de estudio

5.5. Reconocimiento de los elementos de la obra de captación y tanque sedimentador

Como primera actividad de la investigación se realizó una visita de reconocimiento al sistema de captación de agua de la comunidad San Agustín de Callo. Esta etapa permitió conocer las condiciones actuales de la infraestructura, identificar los componentes que conforman el sistema y reconocer las características físicas del entorno donde se desarrolló el estudio.

Durante el recorrido de campo se inspeccionó visualmente la obra de captación, el sedimentador, el tanque de almacenamiento y las condiciones de operación del sistema. De igual manera, se observaron las características del terreno, identificando quebradas, cauces, drenajes naturales,

pendientes y zonas con evidencia de procesos erosivos, elementos que posteriormente fueron considerados en el análisis de las amenazas volcánicas.

Además, se realizó un registro fotográfico de la infraestructura y del área de estudio, así como la recopilación de información técnica disponible. Durante esta visita se constató que el sistema de captación no contaba con planos topográficos ni información cartográfica actualizada, por lo que fue necesario realizar un levantamiento topográfico en la siguiente etapa de la investigación. La información obtenida permitió planificar las actividades posteriores y establecer la base para la caracterización espacial y la evaluación de la vulnerabilidad del sistema.

Datos de entrada

- Información técnica disponible del sistema de captación.
- Observaciones realizadas durante el recorrido de campo.
- Registro fotográfico de la infraestructura.
- Información del entorno físico.

Equipos e instrumentos

- Cámara fotográfica.
- Libreta de campo.

Resultado esperado

- Diagnóstico inicial del área de estudio.
- Identificación de los componentes del sistema de captación.
- Reconocimiento de las condiciones físicas del entorno.
- Definición de las actividades necesarias para el levantamiento topográfico y las siguientes etapas de la investigación.

5.6. Levantamiento de Información mediante topografía

Se realizó con la finalidad de obtener información planimétrica y altimétrica del sistema de captación superficial de agua y del área de influencia. La información obtenida permitió representar la geometría real del terreno y sirvió como base para la evaluación de las vulnerabilidades y la delimitación de los drenajes naturales del sistema frente a las amenazas volcánicas.

En primer lugar, se establecieron los puntos de control geodésico mediante el receptor GNSS, teniendo las coordenadas UTM de los componentes principales del sistema hidráulico. Luego se efectúa el levantamiento de los detalles por medio de la estación total, con el registro de la posición

de las estructuras hidráulicas, caminos, causes, bordes de quebradas, cambio de pendientes y demás elementos dentro del área de estudio.

Los datos obtenidos se depuran y procesan por medio del software especializado, lo que permite la generalización del plano topográfico del sistema, el modelo digital del terreno, las curvas del nivel y la base cartográfica usada posteriormente en el análisis espacial desarrollado por medio del Sistema de información Geográfica SIG.

Datos de entrada

- Coordenadas de control
- Observación topográfica
- Distancia horizontal
- Ángulos verticales y horizontales
- Elevación del terreno

Equipos e instrumentos

- Receptor GNSS
- Estación total
- Jalones
- Prisma
- Trípode
- Libreta de campo

Variables de entrada

- Coordenadas X y Y
- Elevación
- Distancias y ángulos

Variables de salida

- Plano topográfico
- Curvas de nivel
- Modelo digital del terreno
- Coordenada georreferencia

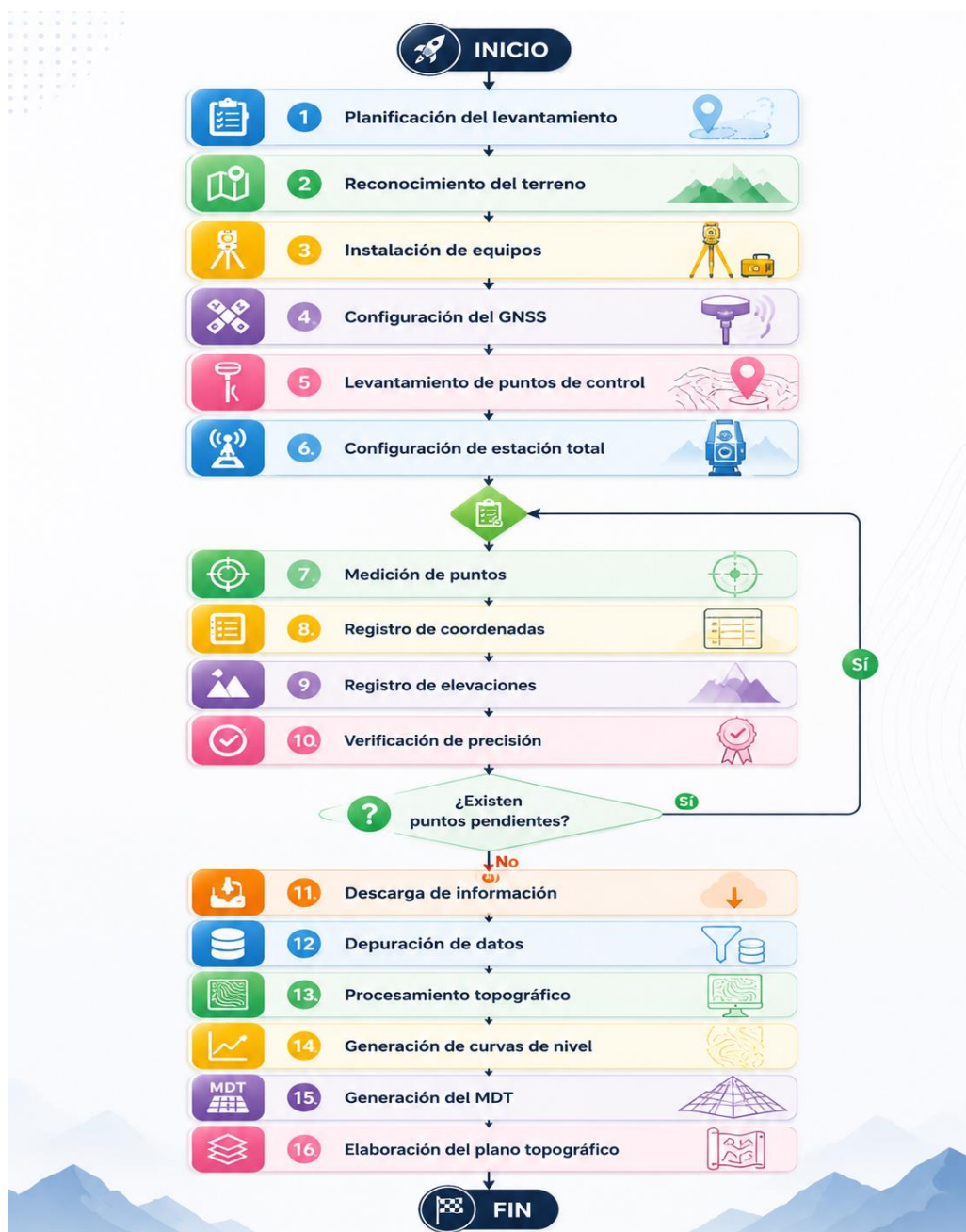


Figura 7. Diagrama del procesamiento del levantamiento topográfica

❖ **Procesamiento de la información topográfica**

Una vez finalizado el levantamiento de campo, se procesa la información topográfica para generar los productos cartográficos necesarios para el análisis espacial de la cuenca. Esta fase permitió transformar los datos obtenidos a través de GNSS y estación total en información digital compatible con sistemas de información geográfica. Inicialmente se descargaron archivos del equipo topográfico y se comprobó la integridad de la información registrada durante el trabajo de

campo. Posteriormente se realizó una limpieza de datos, eliminando registros duplicados, corrigiendo posibles inconsistencias y comprobando la correcta georreferenciación de los puntos encuestados.

Utilizando la información refinada, se desarrolla un Modelo Digital del Terreno (DTM) que representa la superficie del terreno utilizando valores de elevación distribuidos espacialmente. A partir del MDT se crearon curvas de nivel y un modelo tridimensional del área de estudio, que permitió identificar pendientes, depresiones naturales y posibles direcciones de escorrentía. Finalmente, la información cartográfica se exportó en formatos compatibles con QGIS para el desarrollo de modelamiento hidrológico y evaluación de peligros volcánicos

Datos de entrada

- Coordenadas GNSS
- Datos de la estación total
- Archivos topográficos

Software

- AutoCAD Civil 3D
- Microsoft Excel

Variable de salida

- MDT
- Curvas de nivel
- Plano topográfico digital
- Archivo compatible con QGIS

5.7. Análisis hidrológico del terreno y evaluación espacial de la exposición mediante superposición con cartografía oficial de amenazas

El análisis hidrológico del terreno permitirá comprender las condiciones físicas y naturales del área donde se encuentra ubicada la infraestructura de captación de agua en San Agustín de Callo, considerando factores como la topografía, pendientes, red de drenaje, dirección del flujo superficial y comportamiento de las escorrentías. Este análisis es fundamental para determinar las posibles rutas de desplazamiento de fenómenos asociados a una eventual erupción del Volcán Cotopaxi, principalmente flujos de lodo volcánico (lahares), acumulación de sedimentos y alteraciones en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Por otra parte, la evaluación espacial de la exposición mediante la superposición de la ubicación de la infraestructura con cartografía oficial de amenazas volcánicas permitirá identificar el grado de afectación potencial al que se encuentra expuesto el sistema de captación. Mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se integrarán capas de información relacionadas con zonas de amenaza por lahares, caída de ceniza y otros fenómenos volcánicos, generando mapas temáticos que facilitarán la identificación de áreas críticas. Este procedimiento contribuirá a establecer el nivel de vulnerabilidad del sistema existente, proporcionando información técnica necesaria para plantear medidas de prevención, mitigación y adaptación que permitan garantizar la continuidad del servicio de abastecimiento de agua ante un escenario eruptivo del Volcán Cotopaxi.

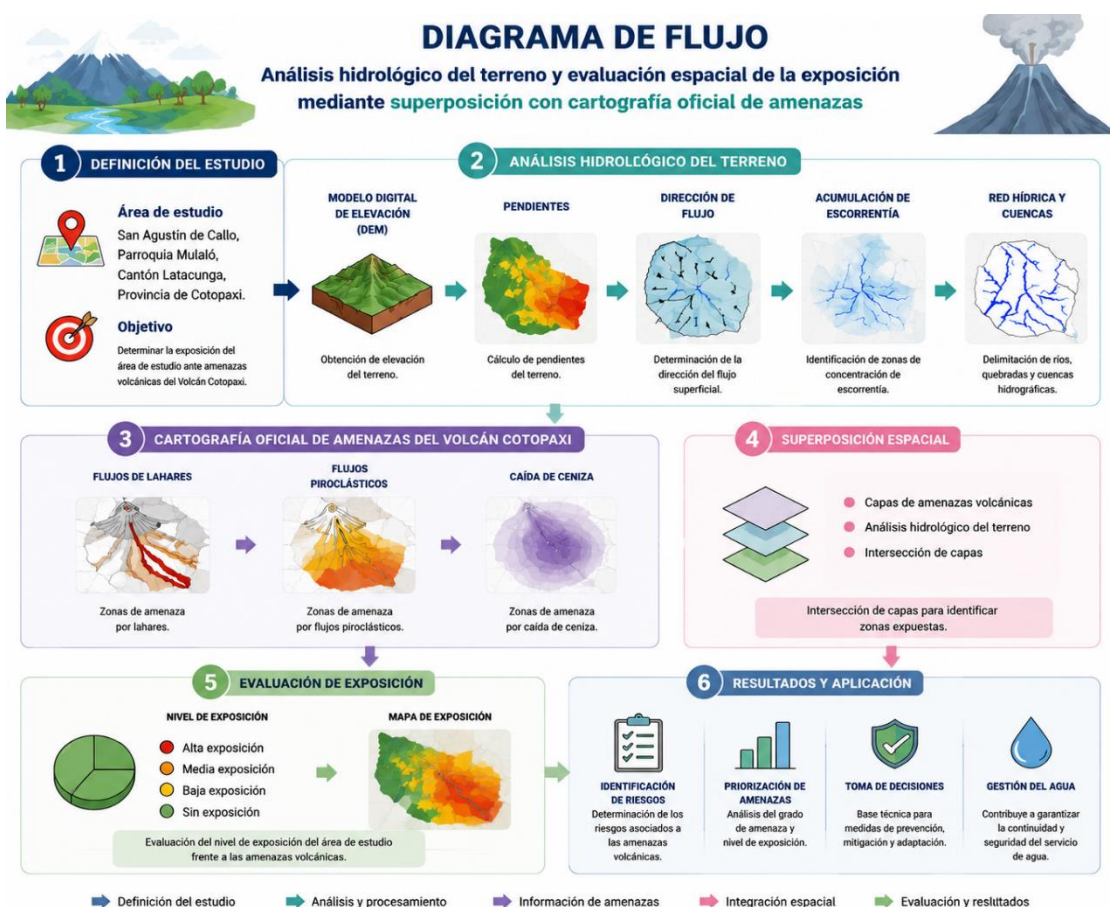


Figura 8: Diagrama de Análisis hidrológico del terreno y evaluación espacial de la exposición mediante superposición con cartografía oficial de amenazas

5.7.1. Análisis hidrológico y geomorfológico del terreno

Para el desarrollo del análisis hidrológico del área de estudio se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de la NASA mediante el producto NASADEM correspondiente a la

actualización publicada en enero de 2025.[42] Este modelo fue descargado desde la plataforma oficial de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), empleando el producto NASADEM_HGT, el cual representa una versión mejorada del Modelo Digital de Elevación generado originalmente por la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

El DEM utilizado corresponde a la versión actualizada NASADEM 2025, la cual incorpora un reprocesamiento de los datos originales de radar SRTM mediante algoritmos mejorados y la integración de información complementaria proveniente de sensores como ICESat y ASTER, permitiendo mejorar la precisión altimétrica y disminuir zonas con ausencia de información. El documento técnico de NASADEM establece que esta actualización fue publicada en enero de 2025 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL)[42] .

5.7.2. Análisis de pendientes del terreno

El análisis de pendiente permitirá determinar el grado de inclinación del terreno dentro del área de estudio, identificando sectores con mayor susceptibilidad al escurrimiento superficial y posibles zonas de concentración de flujos.

La pendiente será calculada a partir del DEM mediante el método de diferencia de elevaciones entre celdas vecinas.

La ecuación utilizada es:

$$S = \frac{\Delta Z}{\Delta X} * 100$$

Ecuación 1:Pendiente del terreno%

Donde:

- **S** = pendiente del terreno (%)
- **ΔZ** = diferencia de elevación entre celdas del DEM (m)
- **ΔX** = distancia horizontal entre celdas (m)

Tabla 4:Clases de gradiente de pendiente FAO (2006). Guía para la descripción de suelos (4.^a ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. p. 12, Tabla 7. [41]

TABLA 7 – Clases de gradiente de pendiente		
Clase	Descripción	Pendiente (%)
01	Plano	0–0,2

02	Nivelado	0,2–0,5
03	Casi nivelado	0,5–1,0
04	Muy suavemente inclinado	1,0–2,0
05	Suavemente inclinado	2–5
06	Inclinado	5–10
07	Fuertemente inclinado	10–15
08	Moderadamente escarpado	15–30
09	Escarpado	30–60
10	Muy escarpado	> 60

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.7.3. Determinación de dirección del flujo superficial

La dirección del flujo será determinada mediante el análisis hidrológico del DEM utilizando el algoritmo D8 (Direction 8), el cual identifica la dirección del movimiento del agua hacia la celda vecina con menor elevación[43].

El cálculo se basa en la diferencia de elevación:

$$Df = \frac{Z_i - Z_j}{d}$$

Ecuación 2: Dirección de flujo

Donde:

- **Df** = dirección del flujo
- **Zi** = elevación de la celda analizada
- **Zj** = elevación de la celda vecina
- **d** = distancia entre celdas

Este análisis permitirá identificar las trayectorias naturales del agua y posibles zonas donde podrían concentrarse flujos provenientes de eventos volcánicos como lahares o escorrentías intensas.

5.7.4. Análisis de acumulación de escorrentía

La acumulación de flujo permitirá conocer la cantidad de agua superficial que converge en cada celda del terreno, identificando cauces naturales y zonas potencialmente inundables.

El cálculo se basa en:

$$FA = \sum ni$$

Ecuación 3: Acumulación de flujo

Donde:

- **FA** = acumulación de flujo
- **n_i** = número de celdas que drenan hacia una celda determinada

Los valores altos de acumulación representarán zonas donde existe mayor concentración del flujo superficial, permitiendo evaluar la posible afectación sobre la infraestructura de captación de agua.

5.7.5. Delimitación de red hídrica y cuencas

A partir de los resultados de dirección y acumulación de flujo se realizará la extracción automática de la red de drenaje y delimitación de microcuencas asociadas al área de estudio.

Para la delimitación de cuencas se aplicará el criterio de área de drenaje:

$$Ac = \sum Ai$$

Ecuación 4: Área de la cuenca

Donde:

- **Ac** = área de la cuenca (m² o km²)
- **Ai** = área correspondiente a cada celda aportante

Además, se calcularán parámetros morfométricos básicos:

Tabla 5: Parámetro morfométrico

Parámetro morfométrico	Símbolo	Unidad	Obtención en QGIS (SAGA GIS)
Área de la cuenca	A	km ²	Shapes → Polygon Properties
Perímetro de la cuenca	P	km	Shapes → Polygon Properties
Longitud máxima de la cuenca	Lb	km	Medición desde salida hasta punto más alejado
Longitud del cauce principal	Lc	km	Channel Network / red hídrica
Pendiente media	S	%	Slope + Zonal Statistics
Orden de corriente	O	-	Channel Network (Strahler)
Número de corrientes	N	unidades	Extracción de red de drenaje
Longitud total de drenajes	Lt	km	Longitud de todos los cauces

Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	Lt / A
---------------------	----	--------------------	--------

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.8. Evaluación de amenazas volcánicas

5.8.1. Recopilación de cartografía oficial de amenazas

Para identificar las áreas expuestas a fenómenos naturales, se recopilará cartografía oficial de amenazas correspondiente al área de estudio. La información será obtenida de instituciones públicas, priorizando mapas, geodatabases y servicios geográficos que cuenten con información sobre amenazas volcánicas, lahares, caída de ceniza y peligros aproximados ante una erupción del Cotopaxi.

Las principales fuentes de información serán el Instituto Geográfico Militar (IGM), la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR), el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). El IGM dispone de cartografía base oficial y atlas de espacios geográficos expuestos a amenazas naturales; mientras que el IG-EPN proporciona mapas de peligros volcánicos relacionados con caída de ceniza, lahares, flujos de lava, corrientes piroclásticas y avalanchas de escombros.

La recopilación se realizará mediante los siguientes procedimientos:

Tabla 6: Cartografías oficial de amenazas

Cartografía requerida	Institución responsable	Tipo de información	Formato esperado	Escala / Resolución	Sistema de coordenadas	Aplicación en el estudio
Cartografía base oficial	Instituto Geográfico Militar (IGM)	Límites administrativos, vías, poblados, hidrografía, curvas de nivel y relieve	Shapefile, GeoPackage, GeoTIFF	Según disponibilidad oficial	WGS 84 / UTM	Base para ubicación y análisis espacial del área de estudio
Amenaza volcánica	Instituto Geofísico - Escuela Politécnica	Lahares, caída de ceniza, flujos de lava, flujos	Shapefile, raster, PDF georreferenciado	Variable según mapa disponible	WGS 84 / UTM	Identificación de zonas expuestas a fenómenos volcánicos

	Nacional (IG-EPN)	piroclásticos y avalanchas				
Mapa de amenazas y riesgos	Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)	Amenazas naturales, zonas vulnerables y eventos históricos	Capas SIG, mapas temáticos	Variable según fuente	WGS 84 / UTM	Evaluación general del nivel de exposición

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.8.2. Análisis de amenaza por lahares

Para el análisis de amenaza por lahares se recopiló información cartográfica y topográfica necesaria para caracterizar las condiciones del terreno:

Tabla 7: Información cartográfica utilizada para la evaluación espacial de la exposición ante la amenaza por lahares

Información cartográfica utilizada para la evaluación espacial de la exposición ante la amenaza por lahares		
Información	Fuente	Uso
Modelo Digital de Elevación (DEM/MDE)	NASA SRTM, ALOS, SIGTIERRAS	Caracterización del relieve y apoyo al análisis topográfico del área de estudio
Cartografía oficial de amenaza por lahares	Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)	Identificación de las zonas y categorías de amenaza por lahares y evaluación espacial de la exposición de la infraestructura
Pendiente del terreno	Derivada del DEM/MDE	Caracterización de las condiciones topográficas del área de estudio como información complementaria
Red de drenaje	Derivada del DEM/MDE	Caracterización hidrológica complementaria del área de estudio y de los cauces próximos a la infraestructura
Ubicación de la infraestructura existente	Levantamiento de campo y georreferenciación	Superposición espacial de la obra de captación y tanque sedimentador con la cartografía oficial de amenaza

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.8.3. Análisis de caída de ceniza volcánica

El análisis de caída de ceniza volcánica se realizó mediante la recopilación de información cartográfica oficial generada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), considerando los escenarios de amenaza volcánica del volcán Cotopaxi.

Tabla 8: Procedimiento metodológico para el análisis de amenaza por caída de ceniza volcánica

N.º	Actividad metodológica	Descripción del procedimiento	Datos / Información requerida	Heramienta o software	Producto generado
1	Recopilación de cartografía oficial	Recopilación de la cartografía oficial disponible sobre la amenaza por caída de ceniza del volcán Cotopaxi.	Mapa oficial de amenaza o susceptibilidad por caída de ceniza del volcán Cotopaxi.	IG-EPN	Cartografía base de amenaza por caída de ceniza
2	Preparación de información SIG	Georreferenciación, reproyección y ajuste de la información cartográfica, según corresponda, para disponer de capas compatibles en el análisis.	Cartografía oficial y sistema de referencia espacial utilizado en el estudio.	QGIS	Capa cartográfica compatible para el análisis espacial
3	Incorporación de la infraestructura	Ingreso de las coordenadas georreferenciadas de la obra de captación y del tanque sedimentador dentro del proyecto SIG.	Coordenadas GNSS de la obra de captación y del tanque sedimentador.	QGIS	Infraestructura georreferenciada
4	Superposición espacial	Superposición de la infraestructura georreferenciada con la cartografía oficial para verificar su ubicación respecto de las zonas de amenaza por caída de ceniza.	Capa de infraestructura y cartografía oficial de amenaza por caída de ceniza.	QGIS	Condición de exposición de la obra de captación y del tanque sedimentador

5	Elaboración cartográfica	Representación cartográfica de los resultados obtenidos mediante la superposición espacial.	Capas procesadas y resultado de la evaluación espacial.	QGIS	Mapa de exposición ante la caída de ceniza
---	--------------------------	---	---	------	--

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.8.4. Elaboración del mapa de exposición

Tabla 9:Exposición de los componentes del sistema de captación ante amenazas volcánicas

Exposición de los componentes del sistema de captación ante amenazas volcánicas				
Amenaza analizada	Fuente cartográfica	Criterio de exposición	Obra de captación	Tanque sedimentador
Lahares	IG-EPN	Intersección espacial con zona de amenaza	Expuesta – zona correspondiente según mapa oficial	Expuesto/no expuesto según intersección
Caída de ceniza	IG-EPN	Intersección espacial con área susceptible/escenario oficial	Expuesta	Expuesto
Flujos piroclásticos	IG-EPN	Intersección espacial con polígono de amenaza	Según resultado SIG	Según resultado SIG

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.9. Identificación de amenazas y evaluación de la exposición

La identificación de las amenazas y la evaluación de la exposición se realizaron con el fin de conocer los fenómenos volcánicos que podrían afectar al sistema de captación de agua de San Agustín de Callo y determinar si su ubicación se encuentra dentro de las zonas consideradas susceptibles a estos eventos. Para ello, se utilizó información cartográfica relacionada con los escenarios de amenaza del volcán Cotopaxi, la cual fue complementada con las coordenadas georreferenciadas del sistema obtenidas durante el trabajo de campo.

En el análisis se consideraron como principales amenazas los lahares y flujos piroclásticos, así como la caída de ceniza. La información fue procesada mediante el software QGIS, donde se realizó la superposición de la ubicación del sistema con las capas correspondientes a cada escenario de amenaza. Este procedimiento permitió establecer de manera espacial la relación entre la infraestructura existente y los fenómenos volcánicos considerados.

5.10. Identificación de la amenaza por lahares y flujos piroclásticos

Para identificar la amenaza asociada a lahares y flujos piroclásticos se revisó la cartografía disponible del volcán Cotopaxi, prestando especial atención a la distribución de las zonas susceptibles a estos fenómenos y a su relación con el lugar donde se encuentra el sistema de captación.

El análisis permitió reconocer la condición territorial de San Agustín de Callo frente a una posible actividad eruptiva. En este contexto, los lahares fueron considerados como una amenaza latente, ya que su ocurrencia depende de que se presente un proceso eruptivo y de las condiciones necesarias para que el material volcánico pueda movilizarse a través de los cauces y zonas de drenaje.

La información obtenida permitió establecer la condición de amenaza del área de estudio y sirvió como base para analizar posteriormente la exposición del sistema de captación.

5.11. Identificación de la amenaza por caída de ceniza

La amenaza por caída de ceniza se determinó a partir de la cartografía que representó las áreas susceptibles a recibir material volcánico durante una eventual erupción del volcán Cotopaxi.

Esta información fue incorporada y procesada en QGIS junto con la ubicación georreferenciada del sistema de captación. Mediante la superposición de ambas capas fue posible identificar si la infraestructura se encontraba dentro de las áreas susceptibles a la deposición de ceniza.

5.12. Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición se realizó tomando como referencia la ubicación física del sistema de captación y su relación con las zonas de amenaza identificadas previamente. Para ello, se utilizaron las coordenadas obtenidas durante el levantamiento de campo y las capas cartográficas correspondientes a lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza.

El procesamiento de esta información en QGIS permitió superponer espacialmente la infraestructura con los escenarios de amenaza y determinar si el sistema se encontraba ubicado dentro de las áreas susceptibles a estos fenómenos volcánicos.

En este análisis, la exposición se consideró únicamente desde el punto de vista espacial, es decir, a partir de la ubicación del sistema respecto a las zonas de amenaza.

5.13. Matriz de trazabilidad entre amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad

Con la finalidad de evitar la doble contabilización de los factores asociados a la amenaza volcánica, se elaboró una matriz de trazabilidad que permitió diferenciar los conceptos de amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad.

Esta matriz permitió establecer que la presencia del sistema dentro de una zona susceptible a lahares o caída de ceniza correspondió a una condición de exposición territorial y no a una deficiencia propia de la infraestructura.

La capacidad se reconoció como una categoría diferenciada de la vulnerabilidad; sin embargo, no se desarrolló una matriz independiente para su valoración. Los aspectos relacionados con protocolos de emergencia, disponibilidad de recursos y sistemas alternativos se incorporaron dentro de la dimensión administrativa como factores inversamente relacionados con la vulnerabilidad. Bajo este criterio, una menor capacidad de respuesta se refleja en una mayor vulnerabilidad administrativa, mientras que una mayor capacidad contribuye a reducirla. De esta forma, se evita evaluar los mismos factores de manera independiente y se mantiene la correspondencia entre la matriz de trazabilidad y el procedimiento utilizado para valorar la vulnerabilidad.

Matriz de trazabilidad del sistema de captación.

Tabla 10: Matriz de trazabilidad

Factor analizado	Clasificación	¿Dónde se evalúa?
Flujo de lahares por posible erupción del volcán Cotopaxi	Amenaza	Evaluación espacial mediante QGIS y cartografía oficial
Caída de ceniza volcánica	Amenaza	Evaluación espacial mediante QGIS y cartografía oficial
Ubicación del sistema de captación dentro de zona de amenaza alta por lahares	Exposición	Evaluación espacial mediante QGIS y cartografía oficial
Ubicación del sistema de captación dentro del área de influencia de ceniza	Exposición	Evaluación espacial mediante QGIS
Grietas, fisuras, filtraciones y deterioro del hormigón	Vulnerabilidad física	Matriz de vulnerabilidad física

Funcionamiento de captación, conducción y sedimentación	Vulnerabilidad funcional	Matriz de vulnerabilidad funcional
Erosión, vegetación, residuos y conservación del entorno	Vulnerabilidad ambiental	Matriz de vulnerabilidad ambiental
Mantenimiento, registros, organización y gestión del riesgo	Vulnerabilidad administrativa	Matriz de vulnerabilidad organizacional
Protocolos de emergencia	Capacidad	Matriz administrativa
Recursos disponibles para atención de emergencias	Capacidad	Matriz administrativa
Sistemas alternativos o redundancia del servicio	Capacidad	Matriz administrativa

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.14. Evaluación de vulnerabilidad de la obra de captación y el tanque sedimentador

Las matrices se elaboraron considerando los lineamientos técnicos establecidos en la Guía para una respuesta eficaz en emergencias y desastres en sistemas de agua potable y saneamiento de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/AIDIS) y en el manual WASH Disaster Risk Reduction de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Estos documentos proporcionaron criterios para evaluar las condiciones de los sistemas de abastecimiento de agua desde el punto de vista estructural, operativo, ambiental y de gestión.

A partir de estos lineamientos, se definieron las dimensiones de vulnerabilidad física, funcional, ambiental y organizacional o administrativa empleadas en la presente investigación. Los indicadores, elementos y criterios de evaluación se adecuaron a las características específicas de la obra de captación y del tanque sedimentador del sistema de agua potable de San Agustín del Callo, manteniendo el enfoque preventivo del estudio frente a una posible erupción del volcán Cotopaxi.

Dado que la guía de la OPS/AIDIS estuvo orientada principalmente a la evaluación de daños posteriores a un desastre, sus criterios metodológicos se adaptaron al objetivo de la presente investigación. La adaptación consistió en conservar la estructura general de evaluación propuesta por la guía, pero orientar los instrumentos al análisis preventivo del estado actual del sistema de captación, con el fin de estimar su vulnerabilidad frente a una posible erupción del volcán Cotopaxi.

Debido a que el sistema de captación está conformado por dos componentes principales, la evaluación se realizó de manera independiente para:

- ❖ Obra de captación.
- ❖ Tanque sedimentador.

En cada componente se analizaron cuatro dimensiones de vulnerabilidad:

- ❖ Vulnerabilidad física.
- ❖ Vulnerabilidad funcional.
- ❖ Vulnerabilidad ambiental.
- ❖ Vulnerabilidad organizacional o administrativa.

Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física permitió evaluar el estado y las condiciones materiales de la infraestructura.

Se consideraron elementos relacionados con:

- estado de los componentes estructurales;
- protección física;
- cubierta;
- protección perimetral;
- condiciones de conservación;
- estabilidad de elementos;
- condiciones visibles de deterioro;

La exposición a lahares, ceniza o sismos no se calificó nuevamente dentro de esta matriz. En su lugar, se evaluó la susceptibilidad propia de la infraestructura, por ejemplo, la ausencia de cubierta del tanque o la presencia de deterioro físico.

Vulnerabilidad funcional

La vulnerabilidad funcional permitió evaluar la capacidad de la infraestructura para mantener su operación y responder a condiciones que puedan afectar su funcionamiento.

Se consideraron aspectos como:

- Operación continua;
- Inspección;
- Mantenimiento preventivo;
- Mantenimiento correctivo;
- Disponibilidad operativa;
- Respuesta ante incremento de sedimentos;
- Continuidad del transporte del agua.

La presencia de una amenaza externa no se utilizó directamente para disminuir la calificación funcional. Se evaluó en cambio la condición operativa real del sistema.

Vulnerabilidad ambiental

La vulnerabilidad ambiental permitió evaluar las condiciones ambientales existentes que puedan afectar el recurso hídrico o favorecer su deterioro.

Se consideraron aspectos como:

- condiciones sanitarias;
- limpieza;
- condiciones de higiene;
- residuos sólidos;
- focos potenciales de contaminación;
- presencia de animales;
- excretas de ganado;
- alteraciones del entorno;
- vegetación acuática y acumulación de material, cuando correspondiera.

Por ejemplo, la presencia de ganado o estiércol cerca del tanque se consideró como una condición ambiental potencialmente contaminante, independientemente de que la infraestructura se encuentre expuesta a una amenaza volcánica.

Vulnerabilidad administrativa

La vulnerabilidad administrativa permitió evaluar las condiciones relacionadas con la gestión, organización y preparación para la operación y mantenimiento del sistema.

Se consideraron aspectos como:

- responsables de la operación;
- planificación del mantenimiento;
- registros;
- capacitación;
- comunicación;
- procedimientos;
- recursos disponibles;
- preparación ante emergencias.

En esta dimensión, la amenaza no se volvió a calificar como vulnerabilidad. En su lugar, se evaluó la capacidad existente para responder ante la amenaza identificada.

5.14.1. Asignación de la calificación de los elementos de evaluación

Cada indicador estuvo conformado por uno o varios elementos de evaluación que representan las condiciones específicas de cada componente del sistema de captación. Cada elemento fue evaluado de manera independiente durante la inspección técnica de campo, considerando criterios específicos previamente establecidos de acuerdo con las características físicas, funcionales, ambientales y organizacionales del sistema.

La valoración de cada elemento se realizó mediante una escala ordinal de cinco niveles, donde la calificación asignada representa el estado actual de la condición evaluada. Esta escala permitió convertir las observaciones cualitativas obtenidas durante la inspección en valores numéricos, facilitando la comparación y determinación del nivel de vulnerabilidad del sistema.

La escala de valoración utilizada fue adaptada de los criterios cualitativos empleados por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) para la valoración de condiciones de vulnerabilidad, y complementada con criterios técnicos de evaluación aplicados por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) en sistemas relacionados con la prestación y gestión de servicios de agua. La escala aplicada fue la siguiente.

Tabla 11: Escala aplicada

Calificación	Estado
5	Muy bueno
4	Bueno
3	Regular

2	Malo
1	Muy malo

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La asignación de la calificación se realizó mediante la comparación entre la condición observada en campo y los criterios definidos para cada elemento de evaluación. El valor de 5 (Muy bueno) representa condiciones óptimas del elemento, sin deficiencias que comprometan su funcionamiento, mientras que el valor de 1 (Muy malo) corresponde a condiciones deficientes, deterioro significativo o ausencia de medidas de protección y gestión que incrementan la vulnerabilidad del sistema.

Cuando un elemento no pudo ser comprobado debido a limitaciones de acceso o inspección, se registró como N/V (No verificable). Estos elementos no recibieron una calificación numérica arbitraria.

5.14.2. Técnicas e instrumentos de recopilación

La información se obtuvo mediante las siguientes técnicas:

Tabla 12: Técnicas e instrumentos de recopilación

Técnica	Aplicación
Observación directa	Evaluación del estado físico, funcional y ambiental
Inspección de campo	Verificación de componentes de la captación y tanque
Entrevista al operador	Información sobre operación, mantenimiento y respuesta
Registro fotográfico	Evidencia de las condiciones observadas
Levantamiento topográfico	Ubicación y características geométricas de los componentes
Revisión documental	Registros, procedimientos y documentación disponible
Análisis cartográfico	Determinación de exposición frente a amenazas

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

5.14.3. Ponderación de indicadores y dimensiones mediante el método AHP

Con el propósito de determinar la importancia relativa de los indicadores utilizados en la evaluación de vulnerabilidad, se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP)[40], desarrollado por Thomas L. Saaty. Este método permitió asignar pesos diferenciados a los indicadores y dimensiones, considerando que no todos poseen la misma importancia dentro de las condiciones y funcionamiento del sistema de captación.

El método AHP se aplicó a las cuatro dimensiones consideradas en la investigación: física, funcional, ambiental y administrativa, tanto para la obra de captación como para el tanque sedimentador. El procedimiento comprendió la construcción de matrices de comparación por pares, integración de los criterios de los expertos, cálculo de los pesos, comprobación de la consistencia y posterior utilización de los pesos en el cálculo del Índice de Condición.

5.14.4. Organización de las dimensiones e indicadores

Primero se definieron las dimensiones e indicadores que serían utilizados para evaluar las condiciones de la obra de captación y del tanque sedimentador. Estos indicadores fueron establecidos considerando las características de cada infraestructura y la información obtenida mediante la revisión bibliográfica, la inspección de campo, las entrevistas y la documentación disponible.

Los indicadores se organizaron dentro de cuatro dimensiones: física, funcional, ambiental y administrativa. La ponderación de los indicadores se realizó de forma independiente para cada dimensión.

5.14.5. Comparación de los indicadores por pares

Una vez definidos los indicadores, se realizó la comparación por pares. Este procedimiento consistió en comparar cada indicador con los demás indicadores pertenecientes a la misma dimensión, con el objetivo de determinar cuál posee mayor importancia relativa para la evaluación. Las comparaciones se organizaron mediante una matriz:

$$A = [a_{ij}]$$

Ecuación 5: Matriz de comparación por pares)[40]

donde (a_{ij}) representa la importancia del indicador (i) frente al indicador (j).

En la diagonal principal de la matriz se colocó el valor 1, debido a que cada indicador presenta la misma importancia respecto de sí mismo:

$$a_{ii} = 1$$

Ecuación 6: Condición de igualdad en la comparación de un indicador consigo mismo)[40]

Para establecer la importancia relativa entre los indicadores y dimensiones se utilizó la escala fundamental de Saaty, que permite expresar la intensidad de importancia de un elemento respecto a otro mediante valores enteros de 1 a 9 y sus correspondientes valores recíprocos.

Tabla 13: Escala fundamental de Saaty utilizada en la investigación[40].

Valor	Importancia	Interpretación
1	Igual importancia	Los dos elementos presentan la misma importancia
3	Importancia moderada	Un elemento es moderadamente más importante que el otro
5	Importancia fuerte	Un elemento presenta una importancia claramente mayor
7	Importancia muy fuerte	Un elemento presenta una importancia mucho mayor
9	Importancia extrema	Un elemento presenta una importancia absoluta frente al otro
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios	Se utilizan cuando la valoración se encuentra entre dos niveles consecutivos
1/3, 1/5, 1/7, 1/9	Valores recíprocos	Se utilizan cuando el elemento de la fila es menos importante que el elemento de la columna
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Recíprocos intermedios	Se utilizan para expresar niveles intermedios de menor importancia

Además, se mantuvo la relación recíproca entre las comparaciones:

$$a_{ji} = 1/a_{ij}$$

Ecuación 7: Relación de reciprocidad de la matriz de comparación por pares)[40]

Por tanto, en estas operaciones no se suman ni se restan los valores de la escala de Saaty. Los valores se utilizan para expresar la importancia relativa entre dos elementos y las posiciones opuestas de la matriz se obtienen mediante el recíproco. Se empleó la escala de Saaty de 1 a 9 y sus respectivos valores recíprocos.

5.14.6. Valoración de los expertos

Las matrices de comparación por pares fueron desarrolladas de manera independiente por tres expertos del GAD Municipal de Saquisilí, quienes poseen conocimiento relacionado con la infraestructura y con el sistema de captación evaluado. Su participación permitió incorporar el criterio técnico de profesionales que conocen las características y condiciones del sistema de abastecimiento de agua analizado.

A cada experto se le presentó la estructura de indicadores correspondiente a cada dimensión y se solicitó establecer la importancia relativa entre los indicadores mediante la escala de Saaty. De esta forma, se obtuvieron tres matrices de comparación por pares para cada grupo de indicadores. La participación de los tres expertos permitió incorporar diferentes criterios profesionales para establecer la importancia relativa de los indicadores y dimensiones.

Nota: Los expertos seleccionados pertenecen al GAD Municipal de Saquisilí, entidad relacionada con la gestión del sistema, por lo que su conocimiento de las condiciones y funcionamiento de la captación permitió sustentar técnicamente las comparaciones realizadas mediante AHP.

5.14.7. Integración de los criterios de los expertos

Después de obtener las matrices individuales, se integraron las valoraciones de los tres expertos para obtener una única matriz representativa del criterio conjunto.

Para ello, se utilizó la media geométrica, aplicada de manera independiente a cada comparación de la matriz. Al participar tres expertos, el valor agregado de cada comparación se calculó mediante:

$$a_{ij}^* = \sqrt[3]{a_{ij}^1 \times a_{ij}^2 \times a_{ij}^3}$$

Ecuación 8: Agregación de las valoraciones de los expertos mediante media geométrica

donde:

- a_{ij}^* = valor agregado de la comparación entre los indicadores (i) y (j);
- a_{ij}^1 = valoración del experto 1;
- a_{ij}^2 = valoración del experto 2;
- a_{ij}^3 = valoración del experto 3.

El resultado de este procedimiento permitió obtener una matriz agregada para cada indicador y dimensión, la cual fue utilizada para determinar los pesos AHP.

5.14.8. Obtención de los pesos de los indicadores

A partir de la matriz agregada se calculó la media geométrica de cada fila. Para un conjunto de (n) indicadores, esta se obtuvo mediante:

$$GM_i = \sqrt[n]{a_{i1} * \times a_{i2} * \times \dots \times a_{in}}$$

Ecuación 9: Cálculo de la media geométrica por indicador

Posteriormente, cada media geométrica fue normalizada para obtener el peso correspondiente a cada indicador:

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum GM_i}$$

Ecuación 10: Normalización de los pesos AHP

Los pesos obtenidos representan la importancia relativa de cada indicador dentro de su respectiva dimensión. La suma de todos los pesos debe ser igual a uno:

$$\sum w_i = 1$$

Ecuación 11: Condición de normalización de los pesos AHP

Estos pesos fueron posteriormente utilizados para ponderar las calificaciones obtenidas durante la evaluación de campo.

5.14.9. Comprobación de la consistencia de las matrices

Después de obtener los pesos, se verificó la consistencia de las matrices de comparación. Esta comprobación fue necesaria para determinar si las valoraciones realizadas por los expertos mantienen una relación lógica y suficientemente coherente.

Para ello, se multiplicó la matriz agregada por el vector de pesos:

$$A \times w$$

Ecuación 12: Multiplicación de la matriz agregada por el vector de pesos

Posteriormente, se calculó para cada indicador la siguiente relación:

$$\lambda_i = (A \times w)_i / w_i$$

Ecuación 13: Cálculo del valor propio por indicador

Con estos valores se determinó el auto valor máximo de la matriz:

$$\lambda_{\max} = [\sum ((A \times w)_i / w_i)] / n$$

Ecuación 14: Cálculo del valor propio máximo

Con el valor obtenido de $\lambda_{\max}$ se calculó el Índice de Consistencia (CI):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

Ecuación 15: Cálculo del Índice de Consistencia

El resultado permitió determinar el grado de consistencia de los juicios realizados en la matriz.

5.14.10. Cálculo de la Razón de Consistencia

Posteriormente, se calculó la Razón de Consistencia (CR) mediante:

$$CR = CI / RI$$

Ecuación 16: Cálculo de la Razón de Consistencia

donde RI corresponde al índice aleatorio de consistencia. Para las matrices de cuatro criterios se utilizó RI=0,90, mientras que para las matrices de ocho criterios se utilizó RI=1,41, de acuerdo con los valores empleados en la hoja de cálculo.

Para la presente investigación se consideró que las matrices presentaban una consistencia aceptable cuando:

$$CR \leq 0,10$$

Ecuación 17: Criterio de consistencia aceptable

Cuando este criterio se cumple, los pesos obtenidos pueden utilizarse en el análisis. En el caso contrario, los juicios deben ser revisados antes de continuar con la ponderación.

5.14.11. Obtención del Índice de Condición ponderado

Una vez obtenidas las calificaciones de los indicadores y sus respectivos pesos AHP, se calculó el Índice de Condición ponderado de cada indicador y dimensión. Los pesos AHP representan la importancia relativa de cada indicador dentro de la dimensión evaluada, mientras que la calificación IC representa la condición observada durante la evaluación de campo.

Cuando un indicador no pudo ser verificado directamente durante la evaluación de campo, este fue registrado como No Verificable (N/V). En estos casos, se mantuvo el peso AHP asignado al indicador como referencia de su importancia dentro de la dimensión; sin embargo, al no contar con una calificación verificable de su condición, dicho indicador no fue considerado directamente en el cálculo del Índice de Condición (IC).

Para evitar que el peso correspondiente al indicador N/V se pierda dentro de la ponderación de la dimensión, este fue distribuido en partes iguales entre los indicadores que sí pudieron ser observados y calificados. El peso del indicador N/V se dividió para el número de indicadores verificables de la dimensión y el valor obtenido se sumó al peso AHP original de cada indicador observable.

El peso ajustado de cada indicador verificable se obtuvo mediante:

$$W_i^* = W_i + (W_{nv} / n)$$

Ecuación 18:Redistribución del peso AHP de indicadores no verificables

Donde W_i^* corresponde al peso ajustado del indicador verificable, W_i es su peso AHP original, W_{nv} es el peso AHP del indicador registrado como N/V y n corresponde al número de indicadores que sí pudieron ser observados y calificados.

Para la presentación de los resultados, las calificaciones del Índice de Condición (IC), los pesos y los valores ponderados se expresaron con dos decimales. Sin embargo, en los cálculos correspondientes al método AHP se conservaron todos los decimales obtenidos en cada etapa del procedimiento, con el fin de evitar pérdidas de precisión por redondeo. El redondeo a dos decimales se aplicó únicamente para facilitar la presentación e interpretación de los resultados finales.

Una vez realizado este ajuste, se calculó el Índice de Condición ponderado de cada dimensión mediante la suma de los productos entre la calificación de cada indicador verificable y su peso ajustado:

$$IC_d = (IC_i \times w_i)$$

Ecuación 19:Cálculo del Índice de Condición ponderado de la dimensión

donde:

- IC_d = Índice de Condición ponderado de la dimensión;
- IC_i = calificación obtenida por el indicador (i);
- w_i = peso AHP correspondiente al indicador (i).

De esta forma, los indicadores registrados como N/V no reciben una calificación estimada, mientras que su peso AHP es distribuido equitativamente entre los indicadores que sí cuentan con evidencia de campo, manteniendo una ponderación total de 1,00 dentro de cada dimensión.

5.14.12. Ponderación de las dimensiones

Además de establecer los pesos de los indicadores, se determinó la importancia relativa de las cuatro dimensiones de evaluación: física, funcional, ambiental y administrativa.

Para ello, se realizó nuevamente el procedimiento AHP, pero esta vez comparando las cuatro dimensiones entre sí. Se utilizaron las valoraciones de los tres expertos y se siguió el mismo procedimiento de agregación mediante media geométrica, determinación de pesos y comprobación de la consistencia mediante CI y CR.

y deben cumplir:

$$W_f + W_{fu} + W_a + W_{ad} = 1$$

Ecuación 20: Normalización de los pesos de las dimensiones

5.14.13. Obtención del Índice de Condición global

Con los Índices de Condición de las cuatro dimensiones y sus respectivos pesos AHP se obtuvo el Índice de Condición global:

$$IC_{global} = (IC_f \times W_f) + (IC_{fu} \times W_{fu}) + (IC_a \times W_a) + (IC_{ad} \times W_{ad})$$

Ecuación 21: Cálculo del Índice de Condición global ponderado

Este resultado representa la condición global ponderada del componente evaluado, considerando tanto el estado actual de la infraestructura como la importancia relativa de cada dimensión.

5.14.14. Conversión del Índice de Condición en vulnerabilidad

Debido a que la escala utilizada inicialmente representa una condición favorable cuando el valor es alto, fue necesario transformar el Índice de Condición en un valor directamente relacionado con la vulnerabilidad.

Para ello se utilizó la siguiente expresión:

$$V = 6 - IC$$

Ecuación 22: Índice de condición

donde:

- V = índice de vulnerabilidad;
- IC = Índice de Condición obtenido mediante la ponderación.

La transformación permite que los valores altos de condición se relacionen con niveles bajos de vulnerabilidad, mientras que los valores bajos de condición se relacionen con niveles altos de vulnerabilidad.

La interpretación de los resultados se realizó mediante los siguientes rangos:

Tabla 14: Rangos de interpretación del Índice de Condición

Índice de Condición (Estado IC) - escala original (5 = muy bueno, 1 = muy malo)		
Limite inferior	Limite superior	Estado del indicador (IC)
1	<=1,80	Muy malo
1,81	<=2,60	Malo
2,61	<=3,40	Regular
3,41	<=4,20	Bueno
4,21	<=5	Muy bueno

Tabla 15: Rangos de interpretación del nivel de vulnerabilidad

Nivel de Vulnerabilidad (V = 6 - IC) - 5 = vulnerabilidad muy alta, 1 = vulnerabilidad muy baja		
Limite inferior	Limite superior	Nivel de vulnerabilidad (V)
1	<=1,80	Muy baja
1,81	<=2,60	Baja
2,61	<=3,40	Media
3,41	<=4,20	Alta
4,21	<=5	Muy alta

El procedimiento permitió obtener una evaluación ponderada de la vulnerabilidad del sistema de captación, en la cual la calificación de cada indicador refleja su condición actual y los pesos obtenidos mediante AHP reflejan la importancia relativa establecida a partir del criterio conjunto de los expertos.

5.15. Análisis de sensibilidad del resultado global

Debido a que en la investigación no se estableció una jerarquía AHP específica entre la obra de captación y el tanque sedimentador, para integrar ambos componentes en el resultado global se asignó inicialmente un peso de 50 % a cada uno. Con el propósito de evaluar la influencia de esta decisión sobre el resultado final, se realizó un análisis de sensibilidad mediante diferentes escenarios de ponderación. Se consideraron distribuciones de 40 %/60 %, 50 %/50 % como escenario base y 60 %/40 % entre la obra de captación y el tanque sedimentador, manteniendo constantes los índices de condición individuales obtenidos para cada componente.

De forma complementaria, se evaluaron variaciones de -10 %, -5 %, +5 % y +10 % respecto de la ponderación base. En cada escenario, los pesos fueron ajustados y normalizados para mantener una suma total de 1,00. Posteriormente, se recalculó el Índice de Condición global del sistema y, a partir de este valor, se determinó la vulnerabilidad mediante la relación establecida en la metodología. Finalmente, el nivel de vulnerabilidad se asignó de acuerdo con los límites de clasificación definidos en la escala utilizada en la investigación. Este procedimiento permitió evaluar la estabilidad del resultado global frente a cambios razonables en la ponderación de los componentes.

5.16. La matriz de identificación de impactos

Se elaboró mediante un procedimiento de trazabilidad documental, en el que cada dato utilizado proviene de un resultado específico y verificable de la investigación, evitando así cualquier supuesto externo o estimación no sustentada.

En primer lugar, se determinó la ubicación del sistema respecto a las zonas de amenaza volcánica, tomando como referencia la cartografía oficial procesada en QGIS: el área proximal de amenaza alta por lahares y flujos piroclásticos y el área susceptible a caída de ceniza.

En segundo lugar, la exposición que presenta el sistema de captación ante una posible erupción volcánica.

En tercer lugar, se incorporaron las deficiencias físicas, funcionales y ambientales detectadas durante la evaluación de vulnerabilidad mediante AHP,

Finalmente, se retomaron los cuales permiten dimensionar el grado de preparación del sistema frente a las amenazas identificadas.

Es importante señalar que no fue posible cuantificar la magnitud física de un eventual lahar, debido a la ausencia de parámetros de ingeniería del flujo (velocidad, volumen, alcance dinámico) dentro del alcance de este estudio.

A partir del cruce de estos tres componentes, amenaza, exposición y vulnerabilidad se construyó la matriz de impactos, entendida como una relación de probabilidad fundamentada en evidencia real y no como un registro de eventos ya ocurridos.

5.17. Formulación de medidas de prevención y mitigación

Las medidas de prevención y mitigación se plantearon tomando como base los resultados obtenidos en la evaluación de vulnerabilidad de la obra de captación y del tanque sedimentador. Para definir las, se revisaron de manera conjunta las dimensiones física, funcional u operativa, ambiental y organizacional o administrativa. Además de los valores obtenidos mediante el Índice de Condición (IC) y la ponderación AHP, se tomaron en cuenta las observaciones realizadas durante las visitas de campo, las entrevistas y la información técnica disponible.

Como primer paso, se determinaron las condiciones que podían afectar en mayor medida la infraestructura y la continuidad del servicio. Se dio mayor atención a los componentes con calificaciones desfavorables, especialmente aquellos relacionados con la protección de las estructuras, el mantenimiento, las condiciones del entorno y la preparación para responder ante una posible erupción del volcán Cotopaxi.

En el aspecto físico, se consideraron las condiciones observadas en la obra de captación y en el tanque sedimentador. Uno de los principales aspectos identificados fue la falta de protección frente a factores externos. En particular, el tanque sedimentador no cuenta con una cubierta, por lo que su interior queda expuesto al ingreso de ceniza, polvo, residuos y otros materiales que podrían afectar su funcionamiento y la calidad del agua durante un evento de caída de ceniza.

En la dimensión ambiental, se tomó en cuenta la presencia de actividades agrícolas y animales cerca de la obra de captación y del tanque sedimentador. Estas condiciones pueden facilitar el ingreso de contaminantes y afectar las condiciones sanitarias del sistema. Por esta razón, las medidas propuestas buscan mejorar la protección del entorno y reducir aquellos factores que puedan afectar la calidad del agua. Esta situación se analizó como una condición propia del entorno, diferenciándola de la exposición territorial frente a las amenazas volcánicas.

Respecto a la dimensión organizacional o administrativa, se consideraron las dificultades encontradas para preparar y responder ante situaciones de emergencia. Durante la investigación se evidenció que la obra de captación y el tanque sedimentador no cuentan con protocolos específicos para actuar frente a una posible erupción del volcán Cotopaxi. También se identificaron deficiencias relacionadas con los registros técnicos, la capacitación, la planificación del mantenimiento y la preparación ante emergencias. Por ello, las medidas planteadas buscan fortalecer la organización y mejorar la capacidad de respuesta de quienes administran el sistema. También se consideraron los componentes registrados como No Verificables (N/V). Este fue el caso de la línea de conducción, debido a que la tubería se encuentra enterrada y no fue posible revisar directamente su estado físico. Además, la falta de planos y documentación técnica original dificultó comprobar completamente su trazado. Esta situación no se interpretó como una falla o deterioro de la tubería, sino como una limitación de la inspección y una incertidumbre técnica que debe ser tomada en cuenta para futuras verificaciones.

Con base en estas condiciones, se relacionó cada componente con la dimensión evaluada, la situación encontrada, la amenaza que podría afectarlo y la medida de prevención o mitigación correspondiente. De esta manera, las propuestas se formularon a partir de las necesidades reales identificadas durante la investigación. Las acciones planteadas están orientadas principalmente a mejorar la protección de la infraestructura, reducir posibles fuentes de contaminación, fortalecer las actividades de operación y mantenimiento, preparar al personal ante emergencias y obtener información técnica de los elementos que no pudieron ser revisados directamente.

Finalmente, las medidas se organizaron de acuerdo con el componente al que corresponden: obra de captación, tanque sedimentador o línea de conducción. Para establecer su prioridad se consideró la importancia de cada condición y su posible efecto sobre la continuidad del servicio durante y después de una eventual erupción. De esta forma, se diferenciaron las acciones que requieren atención prioritaria de aquellas que pueden desarrollarse mediante seguimiento, verificaciones técnicas y mejoras progresivas en la gestión del sistema.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Resultados del objetivo 1

Como parte de la caracterización hidráulica del sistema de captación, se consideró el caudal de 34,43 L/s registrado en el Informe Técnico N.º IT-GADMICS-DSP-02-2025 del GAD [6] Municipal Intercultural del Cantón Saquisilí, correspondiente al caudal concesionado y utilizado

de la vertiente La Virgen. Debido a que el sistema no dispone de planos de diseño ni de información topográfica existente, se realizó la identificación y representación de la conducción existente, verificándose en campo una tubería de 315 mm de diámetro y determinándose una longitud aproximada de 277,89 m mediante el trazado desarrollado en Civil 3D. A partir de estos datos se calculó el área de la sección transversal de la tubería, correspondiente a $0,07793 \text{ m}^2$, y se estimó una velocidad media de 0,44 m/s para el caudal de 34,43 L/s. Estos resultados permiten caracterizar las condiciones hidráulicas de la conducción existente y complementar la evaluación de vulnerabilidad del sistema. En cuanto al tanque sedimentador, los técnicos del GAD señalaron verbalmente una capacidad aproximada de 400 m^3 ; sin embargo, al no contar con planos, memoria de cálculo u otra documentación técnica que permita verificar este valor, se lo consideró únicamente como información referencial y no se empleó para determinar parámetros hidráulicos derivados.

Por esta razón, no fue posible calcular el tiempo de retención hidráulica ni la carga superficial del sedimentador, parámetros que requieren de la verificación dimensional del tanque mediante planos o levantamiento directo.

4.5.2. Condiciones de operación y mantenimiento

La información obtenida mediante entrevista permitió verificar que el sistema cuenta con personal responsable de la operación y supervisión. Durante el periodo de evaluación, la obra de captación y el tanque sedimentador se encontraban en funcionamiento y permitían la operación normal del sistema de abastecimiento.

Las actividades de inspección y limpieza se realizan con una frecuencia aproximada de 15 días, lo que evidencia la existencia de actividades periódicas de mantenimiento. Sin embargo, estas actividades no se encuentran respaldadas mediante un programa formal o cronograma escrito que establezca su planificación, seguimiento y control.

Asimismo, no se verificaron registros documentales de las inspecciones y actividades de mantenimiento realizadas. Las reparaciones se ejecutan principalmente cuando se presentan fallas y de acuerdo con la disponibilidad de recursos materiales y económicos. Por tanto, se identificó una diferencia entre la existencia de actividades básicas de mantenimiento y la ausencia de mecanismos formales para su planificación y documentación.

En cuanto a la gestión y preparación para situaciones adversas, la entrevista permitió establecer que no se verificaron procedimientos específicos para la atención de emergencias relacionadas con

una posible erupción del volcán Cotopaxi. Tampoco se evidenció capacitación específica del operador en gestión de amenazas volcánicas. Estas condiciones fueron consideradas posteriormente dentro de la evaluación organizacional o administrativa.

6.1.1. Levantamiento topográfico del sistema

Durante la recopilación de información se comprobó que la entidad encargada de administrar el sistema no disponía de planos topográficos ni de los diseños originales de la obra de captación, la línea de conducción y el tanque sedimentador. Esta situación dificultaba conocer la ubicación y las características actuales de los componentes del sistema, así como su relación con el terreno.

Ante esta falta de información, se realizó un levantamiento topográfico georreferenciado de los principales componentes del sistema mediante un receptor GNSS. En campo se obtuvieron las coordenadas y cotas de los puntos considerados para representar la infraestructura existente. Posteriormente, la información fue procesada mediante Civil 3D, lo que permitió representar la captación, la línea de conducción y el tanque sedimentador de acuerdo con las condiciones encontradas durante el trabajo de campo.

A partir de esta información se pudo reconstruir el trazado de la conducción existente y determinar una longitud aproximada de 277,89 m. El levantamiento realizado permitió contar con información actualizada de la infraestructura, que posteriormente fue utilizada como base para la caracterización del sistema. Debido a que no existía información topográfica previa proporcionada por la entidad administradora, los datos obtenidos corresponden a las condiciones identificadas durante el levantamiento realizado para esta investigación.

La información generada puede servir como referencia para futuros estudios relacionados con las condiciones de la conducción, pendientes, comportamiento del terreno, análisis espacial de amenazas y planificación de intervenciones en la infraestructura.

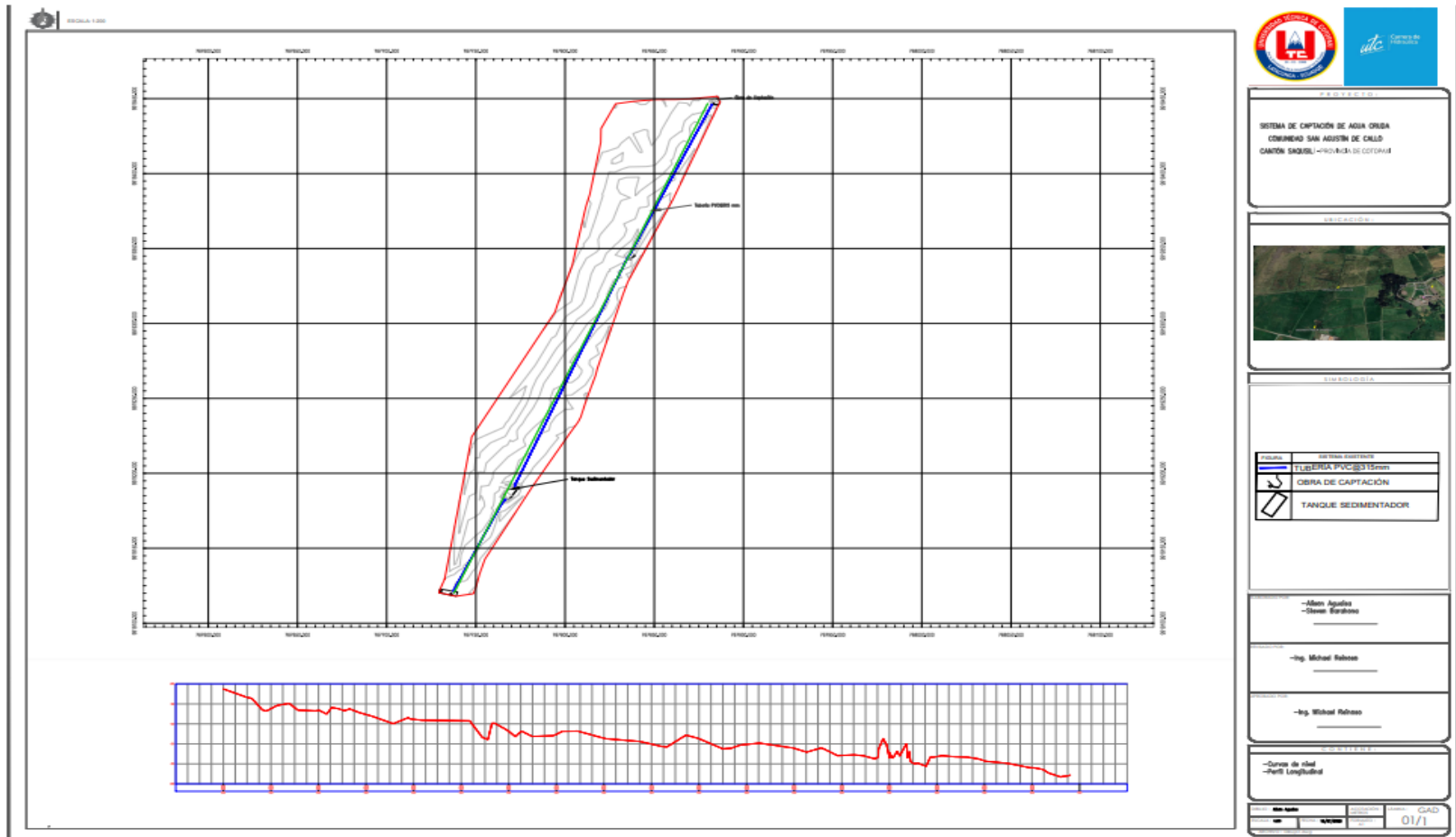


Figura 9. Plano topográfico de la zona de estudio.
Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

Tabla 16. Componentes inspeccionados del sistema

#	Descripción	Ubicación	Coordenadas UTM WGS84		Cota msnm
			Coordenada N	Coordenada E	
1	Captación actual	San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga	9919448.623	767882.061	3049
2	Tanque sedimentador	San Agustín de Callo, parroquia Mulaló, cantón Latacunga	9919186,60	767769,35	3045

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

6.1.2. Mapa Hidrológico

El análisis hidrológico permitió delimitar el área de estudio, reconocer la red de drenaje presente en la zona y ubicar el sistema de captación en función de las características topográficas del territorio. Tal como se aprecia en la **Figura 10**, el área analizada registra elevaciones que van desde los 3.039 hasta los 3.561 msnm., con una red de cauces que se distribuye de acuerdo con las condiciones naturales del relieve.

El sistema de captación se ubica, aproximadamente, en las coordenadas $X = 767883,00$ y $Y = 9919446,00$, señaladas mediante el punto azul en el mapa. Esta información constituyó la base espacial necesaria para relacionar, más adelante, la ubicación del sistema con las áreas de amenaza volcánica.

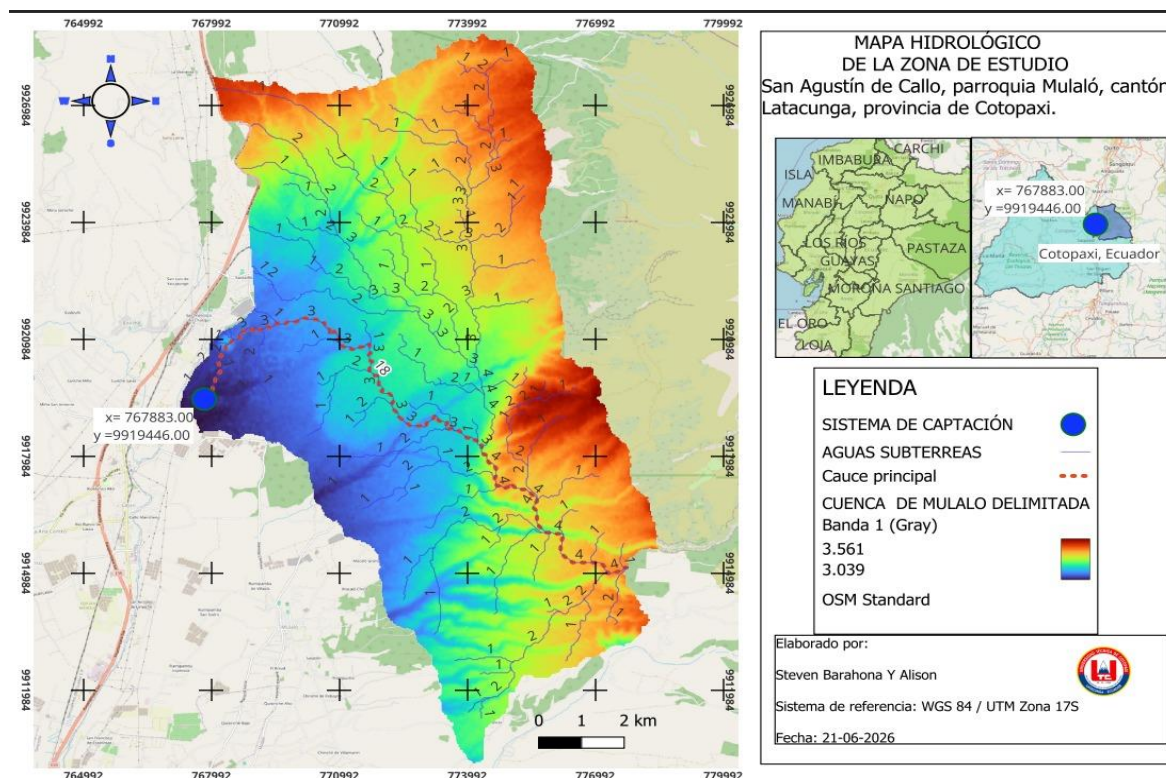


Figura 10: Mapa Hidrológico de la zona de estudio

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

6.1.3. Mapa de amenazas de lahares y flujos piroclásticos del volcán Cotopaxi

El análisis de la cartografía de amenazas permitió conocer la relación existente entre el sistema de captación de San Agustín de Callo y las zonas que podrían verse afectadas por la ocurrencia de lahares y flujos piroclásticos asociados a una posible actividad eruptiva del volcán Cotopaxi. En la **Figura 11**, el sistema de captación se encuentra dentro de una zona de amenaza alta, correspondiente al área proximal, debido a su ubicación cercana al flanco occidental del volcán Cotopaxi. Esta condición evidencia que, ante una eventual erupción, los fenómenos volcánicos podrían representar un riesgo importante para el funcionamiento y la continuidad del sistema de captación.

Entre las amenazas consideradas, los lahares adquieren especial importancia debido a su capacidad de desplazarse por los cauces y zonas de drenaje durante un evento eruptivo, dependiendo de la disponibilidad de agua y de los materiales volcánicos presentes. Por esta razón, su presencia en el área de estudio fue considerada principalmente como una condición de exposición del sistema, que posteriormente se relaciona con las condiciones de vulnerabilidad identificadas en los componentes evaluados.

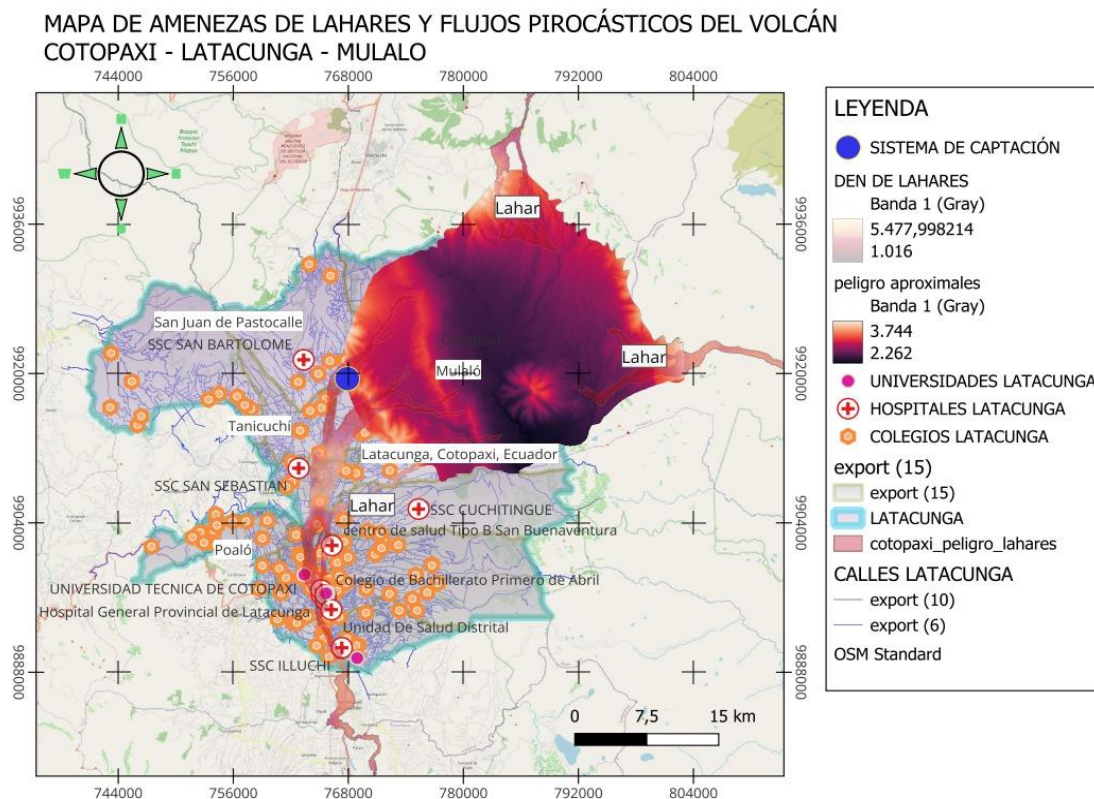


Figura 11: Mapa de amenazas por lahares y flujos piroclásticos del volcán Cotopaxi.

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

Cabe precisar que el presente estudio identifica y delimita espacialmente la amenaza por lahares mediante cartografía oficial y análisis SIG, lo que permite establecer que el sistema se ubica dentro de una zona de amenaza alta. Sin embargo, el estudio no incorpora la caracterización del lahar mediante parámetros de ingeniería (profundidad de flujo, velocidad, densidad de la mezcla o presión dinámica equivalente sobre las estructuras), por lo que no es posible, con la información actual, cuantificar la magnitud del impacto físico sobre la obra de captación y el tanque sedimentador. La determinación de estos parámetros requiere estudios hidráulicos especializados de flujos de lodo y detritos, que se recomiendan como línea de investigación futura previa al diseño de cualquier medida de protección estructural.

6.1.4. Mapa de amenaza por caída de ceniza del volcán Cotopaxi

El análisis del mapa de amenaza por caída de ceniza permitió identificar la relación entre la ubicación del sistema de captación y las zonas que podrían recibir depósitos de ceniza durante una eventual erupción del volcán Cotopaxi.

En la **Figura 12**, el sistema de captación se encuentra dentro del área susceptible a la caída de estos materiales volcánicos, lo que indica que sus componentes podrían estar expuestos a este fenómeno. La acumulación de ceniza podría afectar principalmente aquellos elementos que permanecen expuestos al ambiente y que no cuentan con medidas de protección adecuadas. Sin embargo, la presencia de esta amenaza no implica por sí sola un determinado nivel de vulnerabilidad, ya que sus posibles efectos dependen de las condiciones físicas, funcionales y de protección de cada componente.

Mapa de amenaza por caída de ceniza volcánica de la zona de estudio

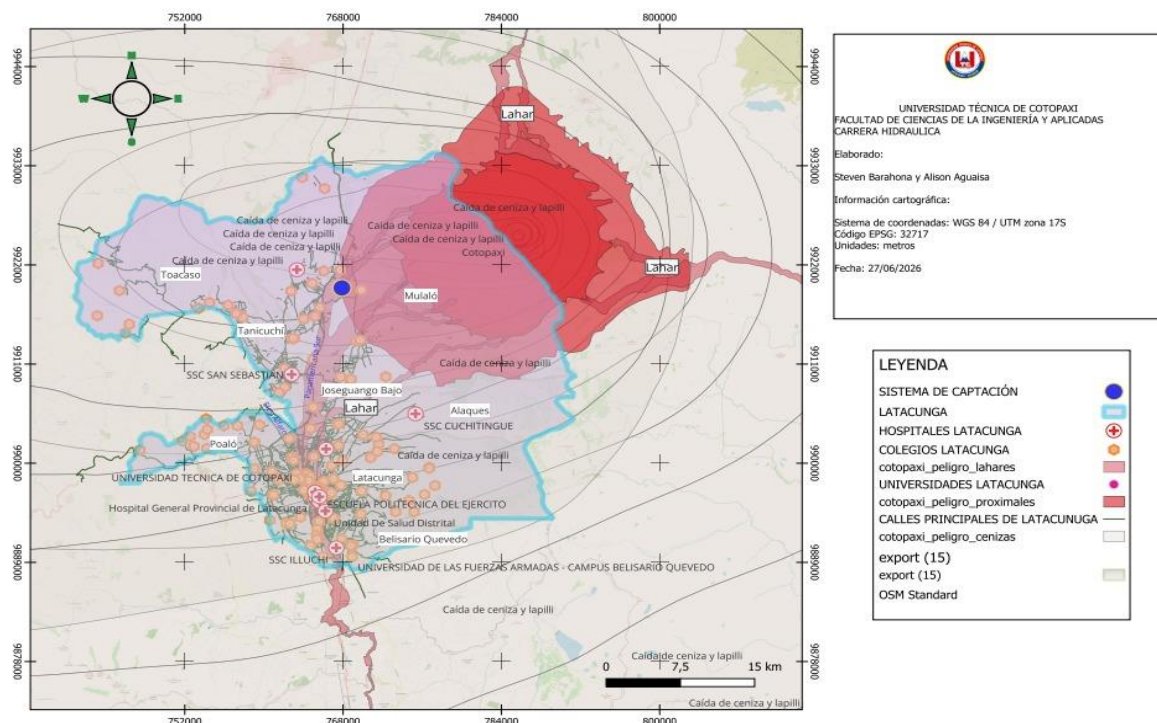


Figura 12: Mapa de amenazas por caída de ceniza del volcán Cotopaxi

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

6.1.5. Mapa de exposición volcánica en el sistema de captación de San Agustín de Callo.

La integración de la información cartográfica permitió elaborar el mapa de exposición volcánica presentado en la **Figura 13**, mediante el cual se relacionó la ubicación del sistema de captación con las zonas asociadas a los fenómenos volcánicos considerados.

El resultado muestra que el sistema se encuentra localizado en un territorio condicionado por la presencia de amenazas volcánicas, destacándose la amenaza latente por lahares y la caída de

ceniza. La condición territorial de San Agustín de Callo, localizada en una zona de amenaza alta y próxima al flanco occidental del volcán Cotopaxi.

De esta manera, el análisis de exposición permitió establecer dónde y frente a qué fenómenos se encuentra expuesto el sistema.

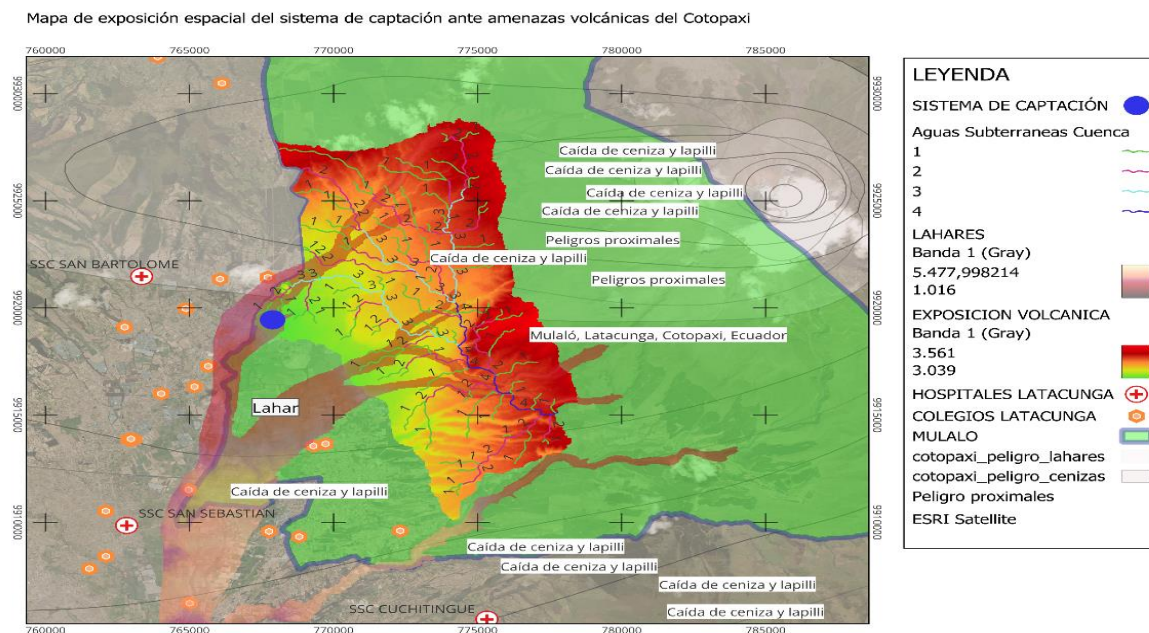


Figura 13: Mapa de exposición espacial del sistema de captación ante amenazas volcánicas del Cotopaxi

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

6.2. Resultados del objetivo 2.

6.2.1. Evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación.

Tabla 17: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación mediante el método AHP.

Indicador evaluado	Índice de condición (IC)	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Muros de ala	4,80	0,34	Desprendimiento del concreto	4
Caja de recolección	3,50	0,51	Elementos de protección física	1

Tubería de conducción	N/V	0,00	Estado físico, uniones y protección física	N/V
Canal (acequia)	4,67	0,15	Erosión del fondo y paredes	4
Índice de condición ponderado	4,12	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación de la obra de captación permitió determinar las condiciones de los componentes que pudieron ser inspeccionados directamente. Los muros de ala presentaron un IC de 4,80, la caja de recolección un IC de 3,50 y el canal (acequia) un IC de 4,67. En el caso de la tubería de conducción, los elementos evaluados fueron considerados N/V, debido a que la tubería se encuentra enterrada y no fue posible verificar directamente su estado físico, sus uniones ni su protección.

Debido a esta condición, el peso AHP correspondiente a la tubería de conducción (0,15) no fue utilizado directamente en el cálculo del índice de condición. Para mantener la consistencia de la ponderación, dicho peso fue redistribuido uniformemente entre los tres componentes que sí pudieron ser evaluados, asignándose 0,05 adicional a cada uno. De esta manera, los pesos finales fueron de 0,34 para los muros de ala, 0,51 para la caja de recolección y 0,15 para el canal, cuya suma corresponde al 100 % de la ponderación considerada.

El componente con menor IC fue la caja de recolección (3,50). Dentro de este componente, el elemento con menor calificación correspondió a los elementos de protección física, con una puntuación de 1/5, debido principalmente a la ausencia de una tapa de protección. En los muros de ala, la menor calificación correspondió al desprendimiento del concreto (4/5), mientras que en el canal la menor puntuación correspondió a la erosión del fondo y paredes (4/5).

Tabla 18: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad física de la obra de captación

Tipo de vulnerabilidad	Índice de condición (IC)	Vulnerabilidad ($V = 6 - IC$)	Estado de la infraestructura	Nivel de vulnerabilidad
Vulnerabilidad física	4,12	1,88	Bueno	Baja

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 18)** se puede observar el resultado de la evaluación de la vulnerabilidad física. Si bien la infraestructura presenta condiciones favorables en términos generales, la evaluación permitió identificar deficiencias puntuales, principalmente en la protección física de la caja de recolección, por lo que este componente constituye la principal prioridad para acciones de mantenimiento y mejora **(ver Anexo 7: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación)**.

6.2.2. Evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación

Tabla 19: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación mediante el método AHP.

Indicador evaluado	Índice de condición (IC)	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Muros de ala	5,00	0,43	Ingreso de agua / continuidad hidráulica	5
Caja de recolección	5,00	0,26	Funcionamiento	5
Tubería de conducción	N/V	0,00	Fugas y obstrucciones	N/V
Operación	1,00	0,16	Disponibilidad de fuente alternativa de abastecimiento	1
Mantenimiento	4,00	0,15	Preventivo / correctivo	4
Índice de condición ponderado	4,19	1		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación permitió determinar las condiciones de funcionamiento de los componentes que pudieron ser verificados mediante observación directa, pruebas operativas, registro fotográfico y entrevista al responsable. Los muros de ala y la caja de recolección presentaron un IC de 5,00, correspondiente a un estado Muy bueno, evidenciándose un adecuado ingreso y continuidad del agua, así como un funcionamiento continuo de la caja de recolección.

En el caso de la tubería de conducción, algunos elementos fueron considerados N/V, debido a que la tubería se encuentra enterrada y no fue posible verificar directamente su estado físico. No obstante, mediante la prueba de funcionamiento se pudo constatar que el agua se transporta de manera continua hacia el tanque sedimentador. Debido a que los elementos de fugas y obstrucciones no pudieron ser verificados directamente, el indicador fue considerado N/V para efectos de su ponderación.

Debido a esta condición, el peso AHP correspondiente a la tubería de conducción (0,19) no fue utilizado directamente en el cálculo del índice de condición. Para mantener la consistencia de la ponderación, este peso fue redistribuido uniformemente entre los cuatro indicadores que sí pudieron ser evaluados, asignándose aproximadamente 0,0475 adicional a cada indicador. Luego de la redistribución y redondeo, los pesos finales fueron de 0,43 para muros de ala, 0,26 para caja de recolección, 0,16 para operación y 0,15 para mantenimiento, cuya suma corresponde al 100 % de la ponderación considerada.

El componente que presentó el menor IC fue Operación, con un valor de 1,00, correspondiente a un estado Muy malo. La principal deficiencia se relacionó con la disponibilidad de una fuente alternativa de abastecimiento, debido a que el sistema no dispone de una fuente de respaldo que permita mantener la continuidad del servicio ante una posible afectación de la fuente principal. Por otra parte, el indicador de Mantenimiento obtuvo un IC de 4,00, correspondiente a un estado Bueno, debido a que se realizan actividades preventivas y correctivas, aunque se identificó la ausencia de un plan formal de mantenimiento y ligeros retrasos en algunas reparaciones.

Tabla 20: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación

Tipo de vulnerabilidad	Índice de condición (IC)	Vulnerabilidad (V = 6 – IC)	Estado de la infraestructura	Nivel de vulnerabilidad
------------------------	--------------------------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------

Vulnerabilidad funcional u operativa	4,19	1,81	Bueno	Baja
--------------------------------------	------	------	-------	------

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona.

En la **(tabla 20)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa. Si bien la infraestructura presenta condiciones favorables en cuanto al ingreso, continuidad y conducción del agua, la evaluación permitió identificar una deficiencia importante en el indicador de Operación, específicamente por la inexistencia de una fuente alternativa de abastecimiento. Asimismo, se identificó que las actividades de mantenimiento se realizan de manera periódica, pero requieren fortalecerse mediante la implementación de un plan formal de mantenimiento preventivo y correctivo. Estos aspectos constituyen las principales condiciones a considerar para mejorar la capacidad operativa de la obra de captación y reducir su vulnerabilidad ante posibles interrupciones del servicio **(ver Anexo 8: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación)**.

6.2.3. Evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación

Tabla 21: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación mediante el método AHP.

Indicador evaluado	Índice de condición (IC)	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Entorno de la captación	4,00	0,15	—	—
Fuente de abastecimiento (acequia)	3,50	0,41	Acumulación de sedimentos	3
Protección ambiental	1,00	0,35	Área de protección / Actividades antrópicas	1

Estado del entorno	1,00	0,09	Alteración del entorno / Focos de contaminación	1
Índice de condición ponderado	2,47	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación ambiental mostró que el entorno de la captación presenta una condición buena, con un IC de 4,00, debido a la presencia de cobertura vegetal y a la estabilidad observada del terreno. La Fuente de abastecimiento obtuvo 3,50, ya que, aunque existe una ligera acumulación de sedimentos y vegetación acuática, no se observó una obstrucción significativa del caudal. Las principales deficiencias se encontraron en Protección ambiental y Estado del entorno, ambos con un IC de 1,00. En campo se verificó que la captación no cuenta con un área de protección ni cerramiento, y que en sus alrededores se desarrollan actividades agrícolas y de pastoreo.

Tabla 22: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad ambiental de la obra de captación

Tipo de vulnerabilidad	Índice de condición (IC)	Vulnerabilidad ($V = 6 - IC$)	Estado de la infraestructura	Nivel de vulnerabilidad
Vulnerabilidad ambiental	2,47	3,53	Malo	Alta

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 22)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad ambiental. El resultado se relaciona principalmente con la falta de protección del área de captación y con las actividades agrícolas y de pastoreo presentes en el entorno, que pueden afectar las condiciones del recurso hídrico. **(ver Anexo 9: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación).**

6.2.4. Evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa de la obra de captación

Tabla 23: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad organizativa o administrativa de la obra de captación mediante el método AHP.

Indicador evaluado	IC	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Gestión de la operación	4,50	0,24	Supervisión administrativa	4
Mantenimiento	2,00	0,16	Programa de mantenimiento	1
Registros técnicos	1,00	0,06	Registro de inspecciones y mantenimiento	1
Preparación ante emergencias	1,00	0,26	Procedimiento y herramientas	1
Capacitación	1,00	0,11	Capacitación del operador	1
Comunicación	3,50	0,08	Comunicación de novedades	3
Recursos	3,00	0,05	Materiales y recursos económicos	3
Control administrativo	4,00	0,03	Evaluación del funcionamiento	4
IC ponderado	2,40	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación organizacional o administrativa mostró que la Gestión de la operación presenta una condición muy buena, con un IC de 4,50, debido a la existencia de un responsable encargado de la operación y supervisión de la obra. El Control administrativo obtuvo 4,00, mientras que la Comunicación alcanzó 3,50, aunque se identificó una gestión principalmente verbal de las novedades.

Las principales deficiencias se encontraron en Registros técnicos, Preparación ante emergencias y Capacitación, todos con un IC de 1,00. En campo y mediante la entrevista se verificó la falta

de registros de inspección y mantenimiento, procedimientos para actuar ante emergencias y capacitación del operador en gestión del riesgo.

Tabla 24:Resultado de la evaluación de vulnerabilidad organizacional o administrativa de la obra de captación.

Tipo de vulnerabilidad	IC	$V = 6 - IC$	Estado	Nivel
Vulnerabilidad organizacional o administrativa	2,40	3,60	Malo	Alta

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 24)** se muestran los resultados de la evaluación de vulnerabilidad organizacional o administrativa, Las principales limitaciones corresponden a la falta de registros técnicos, preparación ante emergencias y capacitación del operador. **(ver Anexo 10: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa de la obra de captación).**

6.2.5. Evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador

Tabla 25:Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador mediante el método AHP.

Indicador evaluado	IC	Peso AHP (w_i)	Elemento con menor calificación	Calificación
Muros estructurales	4,33	0,29		
Fondo del tanque	4,50	0,11		
Sistema de ingreso	5,00	0,05		
Compuertas de control	3,00	0,08		
Sistema de salida	5,00	0,05		

Protección del tanque	1,00	0,21	Cubierta	1
Estado de conservación	4,00	0,06		
Condición general de la infraestructura	4,50	0,15		
IC ponderado	3,62	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación de la vulnerabilidad física mostró que el Sistema de ingreso y el Sistema de salida presentan una condición muy buena, ambos con un IC de 5,00, debido a que no se identificaron daños visibles que afecten su funcionamiento. El Fondo del tanque y la Condición general de la infraestructura obtuvieron un IC de 4,50, mientras que los Muros estructurales alcanzaron 4,33, reflejando condiciones físicas favorables.

La principal deficiencia se encontró en la Protección del tanque, con un IC de 1,00, debido a la ausencia de una cubierta que proteja la estructura frente al ingreso de ceniza volcánica y otros materiales durante una eventual erupción del volcán Cotopaxi. También se identificaron condiciones regulares en las compuertas de control, relacionadas con desgaste superficial y corrosión.

Tabla 26: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad física del tanque sedimentador

Tipo de vulnerabilidad	IC	$V = 6 - IC$	Estado	Nivel
Vulnerabilidad física	3,62	2,38	Bueno	Baja

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 26)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad física del tanque sedimentador. La principal limitación identificada corresponde a la ausencia de cubierta en el tanque, por lo que esta condición requiere atención para mejorar su protección. **(ver Anexo 12: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador).**

6.2.6. Evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador

Tabla 27: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador mediante el método AHP.

Indicador evaluado	IC	Peso AHP (w_i)	Elemento con menor calificación	Calificación
Ingreso del agua	4,33	0,37	Obstrucciones	3
Proceso de sedimentación	4,00	0,20	Acumulación de lodos	3
Control hidráulico	5,00	0,12		
Salida del agua	5,00	0,19		
Limpieza del tanque	4,00	0,06		
Operatividad del sistema	4,00	0,06		
IC ponderado	4,44	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación funcional u operativa mostró que el Control hidráulico y la Salida del agua presentan una condición muy buena, con un IC de 5,00. El Ingreso del agua obtuvo un IC de 4,33, mientras que el Proceso de sedimentación, la Limpieza del tanque y la Operatividad del sistema alcanzaron un IC de 4,00, reflejando condiciones favorables para el funcionamiento del tanque.

Las menores calificaciones se encontraron en Obstrucciones y Acumulación de lodos, ambas con una calificación de 3, debido a la presencia de vegetación y sedimentos que requieren limpieza periódica. Estas condiciones no afectan actualmente de forma significativa la operación del tanque, pero deben mantenerse bajo control mediante actividades de mantenimiento.

Tabla 28: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador

Tipo de vulnerabilidad	IC	$V = 6 - IC$	Estado	Nivel
------------------------	----	--------------	--------	-------

Vulnerabilidad funcional u operativa	4,44	1,56	Muy bueno	Muy baja
--------------------------------------	------	------	-----------	----------

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 28)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador. Aunque se identificó acumulación de sedimentos y vegetación, el tanque mantiene condiciones adecuadas de funcionamiento debido a las labores periódicas de limpieza y mantenimiento. Sin embargo, se recomienda reforzar y, de ser necesario, aumentar la frecuencia de estas actividades para evitar una mayor acumulación y conservar la eficiencia del proceso de sedimentación. **(ver Anexo 13: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador).**

6.2.7. Evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador

Tabla 29: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador mediante el método AHP.

Indicador evaluado	IC	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Entorno	4,50	0,08		
Protección ambiental	1,00	0,41	Área de protección / Actividades antrópicas	1 / 1
Calidad ambiental	3,00	0,25	Presencia de animales	1
Estado del entorno	1,00	0,09	Alteración del entorno / Presencia de focos de contaminación	1 / 1

Condiciones sanitarias del entorno	2,50	0,17	Limpieza	2
IC ponderado	2,04	1,00		

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

La evaluación ambiental mostró que el entorno presenta una condición muy buena, con un IC de 4,50, debido a la presencia de cobertura vegetal y a la estabilidad observada del terreno. La calidad ambiental obtuvo un IC de 3,00, ya que no se observaron residuos sólidos, aunque se identificó presencia de animales.

Las principales deficiencias se encontraron en Protección ambiental y Estado del entorno, ambas con un IC de 1,00. Durante la inspección se verificó que el tanque no cuenta con un área de protección delimitada y que existen actividades agrícolas y pecuarias en sus alrededores. También se identificaron condiciones sanitarias deficientes, con un IC de 2,50, debido a la necesidad de mejorar la limpieza del entorno.

Tabla 30: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador

Tipo de vulnerabilidad	IC	$V = 6 - IC$	Estado	Nivel
Vulnerabilidad ambiental	2,04	3,96	Malo	Alta

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

En la **(tabla 30)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador, Las principales limitaciones se relacionan con la falta de un área de protección, la presencia de actividades agrícolas y pecuarias y las condiciones deficientes de limpieza del entorno. Se recomienda mejorar la protección perimetral y reforzar las actividades de limpieza para reducir los posibles riesgos de contaminación y conservar las condiciones del área circundante. **(ver Anexo 14: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador).**

6.2.8. Evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador

Tabla 31: Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador mediante el método AHP.

Indicador evaluado	IC	Peso AHP (wi)	Elemento con menor calificación	Calificación
Organización operativa	5,00	0,19		
Mantenimiento	2,00	0,22	Programa de mantenimiento	1
Registros	1,00	0,07	Inspecciones / Mantenimiento	1 / 1
Capacitación	1,50	0,11	Gestión del riesgo	1
Recursos disponibles	2,00	0,04	Herramientas	1
Comunicación	2,00	0,08	Reporte de fallas	2
Emergencias	1,00	0,23	Procedimientos de emergencia	1
Control	3,00	0,06	Seguimiento y evaluación	3
IC ponderado	2,26	1,00		

Elaborado por: Alison Aguisa y Steven Barahona

La evaluación organizacional o administrativa mostró que la Organización operativa presenta una condición muy buena, con un IC de 5,00, debido a que existe un responsable encargado de la operación y supervisión del tanque. El Control obtuvo un IC de 3,00, mientras que Mantenimiento, Recursos disponibles y Comunicación alcanzaron un IC de 2,00.

Las principales deficiencias se encontraron en Registros y Emergencias, ambos con un IC de 1,00, debido a la falta de registros de inspección y mantenimiento y a la ausencia de procedimientos para actuar ante una posible erupción del volcán Cotopaxi. También se identificaron limitaciones en la Capacitación, con un IC de 1,50, principalmente por la falta de capacitación específica en gestión del riesgo.

Tabla 32: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador

Tipo de vulnerabilidad	IC	$V = 6 - IC$	Estado	Nivel
Vulnerabilidad organizacional o administrativa	2,26	3,74	Malo	Alta

Elaborado por: Alison Aguisa y Steven Barahona

En la **(tabla 32)** se muestra los resultados de la evaluación de vulnerabilidad organizativa o administrativa del tanque sedimentador, Las principales limitaciones se relacionan con la falta de registros, procedimientos de emergencia, capacitación específica y recursos para atender situaciones que puedan afectar el funcionamiento del tanque. Se recomienda fortalecer estos aspectos para mejorar la capacidad de respuesta y mantener la operación del sistema ante posibles eventos adversos. **(ver el Anexo 15: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional o administrativa del tanque sedimentador).**

6.2.9. Vulnerabilidad integral mediante AHP del sistema de captación

La evaluación integral mediante el método AHP determinó un IC global de 3,68 y una vulnerabilidad de 2,32, correspondiente a un nivel de vulnerabilidad bajo. Este resultado indica que, al considerar de manera conjunta los diferentes componentes e indicadores evaluados, predominan condiciones favorables en el sistema de captación. Sin embargo, el nivel de vulnerabilidad obtenido no significa que la infraestructura se encuentre en condiciones óptimas ni que esté libre de deficiencias.

Durante la evaluación se identificaron varias condiciones que requieren atención, principalmente en los aspectos ambientales y administrativos, así como en determinados elementos físicos y funcionales. Entre ellas se encuentran la falta de protección del tanque sedimentador, la presencia de actividades agrícolas y pecuarias en el entorno, la ausencia de registros técnicos, la falta de procedimientos específicos ante emergencias y las necesidades de mantenimiento identificadas durante las inspecciones.

Por tanto, el resultado global de vulnerabilidad baja debe interpretarse como una condición general del sistema y no como ausencia de riesgo o de problemas. Las deficiencias identificadas requieren acciones de mantenimiento, protección y fortalecimiento de la gestión, especialmente aquellas que pueden afectar la continuidad y seguridad del servicio. **(ver el Anexo 16) Resultado del cálculo AHP integral de la vulnerabilidad del sistema de captación**

6.3. Identificación y evaluación de los posibles impactos sobre la infraestructura y el servicio de agua potable

Esta matriz retoma los tres elementos que se diferenciaron en el apartado de trazabilidad entre amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad: qué fenómeno volcánico puede ocurrir (lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza, delimitados mediante cartografía oficial procesada en QGIS), dónde está ubicado el sistema respecto a esos fenómenos (mapa de exposición) y qué tan preparado está cada componente para resistirlos (evaluación AHP). Cruzando estos tres puntos surge la columna de posible impacto; en ningún caso se trata de daños ya ocurridos, sino de una relación de probabilidad construida sobre resultados reales del estudio.

Cada dato de la tabla tiene un origen puntual dentro de la investigación: la zona de amenaza alta por lahares y flujos piroclásticos corresponde a la **Figura 11**; el área susceptible a ceniza, a la **Figura 12**. La caja de recolección sin tapa aparece en la **Tabla 17**; la falta de una fuente alternativa de abastecimiento, en la **Tabla 19**; el tanque sedimentador sin cubierta, en la **Tabla 25**; y las deficiencias de protección ambiental en ambos componentes, en las **Tablas 21 y 29**. Los índices globales (obra de captación IC = 3,79; tanque sedimentador IC = 3,57; sistema completo IC = 3,68; vulnerabilidad = 2,32, nivel bajo) provienen del apartado de vulnerabilidad integral mediante AHP.

Tabla 33: Identificación de impactos amenaza, infraestructura y servicio

Amenaza	Infraestructura expuesta	Posible impacto sobre la infraestructura	Posible afectación al servicio
Lahares	Obra de captación (caja de recolección y canal), tubería de conducción y tanque sedimentador	Los sedimentos y materiales volcánicos podrían acumularse y obstruir la caja de recolección y el canal. Los elementos que no cuentan con protección quedarían más expuestos a posibles daños físicos.	El abastecimiento podría reducirse o interrumpirse, especialmente debido a que el sistema no cuenta con una fuente alternativa.
Flujos piroclásticos	Obra de captación y tanque sedimentador, ubicados dentro de la zona de amenaza alta, correspondiente al área proximal del flanco occidental del volcán	Los elementos estructurales expuestos podrían sufrir daños severos. No se cuenta con parámetros de ingeniería del flujo que permitan dimensionar con precisión el impacto.	El servicio podría interrumpirse; sin embargo, con la información disponible no es posible estimar la duración de la interrupción.

Caída de ceniza	Obra de captación y tanque sedimentador, ambos ubicados dentro del área susceptible según la cartografía oficial	La ceniza podría acumularse en la caja de recolección, que no cuenta con tapa, y en el tanque sedimentador, que no dispone de cubierta, afectando las condiciones normales de operación.	La calidad del agua podría disminuir y el servicio podría interrumpirse temporalmente mientras se realizan las actividades de limpieza correspondientes.
------------------------	--	--	--

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

El nivel de vulnerabilidad global calculado es bajo, pero eso no significa ausencia de riesgo: las carencias puntuales detectadas en campo caja de recolección sin tapa, tanque sin cubierta, falta de una fuente alternativa y ausencia de un área de protección delimitada son precisamente los puntos donde, si llegara a presentarse alguna de estas tres amenazas, el daño físico tendría más probabilidad de traducirse en una interrupción real del servicio. Vale aclarar que ninguna de estas amenazas se manifestó durante el periodo en que se desarrolló el estudio; lo que aquí se plantea parte de la ubicación confirmada del sistema dentro de las zonas de amenaza y de las condiciones de vulnerabilidad ya evaluadas, no de eventos que efectivamente hayan ocurrido.

6.4. Resultados del objetivo 3:

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación de vulnerabilidad del sistema de captación de agua, se formularon medidas de prevención y mitigación orientadas a reducir las condiciones identificadas en la obra de captación y el tanque sedimentador, así como a fortalecer la capacidad del sistema para mantener y recuperar su operatividad ante un eventual evento eruptivo del volcán Cotopaxi.

La formulación de las medidas consideró los resultados obtenidos en las dimensiones física, funcional, administrativa y ambiental, las condiciones observadas durante la inspección de campo y la exposición territorial de la infraestructura frente a las amenazas volcánicas identificadas. Entre estas amenazas se consideraron principalmente los lahares y la caída de ceniza. Adicionalmente, se tomó en cuenta la presencia de actividades ganaderas en el entorno de la fuente y la ausencia de un cerramiento de protección en la captación, debido a que estas condiciones pueden favorecer el ingreso de animales y generar alteraciones en el entorno inmediato de la fuente.

Las recomendaciones fueron diferenciadas en dos grupos. Las medidas de prevención corresponden a las acciones que pueden ejecutarse antes de un eventual evento eruptivo para fortalecer la preparación, reducir condiciones de exposición y mejorar la capacidad de respuesta. Las medidas de mitigación se orientan a disminuir las consecuencias de una eventual afectación

sobre la infraestructura y el funcionamiento del sistema, así como a facilitar la recuperación de la operación después del evento.

6.4.1. Medidas de prevención

Las medidas de prevención propuestas se definieron a partir de los resultados de la evaluación de vulnerabilidad y del análisis de las amenazas identificadas en el área de estudio. Su finalidad es reducir las condiciones que podrían afectar al sistema de captación, mejorar la preparación ante una emergencia y proteger tanto la infraestructura como el entorno de la fuente.

Como primera medida, realizar un estudio hidrogeológico e hidrológico de la vertiente, acompañado de aforos durante las épocas seca y lluviosa. La evaluación realizada permitió conocer las condiciones actuales de la infraestructura, pero no permite determinar el origen de la vertiente, su zona de recarga ni su comportamiento a lo largo del año. Por ello, este estudio permitiría conocer la variación del caudal y establecer una línea base para realizar un seguimiento de la fuente. Esta no significa que la vertiente necesariamente vaya a secarse ante una erupción del Cotopaxi, sino que busca generar información técnica que permita reducir la incertidumbre sobre su comportamiento.

También se propone elaborar un plan de contingencia o protocolo de actuación ante eventos eruptivos, en el que se establezcan las acciones que deben ejecutarse antes, durante y después de una emergencia. Este documento deberá definir responsabilidades, procedimientos de inspección, mantenimiento, limpieza, comunicación y recuperación del sistema, así como las acciones necesarias para restablecer el servicio después de una afectación.

De manera complementaria, se recomienda fortalecer la capacitación del operador en procedimientos específicos para situaciones de emergencia, especialmente en la inspección de los componentes, limpieza después de la caída de ceniza, identificación de posibles daños y recuperación de la infraestructura. Asimismo, se considera necesario identificar una alternativa temporal de abastecimiento que pueda activarse si la fuente o la infraestructura presentan una afectación que provoque una interrupción temporal del servicio.

En cuanto a la infraestructura, se recomienda considerar medidas de protección y/o reforzamiento de los componentes expuestos a lahares. Esta acción deberá desarrollarse mediante un diseño técnico posterior, utilizando los resultados de la presente evaluación y considerando las características de la amenaza y las condiciones particulares del sitio.

Otra medida importante corresponde a la protección del entorno inmediato de la captación. Debido a la presencia de actividades ganaderas y a la ausencia de un cerramiento, se propone construir una malla o cerramiento de protección y delimitar el área de la fuente. Esta acción permitirá controlar el ingreso de animales y disminuir la posibilidad de incorporación de materia orgánica, sedimentos u otros contaminantes al área de captación.

Considerando la exposición identificada frente a lahares y caída de ceniza, estas amenazas deberán incorporarse en futuros proyectos de ampliación, rehabilitación o construcción de infraestructura. En caso de construirse un nuevo tanque, se recomienda realizar previamente un análisis de amenaza y emplazamiento, priorizando, cuando sea posible, sectores con menor exposición. Si la ubicación no puede modificarse, el diseño deberá incorporar medidas de protección acordes con las amenazas identificadas.

Las medidas propuestas se presentan en la **Tabla 33**, donde se detallan la amenaza controlada, prioridad, responsable, plazo e indicador de cumplimiento.

La prioridad asignada a cada medida no responde a una apreciación arbitraria, sino que se sustenta en los propios resultados de la investigación. Se consideró como criterio principal la gravedad del posible impacto identificado en la matriz amenaza-infraestructura-servicio, la ubicación del sistema dentro de las zonas de amenaza delimitadas en las Figuras 11 , y el nivel de deficiencia detectado durante la evaluación de vulnerabilidad mediante AHP, donde varios indicadores obtuvieron el valor más bajo posible ($IC = 1,00$). Bajo este criterio, se clasificaron como prioridad alta aquellas medidas dirigidas a componentes que actualmente no cuentan con ningún tipo de protección, mientras que se consideraron de prioridad media las relacionadas con afectaciones de menor recurrencia o impacto más acotado.

Respecto a los plazos, se estableció el corto plazo entre 0 y 6 meses, para medidas de prioridad alta que pueden ejecutarse con los recursos disponibles en el corto tiempo; y el mediano plazo entre 6 y 24 meses, para aquellas que requieren estudios previos, diseño técnico o gestión de recursos adicionales, como es el caso del estudio hidrogeológico o la implementación de la fuente alternativa de abastecimiento.

Tabla 34: Medidas de prevención propuestas

Medida	Amenaza/condición controlada	Prioridad	Prediseño requerido	Responsable	Plazo	Indicador
--------	------------------------------	-----------	---------------------	-------------	-------	-----------

Estudio hidrogeológico e hidrológico de la vertiente	Variación del caudal y desconocimiento del comportamiento de la fuente	Alta	Términos de referencia, campaña de aforos y caracterización de la fuente	GAD / entidad técnica competente	Mediano	Estudio realizado y caudal caracterizado
Cerramiento de protección de la captación	Ingreso de animales y posible afectación del entorno de la fuente	Alta	Delimitación del área de protección, ubicación y longitud del cerramiento	GAD / Junta administradora	Corto	Área delimitada y accesos no autorizados restringidos
Plan de contingencia	Interrupción del servicio y respuesta desorganizada ante una erupción	Alta	Protocolos, responsables y procedimientos de actuación	GAD / Junta administradora	Corto	Plan elaborado y socializado
Capacitación del operador	Fallas de operación y respuesta inadecuada durante una emergencia	Media	Programa de capacitación y protocolos de actuación	GAD / Junta administradora	Corto	Operador capacitado
Alternativa de abastecimiento temporal	Falla total o interrupción del sistema	Alta	Identificación de fuente alternativa, almacenamiento y logística	GAD / Junta administradora	Mediano	Autonomía disponible en horas o días
Protección y/o reforzamiento de componentes expuestos	Lahares	Alta	Diseño técnico de protección según las condiciones del sitio y la amenaza	GAD / entidad técnica competente	Mediano	Diseño de protección elaborado
Criterios de emplazamiento para futuras obras	Lahares y caída de ceniza	Alta	Análisis de amenaza, emplazamiento y criterios de diseño	GAD / entidad técnica competente	Antes de nuevos proyectos	Amenazas incorporadas en el diseño

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

Los resultados de la matriz muestran que las medidas de prevención se concentran principalmente en tres aspectos: generación de información técnica, fortalecimiento de la preparación y reducción de la exposición. El estudio hidrogeológico e hidrológico permitiría mejorar el

conocimiento sobre la fuente y establecer una línea base de su comportamiento, mientras que el plan de contingencia, la capacitación y la identificación de un abastecimiento alternativo contribuirían a fortalecer la capacidad de respuesta ante una eventual emergencia.

Por otra parte, la construcción del cerramiento de la captación representa una medida preventiva importante debido a las actividades ganaderas existentes en el entorno. Esta intervención permitiría controlar físicamente el acceso al área de captación y reducir las condiciones de exposición relacionadas con el ingreso de animales. Su implementación debería complementarse con inspecciones periódicas del área para verificar el estado del cerramiento y las condiciones del entorno.

La consideración de las amenazas volcánicas en futuras obras constituye además una medida de prevención de carácter estratégico. Los resultados obtenidos muestran que la gestión del riesgo no debe limitarse a la infraestructura existente, sino que debe incorporarse desde la etapa de planificación y diseño de nuevas obras. En este sentido, un futuro tanque de almacenamiento no debería ser proyectado únicamente a partir de criterios hidráulicos o estructurales, sino considerando también las condiciones de amenaza por lahares y caída de ceniza presentes en el territorio.

6.4.2. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación se plantearon considerando las posibles consecuencias que un eventual evento eruptivo podría generar sobre la infraestructura, la fuente y la continuidad del funcionamiento del sistema. Estas medidas buscan disminuir los efectos de las amenazas identificadas y facilitar la recuperación de la operación una vez ocurrido el evento.

Una de las principales medidas corresponde al pre diseño de una cubierta de protección para el tanque sedimentador. Esta recomendación se deriva directamente de la condición observada durante la evaluación, debido a que actualmente el tanque no cuenta con cubierta superior. Esta condición genera exposición directa ante la caída de ceniza y otros contaminantes ambientales. Antes de su construcción definitiva, este pre diseño deberá determinar la carga de ceniza en condición seca y húmeda y su combinación con lluvia, la pendiente de la cubierta para facilitar el escurrimiento del material acumulado, los requerimientos de ventilación y acceso para mantenimiento, y la verificación estructural de los muros existentes frente a las nuevas cargas socavación, empuje, impacto y estabilidad, con el fin de establecer si es viable reforzar la estructura actual o si se requiere una solución constructiva alternativa. La implementación de

esta cubierta permitiría disminuir el ingreso directo de material particulado y proteger el agua almacenada frente a este tipo de exposición.

En cuanto a la amenaza de lahares, se plantea ejecutar las medidas de protección y/o reforzamiento definidas mediante el diseño técnico correspondiente, tomando como base los resultados obtenidos en la evaluación física de la infraestructura y las condiciones de amenaza identificadas. Debido a las características de los lahares, la solución deberá responder específicamente a las condiciones del sitio y no establecerse como una medida genérica. Por esta razón, la propuesta se orienta a que las intervenciones futuras sean técnicamente diseñadas de acuerdo con la amenaza identificada.

En caso de producirse caída de ceniza, se recomienda realizar la inspección y limpieza de la captación y del tanque sedimentador una vez que las condiciones permitan ejecutar estas actividades de manera segura. La finalidad será identificar acumulaciones de material, obstrucciones, afectaciones físicas o condiciones que puedan limitar el funcionamiento de los componentes. Estas actividades deberán desarrollarse de acuerdo con los procedimientos establecidos previamente en el plan de contingencia.

En relación con la presencia de actividades ganaderas, en caso de identificarse ingreso de animales al área de captación o afectación del entorno, se recomienda realizar inspección y limpieza del área, además de verificar el estado del cerramiento y efectuar las reparaciones necesarias. De esta forma, la medida de mitigación complementaría la función preventiva del cerramiento y permitiría recuperar las condiciones del área después de una eventual afectación. Ante una posible disminución significativa del caudal o una afectación temporal de la infraestructura, se propone activar la alternativa temporal de abastecimiento previamente identificada, con el propósito de reducir el tiempo de interrupción del servicio mientras se ejecutan las actividades de recuperación. La disponibilidad de esta alternativa deberá ser considerada dentro del plan de contingencia y mantenerse en condiciones que permitan su activación cuando sea necesario.

Finalmente, después de un evento eruptivo se recomienda efectuar una inspección post evento de los componentes de la captación y del tanque sedimentador. Esta actividad permitirá identificar daños, obstrucciones, acumulación de ceniza, socavaciones u otras condiciones que puedan impedir la recuperación del funcionamiento normal. Con base en los resultados de la

inspección deberán ejecutarse las actividades de mantenimiento correctivo y rehabilitación que correspondan.

La prioridad y los plazos de las medidas de mitigación se definieron siguiendo el mismo criterio explicado en el apartado anterior. A diferencia de las medidas de prevención, aquí se incorporan además las categorías "después del evento" y "durante la emergencia", debido a que estas acciones son de carácter reactivo: su ejecución no depende de un cronograma fijo, sino de la ocurrencia real de la amenaza correspondiente.

Las medidas de mitigación propuestas se presentan en la **Tabla 35**.

Tabla 35: Medidas de mitigación propuestas.

Medida	Amenaza controlada	Prioridad	Prediseño requerido	Responsable	Plazo	Indicador
Cubierta del tanque sedimentador	Caída de ceniza y contaminantes ambientales	Alta	Carga de ceniza (seca/húmeda y combinada con lluvia), pendiente de cubierta, sistema de soporte, ventilación y acceso para mantenimiento, y verificación estructural de los muros existentes (socavación, empuje, estabilidad)	GAD / Junta administradora	Corto	Reducción del ingreso de partículas
Protección y/o reforzamiento de componentes	Lahares	Alta	Diseño técnico de protección y/o reforzamiento	GAD / entidad técnica competente	Mediano	Protección implementada
Limpieza e inspección postevento	Caída de ceniza y acumulación de material	Alta	Procedimiento de inspección, limpieza y disposición del material	Junta administradora / operador	Después del evento	Registro de inspección y limpieza
Mantenimiento y rehabilitación postevento	Daños y obstrucciones ocasionados por el evento eruptivo	Alta	Procedimiento de mantenimiento y rehabilitación	GAD / Junta administradora	Después del evento	Sistema rehabilitado y operativo

Inspección y limpieza del área de captación	Ingreso de animales y afectación del entorno	Media	Procedimiento de inspección y limpieza	Operador / Junta administradora	Después de la afectación	Registro de inspección
Activación de abastecimiento alternativo	Falla total o disminución del caudal	Alta	Fuente alternativa, almacenamiento y logística	GAD / Junta administradora	Durante la emergencia	Autonomía en horas o días

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

Los resultados de la matriz de mitigación muestran que las principales acciones se relacionan con la protección de la infraestructura frente a la caída de ceniza y los lahares, el control de las condiciones ambientales del área de captación y la recuperación de la operación después de una eventual emergencia.

La construcción de la cubierta del tanque sedimentador constituye una medida prioritaria debido a la ausencia actual de protección superior. Esta intervención permitiría reducir la exposición directa ante la caída de ceniza y disminuir la posibilidad de ingreso de material particulado al tanque. De igual manera, las medidas de protección y/o reforzamiento frente a lahares deberán ser definidas mediante el diseño técnico correspondiente, utilizando como insumo los resultados obtenidos en la evaluación realizada.

La inspección y limpieza posterior a la caída de ceniza permitirá recuperar las condiciones de operación de los componentes expuestos. Asimismo, el control del área de captación y la revisión del cerramiento permitirán atender oportunamente posibles afectaciones relacionadas con el ingreso de animales y conservar las condiciones físicas del entorno inmediato de la fuente.

En cuanto a la continuidad del servicio, la identificación previa de una alternativa temporal de abastecimiento permitirá reducir las consecuencias de una posible interrupción de la captación. Esta medida deberá articularse con el plan de contingencia para establecer claramente las condiciones y responsables de su activación.

En conjunto, las medidas de prevención y mitigación permiten transformar los resultados de la evaluación de vulnerabilidad en acciones concretas de gestión del riesgo. Las medidas preventivas se orientan principalmente a mejorar el conocimiento de la fuente, fortalecer la preparación, proteger el entorno de la captación y evitar que futuras obras incrementen la exposición del sistema. Por su parte, las medidas de mitigación buscan reducir los efectos de los

lahares y la caída de ceniza, proteger los componentes existentes, controlar posibles afectaciones en el área de captación y facilitar la recuperación del servicio.

De esta manera, la propuesta contribuye al cumplimiento del tercer objetivo específico, al establecer medidas priorizadas que pueden ser consideradas por el GAD y la entidad responsable de la administración del sistema para fortalecer su capacidad de prevención, respuesta y recuperación ante un eventual evento eruptivo del volcán Cotopaxi.

6.4.3. Vista general de los 3 resultados

Los resultados obtenidos muestran que la vulnerabilidad del sistema de captación no depende únicamente del estado físico de sus estructuras, sino también de las condiciones funcionales, ambientales y administrativas identificadas durante la evaluación. Esta interpretación coincide con el estudio sobre vulnerabilidad físico-funcional de un sistema de agua potable frente a deslizamientos en Guaraczapas, parroquia de Angochagua, cantón Ibarra [9], donde se reconoce la necesidad de analizar los componentes que pueden comprometer la continuidad del servicio. De manera similar, el estudio de vulnerabilidad física y exposición ante movimientos en masa del Sistema de Agua Potable Culebrillas de la ciudad de Cuenca [24] permite diferenciar la exposición de una infraestructura frente a una amenaza de las condiciones que determinan su vulnerabilidad.

Esta diferenciación resulta fundamental en el presente estudio, debido a que la ubicación de la obra de captación y del tanque sedimentador en un territorio susceptible a fenómenos asociados a una eventual erupción del volcán Cotopaxi constituye una condición de exposición, pero no determina por sí sola el nivel de vulnerabilidad. La posible afectación dependerá también de las características de cada componente, de su funcionamiento, del estado del entorno y de la capacidad de los responsables para responder ante una emergencia. Por ello, separar amenaza, exposición y vulnerabilidad permitió evitar que la ubicación del sistema fuera interpretada como una condición de vulnerabilidad por sí misma.

La aplicación del método AHP permitió considerar que las dimensiones evaluadas no tienen necesariamente la misma importancia. En la obra de captación predominó la dimensión física, mientras que en el tanque sedimentador tuvo mayor relevancia la dimensión funcional. Esta diferencia se relaciona con la función que cumple cada componente dentro del sistema. La captación requiere conservar la integridad de sus elementos para mantener la derivación del agua, mientras que el sedimentador necesita condiciones funcionales adecuadas para cumplir su

propósito dentro del proceso de abastecimiento. Por tanto, la ponderación diferenciada permitió representar mejor las características particulares de cada estructura.

El AHP también incorporó el criterio técnico de los especialistas, lo que constituye una ventaja frente a una ponderación uniforme. Sin embargo, los pesos utilizados dependen de los juicios emitidos durante las comparaciones entre dimensiones, por lo que existe un componente de subjetividad que debe reconocerse. El resultado obtenido debe entenderse como un indicador semicuantitativo construido a partir de las observaciones de campo, los criterios de evaluación y la valoración de los expertos. De igual manera, la escala utilizada permitió organizar y comparar las condiciones encontradas, pero no representa una medida absoluta de resistencia de la infraestructura frente a una erupción. Por ello, una condición favorable no puede interpretarse como una garantía de funcionamiento durante un evento extremo.

Una limitación importante fue la falta de información técnica completa de la infraestructura. La ausencia de planos originales y registros detallados dificultó la comprobación de determinados elementos. Esta situación fue especialmente evidente en la conducción, debido a que se encuentra enterrada y no pudo ser inspeccionada directamente. Por esta razón, algunos indicadores fueron clasificados como N/V, es decir, No Verificables. Esta decisión evita asignar una valoración sin evidencia suficiente y permite reconocer de forma transparente una de las principales fuentes de incertidumbre del estudio. La condición N/V no representa una situación favorable ni desfavorable, sino la imposibilidad de comprobar el estado del elemento mediante las actividades realizadas.

El levantamiento topográfico georreferenciado permitió reducir parcialmente esta limitación, ya que proporcionó información actualizada sobre la ubicación y disposición de los componentes del sistema. Esto facilitó relacionar la infraestructura con las condiciones del territorio y su exposición frente a fenómenos volcánicos. Sin embargo, el levantamiento no reemplaza los planos originales ni permite conocer las condiciones internas de los elementos que permanecen enterrados. Por ello, disponer de documentación técnica actualizada continúa siendo una necesidad para mejorar futuras evaluaciones y facilitar las labores de mantenimiento y respuesta. Desde el punto de vista funcional, los resultados muestran que la continuidad del servicio depende de la relación entre los diferentes componentes. La captación debe mantener condiciones que permitan derivar el agua, mientras que el tanque sedimentador necesita conservar su capacidad de operación para cumplir su función dentro del sistema. Una afectación en cualquiera

de estos elementos podría repercutir en el funcionamiento posterior, por lo que la vulnerabilidad debe analizarse considerando el sistema como un conjunto y no únicamente a partir de daños visibles en una estructura.

Las principales debilidades identificadas se relacionan con aspectos ambientales y administrativos. Las condiciones observadas en el entorno, la protección de la infraestructura, la disponibilidad de registros, la capacitación y la preparación ante emergencias muestran que existen factores que pueden limitar la respuesta del sistema incluso si sus estructuras principales mantienen una condición favorable. Ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi, estas condiciones podrían adquirir mayor importancia debido a posibles alteraciones del entorno, dificultades de acceso, contaminación o acumulación de materiales. La continuidad del servicio dependerá entonces no solo de la integridad de las obras, sino también de la capacidad de los responsables para identificar afectaciones y actuar oportunamente.

Desde esta perspectiva, los resultados ofrecen una base para orientar las decisiones del GAD y de los responsables del sistema. Las acciones de prevención y mitigación no deberían concentrarse exclusivamente en la rehabilitación física, sino también en fortalecer la protección ambiental, actualizar los registros técnicos, mejorar el mantenimiento, capacitar al personal y establecer medidas de respuesta ante emergencias. Estas acciones permitirían atender las principales debilidades encontradas y reducir las incertidumbres asociadas con los elementos que no pudieron ser verificados.

La condición integral obtenida es favorable, aunque no significa que todos los componentes se encuentren en condiciones óptimas. La obra de captación presenta una condición más favorable que el tanque sedimentador, mientras que ambos mantienen aspectos que requieren fortalecimiento, especialmente en las dimensiones ambiental y administrativa. Por ello, el resultado global debe interpretarse como una referencia para establecer prioridades y no como una garantía de que el sistema permanecerá operativo ante cualquier escenario volcánico.

Finalmente, los resultados corresponden a las condiciones observadas durante el periodo de investigación y son aplicables principalmente al sistema estudiado. No representan una simulación de los daños que produciría una erupción ni permiten predecir con exactitud el comportamiento de la infraestructura durante un evento de esta naturaleza. La magnitud de una posible afectación dependerá de las características y alcance del fenómeno que pudiera presentarse. Sin embargo, la evaluación permite reconocer las condiciones que actualmente

favorecen el funcionamiento del sistema y aquellas que requieren atención. En este sentido, fortalecer la protección de la infraestructura, el manejo ambiental, la información técnica y la preparación ante emergencias constituye una base para mejorar la capacidad del sistema de mantener o recuperar el servicio frente a una eventual afectación asociada al volcán Cotopaxi.

7. CONCLUSIONES

- ❖ Se desarrolló mediante visitas de campo, la revisión de la información disponible en el GAD Municipal de Saquisilí y la información verbal proporcionada por el encargado del sistema. A partir del levantamiento topográfico mediante GNSS se recopilieron datos de los componentes de la captación y de las condiciones del terreno, que posteriormente fueron representados en Civil 3D para obtener su ubicación, planimetría, curvas de nivel y perfil del terreno. Durante la revisión documental no se encontraron planos ni diseños originales del sistema, por lo que la información levantada en campo permitió complementar la caracterización de los componentes y del área de estudio. Con esta información se estableció la ubicación espacial del sistema y su relación con las zonas de amenaza asociadas a los lahares y la caída de ceniza ante una posible erupción del volcán Cotopaxi, constituyendo una base para el desarrollo de las siguientes etapas de la investigación.
- ❖ Se abordó mediante la relación de las características del sistema con las amenazas naturales consideradas en la investigación. A través de QGIS se elaboró un mapa hidrológico para representar la vertiente y su recorrido hacia la obra de captación, considerando el tramo subterráneo y su llegada a superficie. Posteriormente, se utilizaron los mapas de amenaza para analizar la presencia de lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza como fenómenos asociados a una posible erupción del volcán Cotopaxi. La ubicación de la obra de captación y del tanque sedimentador fue relacionada con estas condiciones para establecer su exposición frente a los escenarios de amenaza considerados. Sobre esta base se realizó la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura existente, tomando como referencia su estado actual y las dimensiones física, funcional, ambiental y administrativa. Finalmente, la información obtenida permitió plantear la identificación de posibles impactos asociados a lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza que podrían comprometer diferentes componentes de la

infraestructura y, dependiendo de las condiciones del evento, incidir en la continuidad del servicio de agua.

- ❖ A partir de los resultados obtenidos se formularon medidas de prevención y mitigación dirigidas a disminuir las condiciones desfavorables encontradas en la obra de captación y en el tanque sedimentador. Entre las acciones propuestas se encuentra mejorar la protección del área de captación, controlar el ingreso de animales y fortalecer el cuidado del entorno de la fuente. También se considera necesario contar con un plan de contingencia, capacitar al operador y establecer procedimientos claros para actuar ante una emergencia. Para reducir los posibles efectos de la caída de ceniza, se propone proteger el tanque sedimentador y realizar actividades de inspección, limpieza y mantenimiento después de estos eventos. Asimismo, se recomienda considerar la exposición a lahares y ceniza en futuras obras, ampliaciones o rehabilitaciones del sistema. Estas medidas buscan que el sistema tenga mejores condiciones para prevenir, responder y recuperar su funcionamiento frente a un posible evento eruptivo del volcán Cotopaxi.

8. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda al GAD y a los responsables de la administración del sistema mantener un programa periódico de inspección de la obra de captación y del tanque sedimentador, dando prioridad a los componentes que presentaron condiciones menos favorables durante la evaluación. Se debe realizar seguimiento a la protección física de la caja de recolección, al estado de los muros y canal de la captación, así como a la cubierta, humedad, filtraciones y compuertas del tanque sedimentador. Asimismo, se recomienda implementar registros de inspección y mantenimiento que permitan documentar las actividades realizadas y facilitar el seguimiento de la evolución de las condiciones de la infraestructura.
- ❖ Se recomienda fortalecer la preparación del sistema ante los posibles impactos asociados a una erupción del volcán Cotopaxi, principalmente frente a lahares y caída de ceniza. Para ello, se deberá considerar la implementación de medidas de protección y/o reforzamiento de los componentes que puedan estar expuestos a lahares, tomando como base la evaluación visual realizada y los diseños técnicos correspondientes. Para el tanque sedimentador se recomienda incorporar una cubierta que limite el ingreso

directo de ceniza y otros agentes externos. Además, se recomienda realizar un estudio hidrológico e hidrogeológico de la vertiente, acompañado de aforos periódicos, con el propósito de caracterizar el comportamiento de la fuente y establecer una línea base que permita identificar posibles variaciones del caudal ante diferentes condiciones. Este estudio no deberá asumir que la fuente necesariamente se secará o mantendrá su caudal durante una erupción, sino que permitirá disponer de información técnica para futuras evaluaciones.

- ❖ Se recomienda implementar las medidas de prevención y mitigación propuestas de acuerdo con el nivel de prioridad establecido. Entre las acciones preventivas se considera necesario delimitar y proteger el área de la captación mediante un cerramiento, debido a la presencia de actividades ganaderas y al ingreso de animales en el entorno; elaborar un plan de contingencia con procedimientos y responsables definidos; fortalecer la capacitación del operador en gestión del riesgo; y establecer una alternativa temporal de abastecimiento en caso de interrupción del servicio. Como medidas de mitigación se recomienda mantener procedimientos de inspección, limpieza y rehabilitación posteriores a eventos de caída de ceniza o afectaciones por lahares. Finalmente, en caso de que se proyecte la construcción de un nuevo tanque o la ampliación del sistema, se recomienda que el diseño y emplazamiento incorporen desde la etapa inicial el análisis de exposición frente a lahares y caída de ceniza, procurando reducir la exposición de la infraestructura y mejorar su capacidad de mantener o recuperar la operatividad después de un evento eruptivo.

9. REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, “Agua,” Naciones Unidas. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- [2] K. Simbaña-Rivera *et al.*, “Volcanic eruptions and public health in Ecuador: an analysis of institutional gaps and integrated strategies,” *Front. Public Health*, vol. 13, Dec. 2025, doi: 10.3389/fpubh.2025.1705862.
- [3] Organización Panamericana de la Salud, “Erupciones volcánicas,” Organización Panamericana de la Salud (OPS). Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/erupciones-volcanicas>

- [4] Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, “Cotopaxi,” Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>
- [5] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, “Guía informativa y medidas de autoprotección ante el proceso eruptivo del volcán Cotopaxi,” Quito, Dec. 2022. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2022/12/GuiaAutoproteccionCotopaxi-WEB-15Dic22-final_compressed.pdf
- [6] M. Reinoso A., “Informe Técnico N.º IT-GADMICS-DSP-02-2025: Solicitud de autorización de agua de consumo humano para el GAD Municipal Intercultural del Cantón Saquisilí,” Informe técnico institucional, GAD Municipal Intercultural del Cantón Saquisilí, Saquisilí, Ecuador, 2025.
- [7] Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, “Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Cotopaxi,” Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.igepn.edu.ec/amenaza-volcanica>
- [8] Organización Panamericana de la Salud, “Reducción de la exposición a la contaminación del aire y agua debida a las erupciones volcánicas,” Washington, D.C, Apr. 2021. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/documentos/reduccion-exposicion-contaminacion-aire-agua-debida-erupciones-volcanicas>
- [9] W. D. Santacruz Quinchiguango, “ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD FÍSICO FUNCIONAL DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE GUARACZAPAS ANTE DESLIZAMIENTOS, PARROQUIA DE ANGOCHAGUA, CANTÓN IBARRA,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2018. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7936>
- [10] L. F. Moreira Resabala, “Potencial vulnerabilidad física de los sistemas de agua potable, facilidades hidrocarburíferas y el sistema nacional interconectado expuestos a lahares del volcán Cotopaxi en el drenaje norte,” Trabajo de titulación (Proyecto de investigación), Universidad Central del Ecuador, Quito, 2017. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.dsace.uce.edu.ec/entities/publication/19ac557b-e9a7-4db1-98fc-5d43ca9bb869>

- [11] Corporación Autónoma Regional de Santander, “Recurso hídrico,” Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS).
- [12] E. V. Del Pozo Chávez and J. M. Castillo García, “Análisis de la vulnerabilidad funcional del sistema de agua potable en el área urbana de la ciudad de Guaranda, provincia Bolívar, periodo 2017.,” Proyecto de Investigación, Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, 2017.
- [13] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “Aguas superficiales,” AGROVOC: Tesauro Multilingüe de la FAO, 2018. [Online]. Available: https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_25317
- [14] J. F. Ochoa, “Perfiles de flujo y dimensionamiento de rejillas en bocatomas de fondo utilizando el método de Mostkow,” *Revista Politécnica*, vol. 7, no. 12, pp. 101–115, Jun. 2011, Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/184>
- [15] B. Stauffer and D. Spuhler, “Captación de ríos, lagos y embalses (reservorios),” Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM). Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos%2C-lagos-y-embalses-%28reservorios%29>
- [16] A. A. Alcas Andrade and C. G. Lizarzaburu Silva, “Diseño y modelamiento hidráulico de una bocatoma para mejorar el sistema de riego en el Centro Poblado - Buena Vista, Distrito de Chao, Virú 2021,” Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, 2023. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12759/10978>
- [17] I. M. Cajas Zarate and A. F. Macas Macas, “Diseño de la captación y línea de conducción del agua potable para Caluma Nuevo, cantón Caluma, provincia de Bolívar,” Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2019. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51431>
- [18] Asociación Nacional de Empresas e Instituciones de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado, “Reglamento Nacional NB 689: Agua Potable,” La Paz, Dec. 2004.

- [19] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Conducciones (Libro 10)*, 1st ed. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua, 2015.
- [20] G. O. M. Kombo Mpindou, I. Escuder Bueno, and E. Chordà Ramón, “Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap,” *Appl. Water Sci.*, vol. 12, no. 4, p. 56, Apr. 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01586-7.
- [21] M. G. Zúñiga, B. Santillán, C. Izurieta, and C. Merino, “Influencia del coeficiente máximo horario en el diseño de tanques de reserva de agua potable en Riobamba,” *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, vol. 8, no. 2, pp. 32–55, Jul. 2025, doi: 10.37135/ns.01.16.02.
- [22] Secretaría de Gestión de Riesgos, “Glosario de términos de gestión de riesgos de desastres: Guía de consulta,” Samborondón, Ecuador, 2018. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/GLOSARIO-DE-T%3%89RMINOS-DE-GESTI%3%93N-DE-RIESGOS-DE-DESASTRES-GUIA-DE-CONSULTA.pdf>
- [23] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), “Vulnerability,” United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/vulnerability>
- [24] G. M. Moscoso Vintimlla, J. A. Paucar Camacho, and J. L. Solano Peláez, “Vulnerabilidad física y exposición ante la amenaza de movimientos en masa del Sistema de Agua Potable Culebrillas de la Ciudad de Cuenca,” *Ciencia Digital*, vol. 5, no. 2, pp. 46–66, Apr. 2021, doi: 10.33262/cienciadigital.v5i2.1573.
- [25] Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), “Guía para la reducción de la vulnerabilidad en sistemas de agua potable y saneamiento,” San José, Costa Rica, 2013.
- [26] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), “Riesgo de desastre,” UNDRR Terminology. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>
- [27] E. C. Casco Guerrero, “Actualización del plan comunitario de gestión de riesgos para la comunidad Bellavista del cantón Pastaza, provincia de Pastaza,” Trabajo de titulación para obtener el título de Ingeniera Ambiental, Universidad Estatal Amazónica, Puyo,

- Ecuador, 2020. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/808>
- [28] Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), “Peligros volcánicos,” San Salvador, El Salvador, 2005. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.snet.gob.sv/ver/vulcanologia/amenaza/>
- [29] Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), “Amenaza volcánica,” Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.igepn.edu.ec/amenaza-volcanica>
- [30] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), “Erupciones volcánicas,” Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/erupciones-volcanicas/>
- [31] Organización Panamericana de la Salud and Organización Mundial de la Salud, “Emergencias y desastres en sistemas de agua potable y saneamiento: Guía para una respuesta eficaz,” Washington, D.C., Jun. 2004. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://iris.paho.org/items/0bb992af-8a56-4181-877c-27ce8af322fc>
- [32] M. E. Landázuri Benítez, “Análisis espacial del cantón Latacunga para determinar áreas aptas para la reubicación de damnificados de la parroquia José Guango Bajo afectados por el volcán Cotopaxi, en el caso de una erupción con un índice de explosividad volcánica cuatro (Pliniana),” Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2017. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21596>
- [33] J. P. Zapata Yugsi, “Generación de señales volcánicas artificiales de tipo LP (long-period) y VT (volcano-tectonic) a partir de una base de datos del volcán Cotopaxi usando la técnica de bootstrapping,” Trabajo de Integración Curricular, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23276>
- [34] J. Ordóñez, P. Samaniego, P. Mothes, and S. Schilling, “Las potenciales zonas de inundación por lahares en el volcán Cotopaxi,” Quito, 2013. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available:

<https://www.cotopaxinoticias.com/images/noticias/adjuntos/Lahares%20del%20Cotopaxi.compressed.pdf>

- [35] S. X. López Revelo, “Percepción del riesgo sobre la amenaza de lahares del volcán Cotopaxi del cantón Rumiñahui, Pichincha-Ecuador,” Disertación previa a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2018. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21582>
- [36] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), “Mitigation,” United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/mitigation>
- [37] Secretaría de Gestión de Riesgos, “Plan Nacional de Respuesta ante Desastres: RespondeEC,” Samborondón, Ecuador, Apr. 2018. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Plan-Nacional-de-Respuesta-SGR-RespondeEC.pdf>
- [38] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “Disaster Risk Management,” UNDRR Terminology. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk-management?utm_
- [39] P. y R. del R. de D. (CENEPRED) Centro Nacional de Estimación, *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales – 2da Versión*, 2nd ed. Lima: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), 2014. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- [40] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), “Anexo 1: Parámetros e indicadores de gestión del prestador público,” Quito, Oct. 2018. Accessed: Aug. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/07/Anexo_1_parametros_e_indicadores_pu%CC%81blicos.pdf?utm_
- [41] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1980.

- [42] National Aeronautics and Space Administration (NASA), “NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001,” Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), NASA/JPL/SRTM. [Online]. Available: <https://data.nasa.gov/dataset/nasadem-merged-dem-global-1-arc-second-v001>.
- [43] J. F. O’Callaghan and D. M. Mark, “The extraction of drainage networks from digital elevation data,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 28, no. 3, pp. 323–344, 1984, doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
- [44] S. K. Jenson and J. O. Domingue, “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no. 11, pp. 1593–1600, 1988.

ANEXOS

ANEXO 1:Entrevista al responsable del sistema de agua potable

ENTREVISTA AL RESPONSABLE DEL SISTEMA DE AGUA

Evaluación de vulnerabilidad de la obra de captación y tanque sedimentador

Nombre del sistema: San Agustín del Callo

Infraestructura evaluada: Obra de captación lateral y tanque sedimentador

Ubicación: San Agustín de Callo

Entrevistado: Ing. Enrique Espín

Cargo: Responsable del sistema de agua potable y alcantarillado

Fecha: 15 de junio de 2026

Objetivo

Recopilar información relacionada con la operación, mantenimiento, gestión administrativa, condiciones ambientales y preparación ante emergencias de la obra de captación y tanque sedimentador, como parte de la evaluación de vulnerabilidad ante una posible erupción del volcán Cotopaxi.

ENTREVISTA Y RESPUESTAS ESCRITA Y VERBAL

1. ¿Existe personal responsable de la operación y supervisión de la obra de captación y del tanque sedimentador?

Sí existe personal encargado de la operación y supervisión del sistema de agua, quienes realizan actividades relacionadas con el control del funcionamiento de la obra de captación y del tanque sedimentador.

2. ¿Se realizan inspecciones periódicas de la obra de captación y del tanque sedimentador?

Sí, se realizan inspecciones periódicas para verificar las condiciones de funcionamiento y conservación de las estructuras. Estas inspecciones se efectúan aproximadamente cada 15 días junto con las actividades de limpieza y mantenimiento.

3. ¿Las inspecciones cuentan con registros escritos o formatos de control?

No, actualmente no se dispone de registros escritos o formatos establecidos donde se documenten las inspecciones realizadas al sistema.

4. ¿Existe un programa formal de mantenimiento para la obra de captación y el tanque sedimentador?

No existe un programa formal de mantenimiento documentado. Las actividades se realizan de acuerdo con las necesidades observadas durante las inspecciones periódicas.

5. ¿Con qué frecuencia se realiza la limpieza de la obra de captación y del tanque sedimentador?

Las actividades de limpieza se realizan aproximadamente cada 15 días, principalmente para retirar sedimentos, residuos y material acumulado que pueda afectar el funcionamiento del sistema.

6. ¿Se realiza retiro de sedimentos acumulados en el tanque sedimentador?

Sí, el retiro de sedimentos se realiza aproximadamente cada 15 días para evitar la disminución del volumen útil del tanque y mantener su capacidad de sedimentación.

7. ¿Las actividades de mantenimiento quedan registradas mediante informes o registro?

No, las actividades de mantenimiento realizadas no cuentan actualmente con registros documentales como informes, bitácoras o formatos de seguimiento.

8. ¿Cuándo se presenta una falla en la infraestructura, ¿cómo se realiza la reparación?

Cuando se identifica una falla o problema durante las inspecciones, se realizan las acciones correctivas necesarias de acuerdo con la disponibilidad de recursos y materiales existentes.

9. ¿La obra de captación permite el ingreso continuo del caudal hacia el sistema?

Sí, actualmente la obra de captación permite el ingreso del agua hacia el sistema de conducción, aunque en épocas de mayor presencia de sedimentos puede requerir limpieza para mantener adecuadas condiciones de funcionamiento.

10. ¿El tanque sedimentador mantiene su funcionamiento durante la operación normal?

Sí, el tanque sedimentador permanece operativo y permite la retención de sedimentos antes de la conducción del agua hacia el sistema.

11. ¿Las compuertas o elementos de control hidráulico funcionan adecuadamente?

Sí, las compuertas permiten regular el ingreso del agua; sin embargo, presentan cierto desgaste debido al tiempo de servicio, por lo que requieren mantenimiento periódico.

12. ¿Se realiza limpieza del entorno de la obra de captación y del tanque sedimentador?

La limpieza del entorno se realiza ocasionalmente, principalmente cuando se observa acumulación de vegetación, residuos o material que pueda afectar el funcionamiento del sistema.

13. ¿Existe un área de protección delimitada alrededor de la captación y del tanque sedimentador?

Actualmente no existe un área de protección delimitada mediante cerramiento u otra medida física que restrinja el ingreso de personas o animales.

14. ¿Se ha identificado presencia de animales o actividades agrícolas cercanas al sistema?

Sí, existen actividades agrícolas y presencia de animales en los alrededores del sistema, por lo que existe un riesgo potencial de contaminación debido al ingreso de residuos orgánicos o escorrentía durante eventos de lluvia.

15. ¿Se dispone de herramientas y materiales para realizar mantenimiento?

Se dispone de algunos materiales y herramientas básicas para realizar actividades menores de mantenimiento; sin embargo, son limitados para atender daños mayores.

16. ¿Existe presupuesto específico destinado al mantenimiento del sistema?

Existen recursos destinados para actividades de mantenimiento; sin embargo, estos son limitados y se utilizan principalmente cuando se presentan necesidades operativas.

17. ¿Existe un procedimiento para actuar ante una posible erupción del volcán Cotopaxi?

No existe actualmente un procedimiento específico para proteger y mantener operativo el sistema de captación y el tanque sedimentador ante una emergencia volcánica.

18. ¿El personal ha recibido capacitación sobre riesgos volcánicos, caída de ceniza o lahares?

No se ha recibido capacitación específica relacionada con amenazas volcánicas ni protocolos de actuación frente a caída de ceniza o flujo de lahares.

19. ¿La infraestructura cuenta con medidas de protección frente a la caída de ceniza volcánica?

No, actualmente la obra de captación y el tanque sedimentador no cuentan con cubiertas u otros elementos de protección que reduzcan el ingreso de ceniza volcánica.

20. ¿Existe personal asignado para operar el sistema durante una emergencia volcánica?

No existe personal asignado específicamente para atender la operación del sistema durante una emergencia volcánica.

21. ¿Existe coordinación con instituciones externas ante problemas del sistema?

Sí, cuando se requiere apoyo técnico o atención de alguna situación que afecte al sistema existe coordinación con las instituciones responsables.

Observación final del entrevistador

La entrevista permitió identificar que el sistema cuenta con personal responsable y mantiene una operación continua; sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con la falta de documentación técnica, ausencia de un programa formal de mantenimiento, falta de procedimientos de emergencia volcánica y ausencia de medidas de protección frente a la caída de ceniza y otros eventos asociados al volcán Cotopaxi.

ANEXO 2:Escala de referencia (IC y Vulnerabilidad)

Tabla 36:Escala del Índice de Condición (IC)

Indice de Condición (Estado IC) - escala original (5 = muy bueno, 1 = muy malo)		
Limite inferior	Limite superior	Estado del indicador (IC)
1	<=1,80	Muy malo
1,81	<=2,60	Malo
2,61	<=3,40	Regular
3,41	<=4,20	Bueno
4,21	<=5	Muy bueno

Tabla 37:Rangos de interpretación del nivel de vulnerabilidad

Nivel de Vulnerabilidad (V = 6 - IC) - 5 = vulnerabilidad muy alta, 1 = vulnerabilidad muy baja		
Limite inferior	Limite superior	Nivel de vulnerabilidad (V)
1	<=1,80	Muy baja
1,81	<=2,60	Baja
2,61	<=3,40	Media
3,41	<=4,20	Alta
4,21	<=5	Muy alta

ANEXO 3: Matrices de comparación por pares (AHP) elaboradas por los tres expertos para la evaluación de la vulnerabilidad de la obra de captación y del tanque sedimentador

Tabla 38: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores físicos de la obra de captación.

Ponderacion AHP de indicadores - Matriz Física									
Experto 1 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Canal (acequia)		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	1/3	5	3		1,495	0,263	1,080	4,100
Caja de recolección	3	1	7	5		3,201	0,564	2,328	4,129
Tubería de conducción	1/5	1/7	1	1/3		0,312	0,055	0,228	4,135
Canal (acequia)	1/3	1/5	3	1		0,669	0,118	0,483	4,104
Lambda max	4,1169								
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0390								
RI (n=4)	0,9000								
CR = CI/RI	0,0433								
Veredicto	Consistente (acceptable)								
Experto 2 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Canal (acequia)		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	1/3	1/2	2		0,760	0,160	0,645	4,026
Caja de recolección	3	1	2	4		2,213	0,467	1,884	4,036
Tubería de conducción	2	1/2	1	3		1,316	0,278	1,117	4,025
Canal (acequia)	1/2	1/4	1/3	1		0,452	0,095	0,385	4,037
Lambda max	4,0310								
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0103								
RI (n=4)	0,9000								
CR = CI/RI	0,0115								
Veredicto	Consistente (acceptable)								
Experto 3 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Canal (acequia)		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	2	3	5		2,340	0,472	1,915	4,054
Caja de recolección	1/2	1	2	4		1,414	0,285	1,151	4,033
Tubería de conducción	1/3	1/2	1	3		0,841	0,170	0,687	4,050
Canal (acequia)	1/5	1/4	1/3	1		0,359	0,073	0,295	4,067

Lambda max	4,0511
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0170
RI (n=4)	0,9000
CR = CI/RI	0,0189
Veredicto	Consistente (acceptable)

Matriz agregada (media geometrica de los 3 expertos)								
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Canal (acequia)	Media geom.	Peso final wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1,00	0,61	1,96	3,11	1,385	0,294	1,175	4,004
Caja de recolección	1,65	1,00	3,04	4,31	2,156	0,457	1,828	4,003
Tubería de conducción	0,51	0,33	1,00	1,44	0,702	0,149	0,595	4,000
Canal (acequia)	0,32	0,23	0,69	1,00	0,477	0,101	0,405	4,004

Lambda max (agregada)	4,0027
CI	0,0009
RI (n=4)	0,9000
CR = CI/RI	0,0010
Veredicto	Consistente (acceptable, CR<=0.10)

PESOS FINALES POR INDICADOR		
Indicador	Peso wi	%
Muros de ala	0,29	29%
Caja de recolección	0,46	46%
Tubería de conducción	0,15	15%
Canal (acequia)	0,10	10%
	1,00	100%

Tabla 39: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores funcionales u operativos de la obra de captación.

Ponderación AHP de indicadores - Matriz Funcional u Operativa										
Experto 1 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Operación	Mantenimiento		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	5	2	3	3		2,340	0,449	2,215	4,931
Caja de recolección	1/5	1	1	2	2		0,795	0,153	0,847	5,548
Tubería de conducción	1/2	1	1	2	2		1,000	0,192	0,982	5,115
Operación	1/3	1/2	1/2	1	1		0,537	0,103	0,528	5,123
Mantenimiento	1/3	1/2	1/2	1	1		0,537	0,103	0,528	5,123
Lambda máx	5,1679									
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0420									
RI (n=5)	1,1200									
CR = CI/RI	0,0375									
Veredicto	Consistente (acceptable)									
Experto 2 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Operación	Mantenimiento		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	2	2	3	3		2,048	0,367	1,851	5,048
Caja de recolección	1/2	1	2	2	2		1,320	0,236	1,214	5,136
Tubería de conducción	1/2	1/2	1	2	2		1,000	0,179	0,916	5,117
Operación	1/3	1/2	1/2	1	1		0,608	0,109	0,548	5,028
Mantenimiento	1/3	1/2	1/2	1	1		0,608	0,109	0,548	5,028
Lambda máx	5,0715									
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0179									
RI (n=5)	1,1200									
CR = CI/RI	0,0160									
Veredicto	Consistente (acceptable)									
Experto 3 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Operación	Mantenimiento		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1	2	2	2	3		1,888	0,344	1,753	5,101
Caja de recolección	1/2	1	2	2	2		1,320	0,240	1,244	5,183

Tubería de conducción	1/2	1/2	1	2	2	1,000	0,182	0,942	5,179
Operación	1/2	1/2	1/2	1	2	0,758	0,138	0,714	5,174
Mantenimiento	1/3	1/2	1/2	1/2	1	0,530	0,096	0,491	5,094
Lambda máx	5,1460								
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0365								
RI (n=5)	1,1200								
CR = CI/RI	0,0326								
Veredicto	Consistente (aceptable)								
Matriz agregada (media geométrica de los 3 expertos)									
Indicador	Muros de ala	Caja de recolección	Tubería de conducción	Operación	Mantenimiento	Media geom.	Peso final wi	A*w	(A*w)i / wi
Muros de ala	1,00	2,71	2,00	2,62	3,00	2,119	0,379	1,949	5,140
Caja de recolección	0,37	1,00	1,59	2,00	2,00	1,185	0,212	1,092	5,146
Tubería de conducción	0,50	0,63	1,00	2,00	2,00	1,047	0,187	0,953	5,084
Operación	0,38	0,50	0,50	1,00	1,26	0,655	0,117	0,593	5,058
Mantenimiento	0,33	0,50	0,50	0,79	1,00	0,581	0,104	0,523	5,032
Lambda máx (agregada)	5,0919								
CI	0,0230								
RI (n=5)	1,1200								
CR = CI/RI	0,0205								
Veredicto	Consistente (aceptable, CR<=0.10)								
PESOS FINALES POR INDICADOR									
Indicador	Peso wi	%							
Muros de ala	0,38	38%							
Caja de recolección	0,21	21%							
Tubería de conducción	0,19	19%							
Operación	0,12	12%							
Mantenimiento	0,10	10%							
	1,00	100%							

Tabla 40: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores ambientales de la obra de captación.

Ponderacion AHP de indicadores - Matriz Ambiental									
Experto 1 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Entorno de la captación	Fuente de abastecimiento (acequia)	Protección ambiental	Estado del entorno		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Entorno de la captación	1	1/3	1/5	2		0,604	0,117	0,481	4,098
Fuente de abastecimiento (acequia)	3	1	1/2	3		1,456	0,283	1,143	4,038
Protección ambiental	5	2	1	5		2,659	0,517	2,085	4,035
Estado del entorno	1/2	1/3	1/5	1		0,427	0,083	0,339	4,088
Lambda max	4,0646								
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0215								
RI (n=4)	0,9000								
CR = CI/RI	0,0239								
Veredicto	Consistente (acceptable)								
Experto 2 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Entorno de la captación	Fuente de abastecimiento (acequia)	Protección ambiental	Estado del entorno		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Entorno de la captación	1	1/3	1/2	2		0,760	0,160	0,645	4,026
Fuente de abastecimiento (acequia)	3	1	2	4		2,213	0,467	1,884	4,036
Protección ambiental	2	1/2	1	3		1,316	0,278	1,117	4,025
Estado del entorno	1/2	1/4	1/3	1		0,452	0,095	0,385	4,037
Lambda max	4,0310								
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0103								
RI (n=4)	0,9000								
CR = CI/RI	0,0115								
Veredicto	Consistente (acceptable)								
Experto 3 - Matriz de comparación por pares									
Indicador	Entorno de la captación	Fuente de abastecimiento (acequia)	Protección ambiental	Estado del entorno		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Entorno de la captación	1	1/3	1/2	2		0,760	0,157	0,630	4,017
Fuente de abastecimiento (acequia)	3	1	2	5		2,340	0,483	1,938	4,012
Protección ambiental	2	1/2	1	3		1,316	0,272	1,092	4,018

Tabla 41: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores organizativos o administrativos de la obra de captación.

Ponderación AHP de indicadores - Matriz Organizativa o administrativa													
Experto 1 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Gestión de la operación	Mantenimiento	Registros técnicos	Preparación ante emergencias	Capacitación	Comunicación	Recursos	Control administrativo		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Gestión de la operación	1	2	3	1/2	2	2	2	3		1,707	0,186	1,541	8,267
Mantenimiento	1/2	1	2	1/2	1	2	2	2		1,189	0,130	1,058	8,149
Registros técnicos	1/3	1/2	1	1/4	1/2	1	1	2		0,672	0,073	0,594	8,093
Preparación ante emergencias	2	2	4	1	2	3	3	4		2,414	0,264	2,143	8,128
Capacitación	1/2	1	2	1/2	1	2	2	3		1,251	0,137	1,108	8,108
Comunicación	1/2	1/2	1	1/3	1/2	1	2	2		0,799	0,087	0,721	8,254
Recursos	1/2	1/2	1	1/3	1/2	1/2	1	2		0,672	0,073	0,603	8,221
Control administrativo	1/3	1/2	1/2	1/4	1/3	1/2	1/2	1		0,452	0,049	0,405	8,206
Lambda máx	8,1781												
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0254												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI/RI	0,0180												
Veredicto	Consistente (acceptable)												
Experto 2 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Gestión de la operación	Mantenimiento	Registros técnicos	Preparación ante emergencias	Capacitación	Comunicación	Recursos	Control administrativo		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Gestión de la operación	1	3	5	1/3	3	3	5	5		2,407	0,214	1,871	8,759
Mantenimiento	1/3	1	3	1/3	3	3	5	5		1,715	0,152	1,321	8,673
Registros técnicos	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1/3	3	3		0,583	0,052	0,455	8,785
Preparación ante emergencias	3	3	5	1	5	5	7	7		3,914	0,347	3,000	8,634
Capacitación	1/3	1/3	3	1/5	1	3	3	5		1,147	0,102	0,898	8,823
Comunicación	1/3	1/3	3	1/5	1/3	1	3	3		0,818	0,073	0,635	8,747
Recursos	1/5	1/5	1/3	1/7	1/3	1/3	1	3		0,398	0,035	0,309	8,743

Control administrativo	1/5	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1/3	1		0,284	0,025	0,222	8,791
Lambda máx	8,7444												
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,1063												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI/RI	0,0754												
Veredicto	Consistente (aceptable)												

Experto 3 - Matriz de comparación por pares

Indicador	Gestión de la operación	Mantenimiento	Registros técnicos	Preparación ante emergencias	Capacitación	Comunicación	Recursos	Control administrativo		Media geom.	Peso wi	A*w	(A*w)i / wi
Gestión de la operación	1	3	5	3	4	4	5	5		3,403	0,318	2,792	8,789
Mantenimiento	1/3	1	4	2	3	3	5	5		2,225	0,208	1,759	8,471
Registros técnicos	1/5	1/4	1	1/3	1/2	1/2	2	3		0,631	0,059	0,486	8,258
Preparación ante emergencias	1/3	1/2	3	1	3	4	5	5		1,871	0,175	1,498	8,576
Capacitación	1/4	1/3	2	1/3	1	2	3	4		1,037	0,097	0,809	8,358
Comunicación	1/4	1/3	2	1/4	1/2	1	3	3		0,811	0,076	0,640	8,455
Recursos	1/5	1/5	1/2	1/5	1/3	1/3	1	2		0,416	0,039	0,326	8,392
Control administrativo	1/5	1/5	1/3	1/5	1/4	1/3	1/2	1		0,320	0,030	0,258	8,638
Lambda máx	8,4923												
CI = (Imax-n)/(n-1)	0,0703												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI/RI	0,0499												
Veredicto	Consistente (aceptable)												

Matriz agregada (media geométrica de los 3 expertos)

Indicador	Gestión de la operación	Mantenimiento	Registros técnicos	Preparación ante emergencias	Capacitación	Comunicación	Recursos	Control administrativo	Media geom.	Peso final wi	A*w	(A*w)i / wi
Gestión de la operación	1,00	2,62	4,22	0,79	2,88	2,88	3,68	4,22	2,409	0,239	2,017	8,434
Mantenimiento	0,38	1,00	2,88	0,69	2,08	2,62	3,68	3,68	1,656	0,164	1,363	8,293
Registros técnicos	0,24	0,35	1,00	0,26	0,44	0,55	1,82	2,62	0,627	0,062	0,512	8,224

Preparación ante emergencias	1,26	1,44	3,91	1,00	3,11	3,91	4,72	5,19	2,605	0,259	2,111	8,162
Capacitación	0,35	0,48	2,29	0,32	1,00	2,29	2,62	3,91	1,142	0,113	0,944	8,333
Comunicación	0,35	0,38	1,82	0,26	0,44	1,00	2,62	2,62	0,809	0,080	0,670	8,334
Recursos	0,27	0,27	0,55	0,21	0,38	0,38	1,00	2,29	0,481	0,048	0,399	8,350
Control administrativo	0,24	0,27	0,38	0,19	0,26	0,38	0,44	1,00	0,345	0,034	0,290	8,453
Lambda máx (agregada)	8,3229											
CI	0,0461											
RI (n=8)	1,4100											
CR = CI/RI	0,0327											
Veredicto	Consistente (acceptable, CR<=0.10)											
PESOS FINALES POR INDICADOR												
Indicador	Peso wi	%										
Gestión de la operación	0,24	24%										
Mantenimiento	0,16	16%										
Registros técnicos	0,06	6%										
Preparación ante emergencias	0,26	26%										
Capacitación	0,11	11%										
Comunicación	0,08	8%										
Recursos	0,05	5%										
Control administrativo	0,03	3%										
	1,00	100%										

Tabla 42: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores físicos del tanque sedimentador

Ponderación AHP de indicadores físicos - Tanque sedimentador													
Experto 1 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Muros estructurales	Fondo del tanque	Sistema de ingreso	Compuertas de control	Sistema de salida	Protección del tanque	Estado de conservación	Condición general de la infraestructura		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Muros estructurales	1	3	5	4	5	1/2	4	2		2,426	0,232	1,916	8,241
Fondo del tanque	1/3	1	3	2	3	1/3	2	1/2		1,091	0,104	0,854	8,176
Sistema de ingreso	1/5	1/3	1	1/2	1	1/5	1	1/4		0,450	0,043	0,349	8,109
Compuertas de control	1/4	1/2	2	1	2	1/4	2	1/3		0,733	0,070	0,574	8,180
Sistema de salida	1/5	1/3	1	1/2	1	1/5	1	1/4		0,450	0,043	0,349	8,109
Protección del tanque	2	3	5	4	5	1	5	3		3,121	0,299	2,505	8,378
Estado de conservación	1/4	1/2	1	1/2	1	1/5	1	1/4		0,486	0,047	0,378	8,120
Condición general de la infraestructura	1/2	2	4	3	4	1/3	4	1		1,682	0,161	1,328	8,239
Lambda máx.	8,1941												
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,0277												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0197												
Veredicto	Consistente (aceptable)												
Experto 2 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Muros estructurales	Fondo del tanque	Sistema de ingreso	Compuertas de control	Sistema de salida	Protección del tanque	Estado de conservación	Condición general de la infraestructura		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Muros estructurales	1	3	5	4	4	2	3	2		2,707	0,286	2,326	8,144
Fondo del tanque	1/3	1	3	2	3	1/2	2	1/2		1,147	0,121	1,005	8,304
Sistema de ingreso	1/5	1/3	1	1/2	1	1/3	1/2	1/3		0,455	0,048	0,388	8,071
Compuertas de control	1/4	1/2	2	1	2	1/2	1	1/2		0,771	0,081	0,658	8,084
Sistema de salida	1/4	1/3	1	1/2	1	1/3	1/2	1/3		0,468	0,049	0,402	8,138
Protección del tanque	1/2	2	3	2	3	1	2	1		1,565	0,165	1,339	8,108
Estado de conservación	1/3	1/2	2	1	2	1/2	1	1/2		0,799	0,084	0,681	8,080

Condición general de la infraestructura	1/2	2	3	2	3	1	2	1		1,565	0,165	1,339	8,108
Lambda máx.	8,1298												
CI = (λmax - n)/(n - 1)	0,0185												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0131												
Veredicto	Consistente (aceptable)												

Experto 3 - Matriz de comparación por pares

Indicador	Muros estructurales	Fondo del tanque	Sistema de ingreso	Compuertas de control	Sistema de salida	Protección del tanque	Estado de conservación	Condición general de la infraestructura		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Muros estructurales	1	4	6	5	6	3	5	3		3,663	0,358	2,936	8,211
Fondo del tanque	1/4	1	3	2	3	1/2	2	1/2		1,107	0,108	0,894	8,274
Sistema de ingreso	1/6	1/3	1	1/2	1	1/3	1/2	1/3		0,445	0,043	0,355	8,173
Compuertas de control	1/5	1/2	2	1	2	1/2	2	1/2		0,818	0,080	0,655	8,208
Sistema de salida	1/6	1/3	1	1/2	1	1/3	1/2	1/3		0,445	0,043	0,355	8,173
Protección del tanque	1/3	2	3	2	3	1	4	2		1,769	0,173	1,441	8,343
Estado de conservación	1/5	1/2	2	1/2	2	1/4	1	1/2		0,631	0,062	0,511	8,295
Condición general de la infraestructura	1/3	2	3	2	3	1/2	2	1		1,364	0,133	1,099	8,247
Lambda máx.	8,2404												
CI = (λ,max – n)/(n – 1)	0,0343												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0244												
Veredicto	Consistente (aceptable)												

Matriz agregada de los tres expertos (media geométrica por celda)

Indicador	Muros estructurales	Fondo del tanque	Sistema de ingreso	Compuertas de control	Sistema de salida	Protección del tanque	Estado de conservación	Condición general de la infraestructura		Media geom.	Peso final w_i	$A \times w$	$(A \times w)_i / w_i$
Muros estructurales	1,00	3,30	5,31	4,31	4,93	1,44	3,91	2,29		2,887	0,292	2,371	8,122
Fondo del tanque	0,30	1,00	3,00	2,00	3,00	0,44	2,00	0,50		1,115	0,113	0,927	8,220
Sistema de ingreso	0,19	0,33	1,00	0,50	1,00	0,28	0,63	0,30		0,450	0,046	0,368	8,090
Compuertas de control	0,23	0,50	2,00	1,00	2,00	0,40	1,59	0,44		0,773	0,078	0,636	8,129
Sistema de salida	0,20	0,33	1,00	0,50	1,00	0,28	0,63	0,30		0,454	0,046	0,372	8,107

Tabla 43: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores funcionales u operativos del tanque sedimentador.

Ponderación AHP de indicadores funcionales u operativos - Tanque sedimentador											
Experto 1 - Matriz de comparación por pares											
Indicador	Ingreso	Proceso de sedimentación	Control hidráulico	Salida del agua	Limpieza del tanque	Operatividad del sistema		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Ingreso del agua	1	3	5	2	5	4		2,904	0,382	2,390	6,255
Proceso de sedimentación	1/3	1	3	1/2	4	3		1,348	0,177	1,127	6,358
Control hidráulico	1/5	1/3	1	1/2	3	2		0,765	0,101	0,640	6,366
Salida del agua	1/2	2	2	1	4	3		1,698	0,223	1,379	6,175
Limpieza del tanque	1/5	1/4	1/3	1/4	1	2		0,450	0,059	0,384	6,488
Operatividad del sistema	1/4	1/3	1/2	1/3	1/2	1		0,437	0,057	0,366	6,378
Lambda máx.	6,3367										
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,0673										
RI (n=6)	1,2400										
CR = CI / RI	0,0543										
Veredicto	Consistente (acceptable)										
Experto 2 - Matriz de comparación por pares											
Indicador	Ingreso	Proceso de sedimentación	Control hidráulico	Salida	Limpieza del tanque	Operatividad del sistema		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Ingreso del agua	1	3	5	2	5	4		2,904	0,381	2,382	6,252
Proceso de sedimentación	1/3	1	3	1/2	4	3		1,348	0,177	1,120	6,335
Control hidráulico	1/5	1/3	1	1/2	3	2		0,765	0,100	0,632	6,299
Salida del agua	1/2	2	2	1	4	3		1,698	0,223	1,372	6,157
Limpieza del tanque	1/5	1/4	1/3	1/4	1	1/2		0,357	0,047	0,293	6,240
Operatividad del sistema	1/4	1/3	1/2	1/3	2	1		0,550	0,072	0,445	6,158
Lambda máx.	6,2401										
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,0480										
RI (n=6)	1,2400										
CR = CI / RI	0,0387										
Veredicto	Consistente (acceptable)										
Experto 3 - Matriz de comparación por pares											
Indicador	Ingreso	Proceso de sedimentación	Control hidráulico	Salida	Limpieza del tanque	Operatividad del sistema		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Ingreso del agua	1	2	3	2	4	5		2,493	0,341	2,129	6,243
Proceso de sedimentación	1/2	1	2	2	3	4		1,698	0,232	1,429	6,154

Tabla 44: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores ambientales del tanque sedimentador.

Ponderación AHP de indicadores ambientales - Tanque sedimentador										
Experto 1 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Entorno	Protección ambiental	Calidad ambiental	Estado del entorno	Condiciones sanitarias del entorno		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Entorno	1	1/5	1/4	1/2	1/3		0,38	0,06	0,31	5,09
Protección ambiental	5	1	2	4	3		2,61	0,42	2,12	5,08
Calidad ambiental	4	1/2	1	3	2		1,64	0,26	1,33	5,05
Estado del entorno	2	1/4	1/3	1	1/2		0,61	0,10	0,49	5,05
Condiciones sanitarias del entorno	3	1/3	1/2	2	1		1,00	0,16	0,81	5,06
Lambda máx.	5,07									
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,02									
RI (n=6)	1,24									
CR = CI / RI	0,01									
Veredicto	Consistente (aceptable)									
Experto 2 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Entorno	Protección ambiental	Calidad ambiental	Estado del entorno	Condiciones sanitarias del entorno		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Entorno	1	1/4	1/3	1/2	1/2		0,46	0,08	0,39	5,16
Protección ambiental	4	1	3	5	2		2,61	0,43	2,25	5,24
Calidad ambiental	3	1/3	1	3	2		1,43	0,24	1,22	5,19
Estado del entorno	2	1/5	1/3	1	1/2		0,58	0,10	0,49	5,16
Condiciones sanitarias del entorno	2	1/2	1/2	2	1		1,00	0,16	0,84	5,10
Lambda máx.	5,17									
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,04									
RI (n=6)	1,24									
CR = CI / RI	0,03									
Veredicto	Consistente (aceptable)									
Experto 3 - Matriz de comparación por pares										
Indicador	Entorno	Protección ambiental	Calidad ambiental	Estado del entorno	Condiciones sanitarias del entorno		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Entorno	1	1/3	1/2	2	1/2		0,70	0,12	0,62	5,09

Tabla 45: Resultados del cálculo de ponderaciones AHP de los indicadores organizativos o administrativos del tanque sedimentador

Ponderación AHP de indicadores organizativos o administrativos - Tanque sedimentador													
Experto 1 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Organización operativa	Mantenimiento	Registros técnicos	Capacitación	Recursos disponibles	Comunicación	Emergencias	Control		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Organización operativa	1	1/2	2	2	2	2	1/2	2		1,297	0,141	1,157	8,227
Mantenimiento	2	1	3	3	3	3	1/2	3		1,987	0,216	1,797	8,338
Registros técnicos	1/2	1/3	1	1/2	2	1	1/3	1		0,697	0,076	0,613	8,111
Capacitación	1/2	1/3	2	1	2	2	1/2	2		1,037	0,112	0,939	8,348
Recursos disponibles	1/2	1/3	1/2	1/2	1	1/2	1/4	1/2		0,475	0,052	0,427	8,278
Comunicación	1/2	1/3	1	1/2	2	1	1/3	2		0,760	0,082	0,682	8,278
Emergencias	2	2	3	2	4	3	1	3		2,328	0,253	2,078	8,227
Control	1/2	1/3	1	1/2	2	1/2	1/3	1		0,639	0,069	0,572	8,250
Lambda máx.	8,2571												
CI = (λmax - n)/(n - 1)	0,0367												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0261												
Veredicto	Consistente (acceptable)												
Experto 2 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Organización operativa	Mantenimiento	Registros técnicos	Capacitación	Recursos disponibles	Comunicación	Emergencias	Control		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Organización operativa	1	1/2	3	2	2	2	1/3	2		1,297	0,134	1,117	8,307
Mantenimiento	2	1	4	3	3	3	1/2	3		2,060	0,214	1,764	8,260
Registros técnicos	1/3	1/4	1	1/2	2	1	1/4	1		0,616	0,064	0,526	8,224
Capacitación	1/2	1/3	2	1	2	2	1/3	2		0,985	0,102	0,848	8,300
Recursos disponibles	1/2	1/3	1/2	1/2	1	1/2	1/5	1/2		0,462	0,048	0,400	8,342
Comunicación	1/2	1/3	1	1/2	2	1	1/3	2		0,760	0,079	0,654	8,305

Emergencias	3	2	4	3	5	3	1	4		2,847	0,295	2,420	8,195
Control	1/2	1/3	1	1/2	2	1/2	1/4	1		0,616	0,064	0,526	8,236
Lambda máx.	8,2711												
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,0387												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0275												
Veredicto	Consistente (acceptable)												
Experto 3 - Matriz de comparación por pares													
Indicador	Organización operativa	Mantenimiento	Registros técnicos	Capacitación	Recursos disponibles	Comunicación	Emergencias	Control		Media geom.	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Organización operativa	1	4	5	3	6	4	2	5		3,310	0,310	2,807	9,064
Mantenimiento	1/4	1	5	3	7	4	2	5		2,386	0,223	1,933	8,659
Registros técnicos	1/5	1/5	1	1/2	3	1/2	1/3	2		0,613	0,057	0,473	8,244
Capacitación	1/3	1/3	2	1	4	2	1/2	3		1,130	0,106	0,868	8,209
Recursos disponibles	1/6	1/7	1/3	1/4	1	1/3	1/5	1/2		0,300	0,028	0,235	8,363
Comunicación	1/4	1/4	2	1/2	3	1	1/2	3		0,853	0,080	0,663	8,303
Emergencias	1/2	1/2	3	2	5	2	1	4		1,668	0,156	1,266	8,113
Control	1/5	1/5	1/2	1/3	2	1/3	1/4	1		0,427	0,040	0,332	8,313
Lambda máx.	8,4085												
CI = (λmax – n)/(n – 1)	0,0584												
RI (n=8)	1,4100												
CR = CI / RI	0,0414												
Veredicto	Consistente (acceptable)												
Matriz agregada de los tres expertos (media geométrica por celda)													
Indicador	Organización operativa	Mantenimiento	Registros	Capacitación	Recursos disponibles	Comunicación	Emergencias	Control		Media geom.	Peso final wi	A×w	(A×w)i / wi
Organización operativa	1,00	1,00	3,11	2,29	2,88	2,52	0,69	2,71		1,772	0,185	1,515	8,183
Mantenimiento	1,00	1,00	3,91	3,00	3,98	3,30	0,79	3,56		2,137	0,223	1,829	8,194
Registros	0,32	0,26	1,00	0,50	2,29	0,79	0,30	1,26		0,641	0,067	0,544	8,119
Capacitación	0,44	0,33	2,00	1,00	2,52	2,00	0,44	2,29		1,049	0,110	0,904	8,248

ANEXO 4: Ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obra de captación.

Tabla 46: Resultados del cálculo de ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obra de captación.

Ponderación de dimensiones mediante AHP (Proceso Analítico Jerárquico) para la obra de captación.

Experto 1 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Física	1	2	5	3		2,340	0,467	1,948	4,173
Funcional	1/2	1	5	3		1,655	0,330	1,385	4,194
Ambiental	1/5	1/5	1	2		0,532	0,106	0,459	4,328
Administrativa	1/3	1/3	1/2	1		0,485	0,097	0,416	4,291
Lambda max	4,2465								
CI = (lambda max - n)/(n-1)	0,0822								
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,9000								
CR = CI / RI	0,0913								
Veredicto	Consistente (aceptable)								
Experto 2 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Física	1	2	4	3		2,213	0,443	1,854	4,190
Funcional	1/2	1	5	4		1,778	0,356	1,479	4,160
Ambiental	1/4	1/5	1	1		0,473	0,095	0,384	4,059
Administrativa	1/3	1/4	1	1		0,537	0,107	0,438	4,081
Lambda max	4,1223								
CI = (lambda max - n)/(n-1)	0,0408								
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,9000								
CR = CI / RI	0,0453								
Veredicto	Consistente (aceptable)								
Experto 3 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi

Física	1	1	4	2
Funcional	1	1	5	3
Ambiental	1/4	1/5	1	2
Administrativa	1/2	1/3	1/2	1
Lambda max	4,2292			
CI = (lambda max - n)/(n-1)	0,0764			
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,9000			
CR = CI / RI	0,0849			
Veredicto	Consistente (aceptable)			
Matriz agregada de los 3 expertos (media geometrica de cada celda)				
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa
Física	1,00	1,59	4,31	2,62
Funcional	0,63	1,00	5,00	3,30
Ambiental	0,23	0,20	1,00	1,59
Administrativa	0,38	0,30	0,63	1,00
Lambda max (agregada)	4,1612			
CI	0,0537			
RI (n=4)	0,9000			
CR = CI/RI	0,0597			
Veredicto	Consistente (aceptable, CR<=0.10)			
PESOS FINALES POR DIMENSIÓN (listos para aplicar)				
Dimensión	Peso wi	%		
Física	0,420	42%		
Funcional	0,367	37%		
Ambiental	0,106	11%		
Administrativa	0,106	11%		
	1	100%		

1,682	0,354	1,468	4,147
1,968	0,414	1,700	4,102
0,562	0,118	0,516	4,358
0,537	0,113	0,488	4,309

Media geom. fila	Peso final wi	A×w	(A×w)i / wi
2,058	0,420	1,739	4,137
1,796	0,367	1,514	4,126
0,521	0,106	0,446	4,190
0,519	0,106	0,445	4,192

ANEXO 5: Ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para el tanque sedimentador.

Tabla 47: Resultados del cálculo de ponderación de las dimensiones de vulnerabilidad mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para el tanque sedimentador.

Ponderación de dimensiones mediante AHP (Proceso Analítico Jerárquico) para el tanque sedimentador.

Experto 1 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Física	1	1/2	4	3		1,565	0,314	1,300	4,146
Funcional	2	1	4	4		2,378	0,477	1,943	4,076
Ambiental	1/4	1/4	1	2		0,595	0,119	0,498	4,178
Administrativa	1/3	1/4	1/2	1		0,452	0,091	0,374	4,129
Lambda máx	4,13199								
CI = (lambda máx - n)/(n-1)	0,04400								
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,90000								
CR = CI / RI	0,04889								
Veredicto	Consistente (aceptable)								
Experto 2 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi
Física	1	1	4	1/2		1,189	0,256	1,090	4,257
Funcional	1	1	5	2		1,778	0,383	1,593	4,159
Ambiental	1/4	1/5	1	1/3		0,359	0,077	0,313	4,038
Administrativa	2	1/2	3	1		1,316	0,283	1,219	4,302
Lambda máx	4,1891								
CI = (lambda máx - n)/(n-1)	0,0630								
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,9000								
CR = CI / RI	0,0700								
Veredicto	Consistente (aceptable)								
Experto 3 - Matriz de comparación por pares									
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa		Media geom. fila	Peso wi	A×w	(A×w)i / wi

Física	1	3	5	2	2,340	0,476	2,054	4,312
Funcional	1/3	1	4	3	1,414	0,288	1,235	4,288
Ambiental	1/5	1/4	1	1/2	0,398	0,081	0,326	4,022
Administrativa	1/2	1/3	2	1	0,760	0,155	0,651	4,207
Lambda máx	4,2072							
CI = (lambda máx - n)/(n-1)	0,0691							
RI (n=4, tabla de Saaty)	0,9000							
CR = CI / RI	0,0767							
Veredicto	Consistente (aceptable)							
Matriz agregada de los 3 expertos (media geométrica de cada celda)								
Dimensión	Física	Funcional	Ambiental	Administrativa	Media geom. fila	Peso final wi	A×w	(A×w)i / wi
Física	1,00	1,14	4,31	1,44	1,633	0,351	1,442	4,110
Funcional	0,87	1,00	4,31	2,88	1,815	0,390	1,579	4,049
Ambiental	0,23	0,23	1,00	0,69	0,440	0,094	0,381	4,031
Administrativa	0,69	0,35	1,44	1,00	0,767	0,165	0,679	4,122
Lambda máx (agregada)	4,0779							
CI	0,0260							
RI (n=4)	0,9000							
CR = CI/RI	0,0288							
Veredicto	Consistente (aceptable, CR<=0.10)							
PESOS FINALES POR DIMENSIÓN (listos para aplicar)								
Dimensión	Peso wi	%						
Física	0,35	35%						
Funcional	0,39	39%						
Ambiental	0,09	9%						
Administrativa	0,16	16%						
	1,00	100%						

ANEXO 6: Matrices de la obra de captación

ANEXO 7: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física de la obra de captación.

Matriz de Vulnerabilidad Física – Obra de Captación							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Muros de ala	Grietas y fisuras	5			Inspección visual y registro fotográfico.	De acuerdo con la fotografía N.º 1 y la inspección visual, la estructura presenta un buen estado, sin evidenciar fisuras ni grietas que comprometan su integridad.
		Desprendimiento del concreto	4			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 1, se observó un leve desprendimiento superficial del concreto (desconchamiento).
		Erosión o socavación en la base	5			Inspección visual, observación directa, sondeo en el punto de contacto, entrevista al responsable y análisis del mapa de pendientes.	La verificación de la socavación en la cimentación se realizó mediante inspección visual y sondeo en el punto de contacto. Se hace constar que la cimentación se encuentra sumergida en la acequia, lo que impidió una observación directa completa de la base. No obstante, según lo manifestado por el responsable (Anexo 1) y la estabilidad aparente de la estructura, no se evidenció socavación que comprometa su estabilidad al momento de la inspección. Como información complementaria, se analizó el mapa de pendientes (Anexo 17) del entorno de la obra de captación, en el cual predominan sectores de pendiente baja, con presencia localizada de pendientes mayores a lo largo del área de estudio y próximas al cauce principal. Esta condición topográfica se considera un factor de referencia para la evaluación de la erosión, el comportamiento del escurrimiento superficial y la estabilidad del terreno. No obstante, el mapa de pendientes no permite determinar por sí solo la existencia o magnitud de procesos de socavación ni establecer la estabilidad geotécnica del terreno.
		Verticalidad y estabilidad	5			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual de campo y la fotografía N.º 2 , se constató que la estructura mantiene su verticalidad y alineación, sin inclinaciones, desplazamientos ni deformaciones evidentes.
		Exposición del acero de refuerzo	5			Inspección visual y fotografía.	De acuerdo con lo observado en las fotografías N.º 1 y N.º 2 y la inspección de campo, se constató que la estructura no presenta exposición del acero de refuerzo y mantiene su recubrimiento de concreto en buen estado.
Promedio 'Muros de ala'				4,80	Muy bueno		
2	Caja de recolección	Estado del concreto	4			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 3 , se comprobó la ausencia de fisuras en la estructura; sin embargo, se identificó un leve desgaste superficial del material.
		Filtraciones	4			Fotografía y observación directa.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 4 , se evidenció que no existe pérdida significativa de agua; sin embargo, se identificó una leve infiltración en las paredes de la estructura.
		Estabilidad	5			Fotografía y observación directa.	Mediante la inspección visual y las fotografías N.º 3 y N.º 4 , se verificó que la estructura se encuentra firme y alineada, sin asentamientos visibles.
		Elementos de protección física	1			Fotografía y observación directa.	Mediante la inspección visual y las fotografías N.º 3 y N.º 4 , se verificó que la caja de recolección no dispone de tapa de protección, por lo que permanece expuesta al ingreso de material externo y cuerpos extraños, evidenciándose una deficiencia en la protección física de la infraestructura.
Promedio 'Caja de recolección'				3,50	Bueno		
3	Tubería de conducción	Estado físico	N/V			Observación directa.	No fue posible verificar el estado físico de la tubería, debido a que se encuentra enterrada.
		Uniones	N/V			Observación directa.	No fue posible verificar las uniones debido a que la tubería permanece enterrada.
		Protección física de la tubería	N/V			Observación directa.	No fue posible verificar la protección física de la tubería, debido a que esta se encuentra enterrada durante todo su recorrido.
Promedio 'Tubería de conducción'				N/V	N/V		
4	Canal (acequia)	Erosión del fondo y paredes	4			Fotografía y observación directa.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 5 , se evidenció un desgaste superficial del concreto provocado por la humedad constante y el flujo de agua, acompañado de erosión leve, sin afectación del núcleo ni exposición del acero de refuerzo.
		Grietas o fisuras	5			Fotografía y observación directa.	No se observaron grietas, fisuras ni daños visibles en la estructura durante la inspección de campo y la revisión de la fotografía N.º 5 .
		Estabilidad estructural	5			Fotografía y observación directa.	La estructura no presenta deformaciones, inclinaciones, asentamientos ni otros daños visibles que comprometan su estabilidad estructural, de acuerdo con la inspección visual y la fotografía N.º 5 .
Promedio 'Canal (acequia)'				4,67	Muy bueno		

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Muros de ala	4,80	0,29	1,41
Caja de recolección	3,50	0,46	1,60
Tubería de conducción	N/V	0,15	N/V
Canal (acequia)	4,67	0,10	0,47
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	3,48

0,05

Distribución de pesos AHP si existe un N/V

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Muros de ala	4,80	0,34	1,65
Caja de recolección	3,50	0,51	1,77
Tubería de conducción	N/V	0,00	N/V
Canal (acequia)	4,67	0,15	0,70
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	4,12

Resultado final

Vulnerabilidad física	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	4,12	1,88	Bueno	Baja

1. Muros de ala					
Elemento	5	4	3	2	1
Grietas y fisuras	No existen grietas ni fisuras.	Fisuras superficiales que no afectan la estructura.	Grietas moderadas sin comprometer la estabilidad.	Grietas profundas con afectación estructural parcial.	Grietas severas con riesgo de falla estructural.
Desprendimiento del concreto	No existe desprendimiento.	Desprendimiento superficial o desconcha miento leve.	Desprendimiento moderado con pérdida parcial del recubrimiento.	Desprendimiento importante con exposición del agregado.	Pérdida severa de concreto que compromete la estructura.
Erosión o socavación en la base	No existe erosión ni socavación.	Erosión superficial sin afectar la estabilidad.	Socavación moderada localizada.	Socavación importante que afecta parcialmente la cimentación.	Socavación severa que compromete la estabilidad.
Verticalidad y estabilidad	Totalmente estable y vertical.	Ligera desviación sin afectar el funcionamiento.	Inclinación moderada.	Inclinación importante.	Riesgo de colapso.
Exposición del acero de refuerzo	No existe acero expuesto.	Exposición mínima sin corrosión.	Acero expuesto con corrosión superficial.	Corrosión importante del acero.	Corrosión severa con pérdida de capacidad estructural.

2. Caja de recolección					
Elemento	5	4	3	2	1
Estado del concreto	Concreto íntegro, sin fisuras, desprendimientos ni deterioro.	Leve desgaste superficial o pequeñas fisuras sin afectar la estructura.	Fisuras moderadas o desgaste visible que requiere mantenimiento.	Deterioro importante con desprendimientos parciales del concreto.	Deterioro severo que compromete la estabilidad estructural.
Filtraciones	No existen filtraciones ni pérdidas de agua.	Filtraciones leves sin afectar el funcionamiento de la estructura.	Filtraciones moderadas que requieren mantenimiento.	Filtraciones importantes que disminuyen el desempeño hidráulico.	Filtraciones severas que comprometen el funcionamiento de la caja de recolección.
Estabilidad	Totalmente estable, alineada y sin asentamientos visibles.	Ligera desviación sin afectar la estabilidad.	Asentamiento o inclinación moderada.	Asentamiento importante con afectación parcial de la estructura.	Riesgo de colapso o pérdida de estabilidad estructural.
Elementos de protección física	Dispone de tapa o sistema de protección completo, en buen estado y correctamente instalado.	La protección presenta desgaste leve, pero cumple su función.	La protección presenta deterioro moderado o cierre deficiente.	La protección está muy deteriorada o protege parcialmente la estructura.	No dispone de tapa o sistema de protección física, dejando la estructura totalmente expuesta a la entrada de material externo y cuerpos extraños.

4. Canal (acequia)					
Elemento	5	4	3	2	1

Erosión del fondo y paredes	No existe erosión; el revestimiento se encuentra íntegro.	Desgaste superficial o erosión leve sin afectar la capacidad estructural ni hidráulica.	Erosión moderada con pérdida parcial del revestimiento.	Erosión importante que afecta el funcionamiento del canal.	Erosión severa con pérdida significativa del revestimiento o riesgo de colapso.
Grietas o fisuras	No existen grietas ni fisuras.	Fisuras superficiales que no afectan la estructura.	Grietas moderadas que requieren mantenimiento.	Grietas profundas con afectación parcial de la estructura.	Grietas severas que comprometen la estabilidad estructural.
Estabilidad estructural	Totalmente estable, sin deformaciones, inclinaciones ni asentamientos.	Ligera deformación sin afectar el funcionamiento.	Deformación o asentamiento moderado.	Deformación importante que afecta parcialmente la estabilidad.	Riesgo de colapso o pérdida de estabilidad estructural.

ANEXO 8: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa de la obra de captación

Matriz de Vulnerabilidad Funcional u Operativa - Obra de Captación							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Muros de ala	Ingreso de agua	5			Observación directa, prueba operativa en campo y fotografías.	Mediante la observación de campo, la prueba operativa de campo y la fotografía N.º 6 , pudimos constatar que no existen obstrucciones en la obra de captación.
		Continuidad hidráulica	5			Observación directa del funcionamiento y verificación en campo.	En la fotografía N.º7 , así como en la inspección de campo, se constató que el caudal fluye de manera continua y sin interrupciones significativas durante su operación normal.
Promedio 'Captación'				5,00	Muy bueno		
2	Caja de recolección	Funcionamiento	5			Verificación operativa mediante observación directa.	En la fotografía N.º 8 se observa la caja de recolección, donde se verificó que conduce el caudal de manera continua y sin pérdidas visibles de agua en condiciones normales de operación.
Promedio 'Caja de recolección'				5,00	Muy bueno		
3	Tubería de conducción	Transporte del agua	5			Observación directa y prueba operativa en campo.	El agua se transporta de forma continua y eficiente, pero la tubería está enterrada y no es posible verificar la información, solo mediante la prueba de funcionamiento, en la que el caudal pasa al tanque sedimentador sin obstrucciones, fotografía N.º 9 .
		Fugas	N/V			Observación directa	No fue posible verificar el estado físico, ya que la tubería se encuentra enterrada.
		Obstrucciones	N/V			Observación directa	No fue posible verificar las uniones debido a que la tubería permanece enterrada.
Promedio 'Tubería de conducción'				N/V	N/V		
4	Operación	Disponibilidad de fuente alternativa de abastecimiento.	1			Entrevista al responsable y verificación en campo.	Mediante entrevista (Anexo 1) al responsable se verificó si el sistema dispone de una fuente alternativa de abastecimiento que permita mantener la continuidad del servicio en caso de afectación de la fuente principal.
Promedio 'Operación'				1,00	Muy malo		
5	Mantenimiento	Preventivo	4			Verificación operativa y entrevista.	Se realiza periódicamente, aunque sin un plan formal (Anexo 1), entrevista.
		Correctivo	4			Observación directa y prueba operativa en campo.	Las reparaciones presentan ligeros retrasos sin afectar el servicio (Anexo 1), entrevista.
Promedio 'Mantenimiento'				4,00	Bueno		

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Muros de ala	5,00	0,38	1,90
Caja de recolección	5,00	0,21	1,06
Tubería de conducción	N/V	0,19	N/V
Operación	1,00	0,12	0,12
Mantenimiento	4,00	0,10	0,42
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	3,49

Distribución de pesos AHP si existe un N/V

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Muros de ala	5,00	0,43	2,13
Caja de recolección	5,00	0,26	1,30
Tubería de conducción	N/V	0,00	N/V
Operación	1,00	0,16	0,16
Mantenimiento	4,00	0,15	0,60
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	4,19

0,047

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 - IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	4,19	1,81	Bueno	Baja

1. Muros de ala					
Elemento	5	4	3	2	1
Ingreso de agua	El caudal ingresa de forma continua y sin restricciones.	Presenta leves variaciones que no afectan el abastecimiento.	El ingreso de agua es irregular en ciertos momentos.	El ingreso de agua es insuficiente y afecta parcialmente el funcionamiento.	No existe ingreso de agua o es insuficiente para el funcionamiento del sistema.
Continuidad hidráulica	El flujo es continuo y sin interrupciones.	Presenta interrupciones ocasionales de corta duración.	El flujo presenta interrupciones frecuentes.	El flujo se interrumpe durante gran parte del tiempo.	No existe continuidad hidráulica.

2. Caja de recolección					
Elemento	5	4	3	2	1
Funcionamiento	La caja de recolección cumple completamente su función, sin pérdidas ni obstrucciones.	Presenta leves deficiencias que no afectan su funcionamiento.	Funciona parcialmente y requiere mantenimiento.	Presenta fallas importantes que reducen su eficiencia.	No cumple su función de recolección y conducción del agua.

3. Tubería de conducción (aducción)					
Elemento	5	4	3	2	1
Transporte del agua	El agua se transporta de forma continua y eficiente.	Presenta ligeras pérdidas de eficiencia sin afectar el servicio.	El transporte presenta deficiencias moderadas.	El transporte es deficiente y afecta el abastecimiento.	No transporta agua o el servicio está interrumpido.

Fugas	No existen fugas.	Fugas leves sin afectar el caudal.	Fugas moderadas que requieren reparación.	Fugas importantes con pérdida significativa de agua.	Fugas severas que impiden el funcionamiento adecuado.
Obstrucciones	No existen obstrucciones.	Obstrucciones leves que no afectan el flujo.	Obstrucciones moderadas que reducen parcialmente el caudal.	Obstrucciones importantes que limitan el funcionamiento.	Obstrucción total que impide el paso del agua.

4. Operación					
Elemento	5	4	3	2	1
Fuente alternativa de abastecimiento	Dispone de una fuente alternativa plenamente operativa y disponible para mantener el abastecimiento.	Dispone de una fuente alternativa que puede utilizarse con pequeñas limitaciones.	Dispone de una fuente alternativa con capacidad limitada para mantener parcialmente el abastecimiento.	Existe una fuente alternativa, pero presenta limitaciones importantes para su utilización.	No dispone de una fuente alternativa de abastecimiento.

5. Mantenimiento					
Elemento	5	4	3	2	1
Preventivo	Se ejecuta conforme a un plan periódico y documentado.	Se realiza periódicamente, aunque sin un plan formal.	Se realiza de manera ocasional.	Se realiza únicamente cuando aparecen problemas frecuentes.	No se realiza mantenimiento preventivo.
Correctivo	Las reparaciones se ejecutan de forma inmediata y eficiente.	Las reparaciones presentan ligeros retrasos sin afectar el servicio.	Las reparaciones se realizan con demoras moderadas.	Las reparaciones son poco oportunas y afectan el funcionamiento.	No se ejecutan reparaciones cuando son necesarias.

ANEXO 9: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental de la obra de captación.

Matriz de Vulnerabilidad Ambiental - Obra de Captación							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Entorno de la captación	Cobertura vegetal	4			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección de campo y la fotografía N.º 10 , se verificó la presencia de cobertura vegetal alrededor de la obra de captación, condición que favorece la protección del suelo frente a procesos de erosión superficial.
		Estabilidad del terreno	4			Inspección visual, registro fotográfico y análisis del mapa de pendientes.	Durante la inspección y el recorrido del área, complementados con la fotografía N.º 10 , no se observaron deslizamientos activos, grietas o movimientos significativos del terreno. El mapa de pendiente (Anexo 17) permitió verificar que en el entorno de la obra de captación predominan pendientes bajas, con sectores localizados de mayor inclinación próximos al punto de captación y al cauce principal
Promedio 'Entorno de la captación'				4,00	Bueno		
2	Fuente de abastecimiento (acequia)	Calidad visual del agua	4			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la observación directa en campo y la fotografía N.º 11 , se verificó que el agua presenta una ligera turbidez, característica de las condiciones normales de la fuente de abastecimiento.
		Acumulación de sedimentos	3			Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Durante la inspección se observó una acumulación reducida de sedimentos en la acequia, con presencia de vegetación acuática, sin evidenciarse una obstrucción significativa del paso del caudal en las condiciones actuales de funcionamiento, como se aprecia en la fotografía N.º 12 .
Promedio 'Fuente de abastecimiento (acequia)'				3,50	Bueno		
3	Protección ambiental	Área de protección	1			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante el recorrido perimetral, la observación directa y la fotografía N.º 12 , se verificó que la obra de captación no dispone de un área de protección delimitada, malla ni cerramiento perimetral que restrinja el acceso y las actividades externas en las proximidades del recurso hídrico.

		Presencia de actividades antrópicas	1		Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección de campo, la observación directa y la fotografía N.º 13 , se verificó que la obra de captación se encuentra ubicada dentro de una hacienda, donde se desarrollan actividades agrícolas y de pastoreo en sus alrededores.
Promedio 'Protección ambiental'				1,00	Muy malo	
4	Estado del entorno	Alteración del entorno.	1		Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual, el recorrido del área y la fotografía N.º 13 , se verificó la presencia de áreas destinadas al cultivo de pastizales para alimentación de ganado en las proximidades del tanque sedimentador, evidenciándose una modificación del uso y de las condiciones naturales del entorno inmediato de la infraestructura.
		Presencia de focos de contaminación	1		Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual, el recorrido y la fotografía N.º 13 , se verificó la presencia de actividades de siembra de pastizales y ganadería en las proximidades del tanque sedimentador. Estas actividades constituyen focos potenciales de contaminación debido a la posible presencia de estiércol de ganado cerca de la infraestructura y del recurso hídrico.
Promedio 'Conservación del entorno'				1,00	Muy malo	

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Entorno de la captación	4,00	0,15	0,59
Fuente de abastecimiento (acequia)	3,50	0,41	1,44
Protección ambiental	1,00	0,35	0,35
Estado del entorno	1,00	0,09	0,09
Índice de condición ponderado (IC)		1	2,47

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	2,47	3,53	Malo	Alta

1. Entorno de la captación					
Elemento	5	4	3	2	1
Cobertura vegetal	Cobertura vegetal abundante y bien conservada que protege el suelo.	Cobertura vegetal adecuada con leves áreas descubiertas.	Cobertura vegetal moderada con sectores degradados.	Escasa cobertura vegetal que favorece la erosión.	Ausencia de cobertura vegetal o fuerte degradación del entorno.
Estabilidad del terreno	Terreno estable, sin evidencias de erosión, deslizamientos o asentamientos.	Presenta erosión superficial sin comprometer la estabilidad.	Se observan procesos moderados de erosión o inestabilidad localizada.	Presenta inestabilidad importante con riesgo para la infraestructura.	Terreno altamente inestable con riesgo de deslizamiento o colapso.

2. Fuente de abastecimiento (acequia)					
Elemento	5	4	3	2	1

Calidad visual del agua	Agua transparente, sin coloraciones anormales, olores ni material flotante.	Agua con ligera turbidez o presencia mínima de partículas.	Agua con turbidez moderada o presencia visible de sedimentos.	Agua con alta turbidez o contaminación visible.	Agua con contaminación evidente que compromete su aprovechamiento.
Acumulación de sedimentos	No existe acumulación de sedimentos.	Acumulación leve sin afectar el flujo del agua.	Acumulación moderada que requiere limpieza periódica.	Acumulación importante que reduce el flujo hidráulico.	Acumulación severa que obstruye el paso del agua.

3. Protección ambiental					
Elemento	5	4	3	2	1
Área de protección	Existe un área de protección delimitada, señalizada y conservada.	Existe un área de protección con pequeñas deficiencias.	El área de protección es parcial o insuficiente.	El área de protección presenta un alto grado de deterioro o incumplimiento.	No existe área de protección alrededor de la captación.
Presencia de actividades antrópicas	No existen actividades humanas que representen riesgo para la fuente.	Existen actividades de bajo impacto alejadas de la captación.	Se observan actividades moderadas con posible afectación ambiental.	Existen actividades frecuentes que generan riesgos para la fuente.	Existen actividades intensivas que afectan directamente la captación y su entorno.

4. Estado del entorno					
Elemento	5	4	3	2	1
Alteración del entorno	El entorno permanece sin alteraciones y conserva sus condiciones naturales.	Presenta alteraciones leves que no afectan significativamente las condiciones del entorno.	Presenta alteraciones moderadas que generan cambios en las condiciones naturales del entorno.	Presenta alteraciones importantes que afectan las condiciones del entorno inmediato.	El entorno presenta una fuerte alteración debido a actividades humanas o procesos de degradación.
Presencia de focos de contaminación	No existen focos de contaminación en el entorno de la infraestructura.	Existen focos aislados de contaminación sin afectación significativa.	Se observan focos moderados de contaminación que pueden afectar el entorno o recurso hídrico.	Existen focos importantes de contaminación próximos a la infraestructura o al recurso hídrico.	Existen focos permanentes de contaminación que comprometen las condiciones ambientales y el recurso hídrico.

ANEXO 10: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional de la obra de captación.

Matriz de Vulnerabilidad Organizacional o Administrativa - Obra de Captación							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Gestión de la operación	Responsable de la obra de captación	5			Entrevista al responsable y revisión documental en caso de existir.	Mediante la entrevista (Anexo 1) realizada al responsable del sistema se verificó que existe personal designado para la operación y supervisión de la obra de captación, quien desarrolla las actividades necesarias para garantizar el funcionamiento del sistema.
		Supervisión administrativa	4			Entrevista y revisión de registros en caso de existir.	Durante la entrevista(Anexo 1)se constató que la administración realiza seguimiento a la operación de la obra de captación; sin embargo, no existen registros documentales que evidencien dicha supervisión de manera sistemática.
Promedio 'Gestión de la operación'				4,50	Muy bueno		
2	Mantenimiento	Programa de mantenimiento	1			Revisión documental.	Durante la entrevista (Anexo 1) al responsable y la visita de campo se constató que el mantenimiento de la obra de captación se ejecuta de forma periódica, aproximadamente cada 15 días. No obstante, estas actividades se realizan sin un programa formal o cronograma escrito que establezca su planificación y seguimiento.
		Ejecución del mantenimiento	3			Entrevista y observación directa.	Se verificó que la administración realiza actividades de mantenimiento cuando son necesarias; sin embargo, estas no responden a una planificación técnica previamente establecida.
Promedio 'Mantenimiento'				2,00	Malo		

3	Registros técnicos	Registro de inspecciones	1		Revisión documental.	Mediante la revisión documental se verificó que no existen registros escritos o digitales que documenten las inspecciones realizadas a la obra de captación.
		Registro de mantenimiento	1		Revisión documental.	La revisión de la documentación disponible permitió constatar que las actividades de mantenimiento ejecutadas no son registradas mediante informes o formatos de control.
Promedio 'Registros técnicos'				1,00	Muy malo	
4	Preparación ante emergencias	Procedimiento de actuación	1		Entrevista al responsable y revisión de registros administrativos.	Mediante entrevista (Anexo 1) al responsable y revisión de registros administrativos, se comprobó lo siguiente: No existe procedimiento de actuación ante emergencias.
		Disponibilidad de herramientas	1		Entrevista al responsable y revisión de registros administrativos.	Mediante revisión de registros y entrevista (Anexo 1) al responsable , se constató lo siguiente: No existen herramientas ni equipos para atención de emergencias.
Promedio 'Preparación ante emergencias'				1,00	Muy malo	
5	Capacitación	Capacitación del operador	1		Revisión documental y entrevista al responsable de la operación.	Mediante revisión documental y entrevista (Anexo 1) al responsable de la operación, se evidenció lo siguiente: El operador nunca ha recibido capacitación.
		Capacitación en gestión del riesgo	1		Entrevista al operador y revisión de registros administrativos.	Mediante entrevista (Anexo 1) al responsable y revisión de registros administrativos, se verificó lo siguiente: No existe capacitación en gestión del riesgo.
Promedio 'Capacitación'				1,00	Muy malo	
6	Comunicación	Comunicación de novedades	3		Revisión de registros y entrevista.	Durante la entrevista (Anexo 1) se verificó que las novedades o anomalías detectadas en la obra de captación se comunican de forma verbal al responsable del sistema; sin embargo, no existe un procedimiento formal ni registros que documenten estos reportes.
		Coordinación institucional	4		Revisión documental y entrevista al responsable de la operación.	Mediante la entrevista (Anexo 1) realizada al responsable del sistema se constató que, en caso de una emergencia ocasionada por una posible erupción del volcán Cotopaxi, la administración coordinaría con las instituciones competentes del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos para gestionar recursos técnicos, logísticos y económicos destinados al restablecimiento del servicio de agua. Sin embargo, durante la evaluación no se presentaron documentos que formalicen dicha coordinación.
Promedio 'Comunicación'				3,50	Bueno	
7	Recursos	Disponibilidad de materiales	3		Entrevista al operador y revisión de registros administrativos.	Mediante entrevista (Anexo 1) al operador y revisión de registros administrativos, se evidenció lo siguiente: Los materiales son suficientes únicamente para las actividades básicas.
		Recursos económicos	3		Entrevista al operador y revisión de registros administrativos.	Mediante revisión de registros y entrevista (Anexo 1) al responsable , se verificó lo siguiente: Los recursos permiten cubrir únicamente las necesidades básicas.
Promedio 'Recursos'				3,00	Regular	
8	Control administrativo	Evaluación del funcionamiento	4		Revisión documental y entrevista al responsable de la operación.	Mediante revisión documental y entrevista (Anexo 1) al responsable de la operación, se comprobó lo siguiente: Las evaluaciones son frecuentes, aunque con documentación limitada.
		Implementación de acciones correctivas	4		Entrevista al responsable y revisión de registros administrativos.	Mediante entrevista (Anexo 1)al responsable y revisión de registros administrativos, se constató lo siguiente: Se implementan con pequeñas demoras.
Promedio 'Control administrativo'				4,00	Bueno	

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Gestión de la operación	4,50	0,24	1,08
Mantenimiento	2,00	0,16	0,33
Registros técnicos	1,00	0,06	0,06
Preparación ante emergencias	1,00	0,26	0,26
Capacitación	1,00	0,11	0,11
Comunicación	3,50	0,08	0,28
Recursos	3,00	0,05	0,14
Control administrativo	4,00	0,03	0,14
Índice de condición ponderado (IC)		1	2,40

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 - IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	2,40	3,60	Malo	Alta

1. Gestión de la operación					
Elemento	5	4	3	2	1
Responsable de la obra de captación	Existe un responsable claramente designado con funciones definidas.	Existe un responsable, aunque con funciones parcialmente definidas.	La responsabilidad es compartida o poco clara.	No existe un responsable permanente.	No existe ningún responsable de la operación.
Supervisión administrativa	La supervisión es periódica, documentada y efectiva.	La supervisión se realiza con cierta periodicidad, pero con documentación limitada.	La supervisión es ocasional.	La supervisión es poco frecuente.	No existe supervisión administrativa.

2. Mantenimiento					
Elemento	5	4	3	2	1
Programa de mantenimiento	Existe un programa formal, actualizado y se cumple periódicamente.	Existe un programa con pequeños incumplimientos.	Existe un programa, pero se aplica de forma irregular.	El programa está desactualizado o casi no se aplica.	No existe programa de mantenimiento.
Ejecución del mantenimiento	El mantenimiento se ejecuta oportunamente y de forma planificada.	Se ejecuta con pequeñas demoras.	Se realiza únicamente cuando se presentan problemas.	Se realiza de forma esporádica.	No se ejecuta mantenimiento.

3. Registros técnicos					
Elemento	5	4	3	2	1

Registro de inspecciones	Existen registros completos, actualizados y organizados.	Existen registros con información parcialmente actualizada.	Los registros son incompletos.	Existen pocos registros y están desactualizados.	No existen registros de inspección.
Registro de mantenimiento	Se documentan todas las actividades de mantenimiento.	Se registran la mayoría de las actividades.	Solo se registran algunas intervenciones.	Los registros son escasos e incompletos.	No existen registros de mantenimiento.

4. Preparación ante emergencias					
Elemento	5	4	3	2	1
Procedimiento de actuación	Existe un procedimiento documentado y conocido por el personal.	Existe un procedimiento con pequeñas deficiencias.	El procedimiento está incompleto o desactualizado.	El procedimiento es insuficiente y poco conocido.	No existe procedimiento de actuación ante emergencias.
Disponibilidad de herramientas	Se dispone de todas las herramientas y equipos necesarios para responder a emergencias.	Existen pequeñas limitaciones de equipos.	Los equipos son insuficientes para algunas actividades.	La disponibilidad de herramientas es muy limitada.	No existen herramientas ni equipos para atención de emergencias.

5. Capacitación					
Elemento	5	4	3	2	1
Capacitación del operador	El operador recibe capacitación periódica y documentada.	La capacitación es ocasional.	La capacitación es esporádica y limitada.	El operador recibió capacitación hace mucho tiempo.	El operador nunca ha recibido capacitación.
Capacitación en gestión del riesgo	Existe capacitación periódica en gestión del riesgo y respuesta ante emergencias.	La capacitación es ocasional.	La capacitación es limitada.	La capacitación es insuficiente.	No existe capacitación en gestión del riesgo.

6. Comunicación					
Elemento	5	4	3	2	1
Comunicación de novedades	Las novedades se comunican de forma inmediata y documentada.	La comunicación es oportuna con pequeñas demoras.	La comunicación es ocasional.	La comunicación presenta retrasos frecuentes.	No existe comunicación de novedades.
Coordinación institucional	Existe coordinación permanente con las instituciones competentes.	La coordinación es frecuente.	La coordinación es ocasional.	La coordinación es limitada.	No existe coordinación institucional.

7. Recursos					
Elemento	5	4	3	2	1
Disponibilidad de materiales	Los materiales necesarios están siempre disponibles.	Existen pequeñas limitaciones de materiales.	Los materiales son suficientes únicamente para las actividades básicas.	La disponibilidad de materiales es insuficiente.	No existen materiales para la operación y mantenimiento.
Recursos económicos	Existen recursos económicos suficientes y permanentes.	Los recursos son adecuados con pequeñas limitaciones.	Los recursos permiten cubrir únicamente las necesidades básicas.	Los recursos son insuficientes para mantener el sistema.	No existen recursos económicos destinados a la operación y mantenimiento.

8. Control administrativo					
Elemento	5	4	3	2	1
Evaluación del funcionamiento	Se realizan evaluaciones periódicas documentadas del funcionamiento del sistema.	Las evaluaciones son frecuentes, aunque con documentación limitada.	Las evaluaciones son ocasionales.	Las evaluaciones son poco frecuentes.	No se realiza evaluación del funcionamiento.

Implementación de acciones correctivas	Las acciones correctivas se implementan oportunamente y se verifica su eficacia.	Se implementan con pequeñas demoras.	Solo se aplican algunas acciones correctivas.	Las acciones correctivas son insuficientes.	No se implementan acciones correctivas.
---	--	--------------------------------------	---	---	---

ANEXO 11:Matrices del tanque sedimentador

ANEXO 12:Matriz de evaluación de la vulnerabilidad física del tanque sedimentador.

Matriz de Vulnerabilidad Física - Tanque Sedimentador							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Muros estructurales	Estado del concreto	5			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 14 se verificó que los muros estructurales del tanque sedimentador no presentan grietas, fisuras ni desprendimientos significativos del concreto, conservando adecuadas condiciones físicas.
		Estabilidad estructural	5			Fotografía y observación directa.	Durante la inspección de campo y la fotografía N.º 15 se constató que los muros mantienen su estabilidad general, sin desplazamientos o deformaciones visibles. Como complemento, el mapa (Anexo 23) de pendientes permitió verificar las condiciones topográficas del entorno inmediato del tanque, donde predominan pendientes bajas
		Humedad y filtraciones	3			Inspección visual y registro fotográfico.	La fotografía N.º 16 y la inspección visual permitieron identificar la presencia de humedad y filtraciones localizadas en algunos sectores de la estructura, como en la entrada de la tubería y al lado de las compuertas.
Promedio 'Muros estructurales'				4,33	Muy bueno		
2	Fondo del tanque	Estado superficial	4			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 17 casi no se observaron signos de desgaste superficial y erosión en el fondo del tanque sedimentador, que no afectan sus condiciones físicas.
		Integridad estructural	5			Fotografía y observación directa.	Durante la inspección de campo y fotografía N.º 17 , se constató que el tanque no presenta fisuras ni fracturas, confirmando que conserva su estabilidad estructural de manera óptima.
Promedio 'Fondo del tanque'				4,50	Muy bueno		
3	Sistema de ingreso	Tubería de ingreso	5			Inspección visual y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 18 se verificó que la tubería de ingreso se encuentra en buen estado físico, sin daños visibles que afecten su funcionamiento.
Promedio 'Sistema de ingreso'				5,00	Muy bueno		
4	Compuertas de control	Estado físico	3			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º19 se verificó que la compuerta presenta un estado físico regular, evidenciándose desgaste superficial producto del tiempo de servicio.
		Corrosión	3			Fotografía y observación directa.	La fotografía N.º 20 permitió evidenciar la presencia de corrosión superficial en algunos elementos metálicos; sin embargo, esta condición no impide actualmente su funcionamiento.
Promedio 'Compuertas de control'				3,00	Regular		
5	Sistema de salida	Tubería de salida	5			Inspección visual y registro fotográfico.	La inspección visual y la fotografía N.º21 permitieron verificar que la tubería de salida se encuentra en buen estado físico y no presenta daños visibles.
Promedio 'Sistema de salida'				5,00	Muy bueno		
6	Protección del tanque	Cubierta	1			Inspección visual y fotografía.	La fotografía N.º 22 y la inspección visual evidenciaron que el tanque sedimentador no dispone de cubierta ni de un sistema de protección que reduzca el ingreso de ceniza volcánica y otros materiales durante una posible erupción del volcán Cotopaxi.
Promedio 'Protección del tanque'				1,00	Muy malo		
7	Estado de conservacion	Deterioro superficial	4			Inspección visual y fotografía.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º23 se constató que el deterioro superficial corresponde principalmente al desgaste normal por el tiempo de servicio y no compromete actualmente la estabilidad estructural.
Promedio 'Estado de conservacion'				4,00	Bueno		

8	Condición general de la infraestructura	Seguridad estructural	5		Fotografía y observación directa.	Durante la inspección de campo y la fotografía N.º 23 no se identificaron riesgos visibles de falla estructural que comprometan el funcionamiento inmediato del tanque sedimentador.
		Vida útil aparente	4		Inspección visual y registro fotográfico.	Con base en la inspección técnica y la fotografía N.º 23 , se verificó que la infraestructura mantiene condiciones adecuadas para continuar prestando servicio, siempre que se ejecuten actividades periódicas de mantenimiento.
Promedio 'Condición general de la infraestructura'				4,50	Muy bueno	

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Muros estructurales	4,33	0,29	1,27
Fondo del tanque	4,50	0,11	0,51
Sistema de ingreso	5,00	0,05	0,23
Compuertas de control	3,00	0,08	0,23
Sistema de salida	5,00	0,05	0,23
Protección del tanque	1,00	0,21	0,21
Estado de conservación	4,00	0,06	0,25
Condición general de la infraestructura	4,50	0,15	0,70
Índice de condición ponderado (IC)		1	3,62

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	3,62	2,38	Bueno	Baja

1. Muros estructurales

Elemento	5	4	3	2	1
Estado del concreto	Concreto íntegro, sin fisuras, desprendimientos ni deterioro.	Leve desgaste superficial sin afectar la estructura.	Fisuras o desgaste moderado que requiere mantenimiento.	Deterioro importante con pérdida parcial del recubrimiento.	Deterioro severo que compromete la estabilidad estructural.
Estabilidad estructural	Muros totalmente estables, sin deformaciones ni asentamientos.	Ligera desviación sin afectar la estabilidad.	Deformaciones moderadas que requieren seguimiento.	Inestabilidad importante que afecta parcialmente la estructura.	Riesgo de colapso estructural.

Humedad y filtraciones	No existen humedades ni filtraciones.	Humedad superficial sin filtración activa.	Filtraciones leves que requieren mantenimiento.	Filtraciones importantes que afectan el funcionamiento.	Filtraciones severas que comprometen la estructura.
-------------------------------	---------------------------------------	--	---	---	---

2. Fondo del tanque					
Elemento	5	4	3	2	1
Estado superficial	Superficie íntegra, sin desgaste ni erosión.	Desgaste superficial leve.	Desgaste moderado con necesidad de mantenimiento.	Deterioro importante del revestimiento.	Deterioro severo que compromete la estructura.
Integridad estructural	Sin fisuras, deformaciones ni asentamientos.	Leves imperfecciones sin afectar la estructura.	Deterioro moderado.	Daños importantes.	Falla estructural evidente.

3. Sistema de ingreso					
Elemento	5	4	3	2	1
Tubería de ingreso	Se encuentra en buen estado, sin fugas ni daños visibles.	Presenta desgaste superficial sin afectar el funcionamiento.	Deterioro moderado o pequeñas fugas.	Daños importantes que afectan el funcionamiento.	Tubería deteriorada o fuera de servicio.

4. Compuertas de control					
Elemento	5	4	3	2	1
Estado físico	Compuertas en excelente estado y funcionamiento.	Leve desgaste sin afectar la operación.	Desgaste moderado que requiere mantenimiento.	Deterioro importante que dificulta la operación.	Compuertas inoperables o con daños severos.
Corrosión	No existe corrosión.	Corrosión superficial.	Corrosión moderada sin pérdida de funcionalidad.	Corrosión importante que afecta la operación.	Corrosión severa con pérdida de capacidad funcional.

5. Sistema de salida					
Elemento	5	4	3	2	1
Tubería de salida	Se encuentra en buen estado, sin fugas ni daños visibles.	Presenta desgaste superficial sin afectar el funcionamiento.	Deterioro moderado o pequeñas fugas.	Daños importantes que afectan parcialmente el servicio.	Tubería deteriorada o fuera de funcionamiento.

6. Protección del tanque					
Elemento	5	4	3	2	1
Cubierta	El tanque dispone de una cubierta completa, resistente y en buen estado.	La cubierta presenta desgaste leve sin afectar su función.	La cubierta presenta deterioro moderado o protección parcial.	La cubierta está muy deteriorada y protege parcialmente el tanque.	El tanque no dispone de cubierta, quedando totalmente expuesto a agentes externos.
Protección perimetral	Existe cerramiento completo y en buen estado.	El cerramiento presenta pequeñas deficiencias.	El cerramiento es parcial.	El cerramiento está deteriorado y brinda poca protección.	No existe protección perimetral.

Ingreso de animales	No existe evidencia de ingreso de animales.	Existe bajo riesgo de ingreso.	Se observan evidencias ocasionales de ingreso.	El ingreso de animales es frecuente.	El ingreso de animales es permanente o sin ninguna restricción.
----------------------------	---	--------------------------------	--	--------------------------------------	---

7. Estado de conservación					
Elemento	5	4	3	2	1
Deterioro superficial	No presenta deterioro superficial.	Presenta desgaste superficial leve.	Deterioro moderado que requiere mantenimiento.	Deterioro importante del acabado superficial.	Deterioro severo que compromete la conservación de la infraestructura.

8. Condición general de la infraestructura					
Elemento	5	4	3	2	1
Seguridad estructural	La infraestructura es completamente segura y estable.	Presenta pequeñas deficiencias sin afectar la seguridad.	Existen condiciones moderadas que requieren seguimiento.	La seguridad estructural está comprometida parcialmente.	Existe riesgo de falla estructural.
Vida útil aparente	La infraestructura conserva una vida útil elevada y buen estado general.	Presenta desgaste propio del uso, manteniendo buenas condiciones.	La vida útil remanente es moderada y requiere mantenimiento.	La infraestructura presenta un avanzado deterioro por envejecimiento.	La vida útil está prácticamente agotada y requiere rehabilitación o

ANEXO 13: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad funcional u operativa del tanque sedimentador.

Matriz de Vulnerabilidad Funcional u Operativa - Tanque Sedimentador

N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Ingreso del agua	Continuidad del caudal	5			Verificación operativa mediante observación directa y fotografía.	Mediante la observación directa durante la operación del sistema y la fotografía N.º 24 , se verificó que el agua ingresa de forma continua al tanque sedimentador, sin interrupciones que afecten su funcionamiento.
		Regulación del caudal	5			Observación directa y prueba operativa en campo.	Durante la prueba de funcionamiento de las compuertas y la fotografía N.º 25 , se constató que el caudal puede regularse adecuadamente, permitiendo controlar el ingreso de agua al tanque sedimentador.
		Obstrucciones	3			Observación directa del funcionamiento y verificación en campo.	En la fotografía N.º 24 se puede observar que el tubo de ingreso se encuentra libre de obstrucciones, permitiendo un flujo constante; sin embargo, la cámara de recepción presenta acumulación de vegetación y sedimentos en el fondo que requieren limpieza.
Promedio 'Ingreso del agua'				4,33	Muy bueno		
2	Proceso de sedimentación	Retención de sedimentos	4			Verificación operativa mediante observación directa.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 26 se verificó la presencia de sedimentos acumulados en el fondo del tanque sedimentador, evidenciando que la estructura retiene material sólido. No obstante, la cantidad de sedimentos almacenados reduce el volumen útil del tanque y puede disminuir la eficiencia del proceso de sedimentación, por lo que requiere labores de limpieza y mantenimiento periódico
		Acumulación de lodos	3			Observación directa y prueba operativa en campo.	La inspección de campo y la fotografía N.º 26 permitieron verificar la presencia de una moderada acumulación de lodo en el fondo del tanque sedimentador. Esta condición requiere limpieza.
		Tiempo de retención	5			Observación directa del funcionamiento y verificación en campo.	Durante la observación del funcionamiento y la entrevista al operador, complementadas con la fotografía N.º 26 , se verificó que el tiempo de permanencia del agua favorece el proceso de sedimentación en condiciones normales de operación.
Promedio 'Proceso de sedimentación'				4,00	Bueno		
3	Control hidráulico	Distribución del flujo	5			Verificación operativa mediante observación directa.	La observación directa y la fotografía N.º 27 permitieron verificar que el flujo de agua se distribuye de manera uniforme dentro del tanque sedimentador.

		Control del nivel de agua	5		Observación directa y prueba operativa en campo.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 27 se observó que el nivel del agua se mantiene dentro del rango normal de operación, sin evidenciar desbordamientos ni pérdidas visibles durante la visita de campo.
Promedio 'Control hidráulico'				5,00	Muy bueno	
4	Salida del agua	Descarga	5		Observación directa del funcionamiento y verificación en campo.	La observación directa y la fotografía N.º 28 permitieron constatar que la descarga del agua sedimentada se realiza de forma continua durante las condiciones normales de funcionamiento.
		Continuidad del flujo de salida	5		Verificación operativa mediante observación directa.	Mediante verificación operativa mediante observación directa, se verificó lo siguiente: El flujo de salida es continuo y estable.
Promedio 'Salida del agua'				5,00	Muy bueno	
5	Limpieza del tanque	Frecuencia de limpieza	4		Observación directa y prueba operativa en campo.	Mediante la entrevista (Anexo 1) al personal a cargo del sistema se verificó que el tanque recibe mantenimiento mediante labores de limpieza programadas cada 15 días, lo que contribuye a controlar la acumulación de sedimentos y conservar las condiciones operativas del sistema.
		Retiro de sedimentos	4		Observación directa del funcionamiento y verificación en campo.	La entrevista (Anexo 1) al operador y la inspección visual permitieron verificar que los sedimentos acumulados en el tanque son retirados aproximadamente cada 15 días.
Promedio 'Limpieza del tanque'				4,00	Bueno	
6	Operatividad del sistema	Operatividad durante el mantenimiento.	4		Verificación operativa mediante observación directa.	Mediante la inspección de campo, la entrevista (Anexo 1) y la fotografía N.º 29 , se verificó que el tanque sedimentador presenta una interrupción temporal de su funcionamiento durante las actividades de limpieza, debido a que se realiza el vaciado del tanque para ejecutar el mantenimiento. Una vez finalizada esta actividad, el tanque retoma su funcionamiento normal.
		Disponibilidad operativa	4		Observación directa y prueba operativa en campo.	Mediante la observación directa, la entrevista (Anexo 1) y la fotografía N.º 30 , se verificó la presencia de vegetación acuática abundante y acumulación de sedimentos en el tanque sedimentador.
Promedio 'Operatividad del sistema'				4,00	Bueno	

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Ingreso del agua	4,33	0,37	1,61
Proceso de sedimentación	4,00	0,20	0,79
Control hidráulico	5,00	0,12	0,61
Salida del agua	5,00	0,19	0,95
Limpieza del tanque	4,00	0,06	0,24
Operatividad del sistema	4,00	0,06	0,24
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	4,44

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	4,44	1,56	Muy bueno	Muy baja

1. Ingreso del agua					
Elemento	5	4	3	2	1
Continuidad del caudal	El ingreso de agua es continuo, sin interrupciones.	Presenta interrupciones leves y ocasionales.	El ingreso presenta interrupciones moderadas.	El ingreso de agua es irregular y afecta el funcionamiento.	No existe continuidad del caudal.

Regulación del caudal	El caudal se regula adecuadamente y de forma constante.	Presenta pequeñas variaciones sin afectar la operación.	La regulación es moderada y requiere ajustes.	La regulación es deficiente y afecta el proceso.	No existe control del caudal.
Obstrucciones	No existen obstrucciones.	Obstrucciones leves sin afectar el funcionamiento.	Obstrucciones moderadas que reducen parcialmente el flujo.	Obstrucciones importantes que limitan la operación.	Obstrucción total que impide el ingreso del agua.

2. Proceso de sedimentación					
Elemento	5	4	3	2	1
Retención de sedimentos	El tanque retiene eficientemente los sedimentos.	Presenta una ligera disminución en la eficiencia.	La retención es moderada.	La retención es deficiente.	No existe retención efectiva de sedimentos.
Acumulación de lodos	No existe acumulación significativa de lodos.	Existe una acumulación leve que no afecta el funcionamiento.	Acumulación moderada que requiere limpieza.	Acumulación importante que reduce la eficiencia.	Acumulación severa que impide el funcionamiento adecuado.
Tiempo de retención	El tiempo de retención es adecuado para la sedimentación.	Presenta ligeras variaciones sin afectar el proceso.	El tiempo de retención es moderadamente insuficiente.	El tiempo de retención es deficiente.	El tiempo de retención es totalmente inadecuado.

3. Control hidráulico					
Elemento	5	4	3	2	1
Funcionamiento de las compuertas	Las compuertas operan correctamente y sin restricciones.	Presentan desgaste leve sin afectar la operación.	Funcionan con dificultad y requieren mantenimiento.	Su funcionamiento es deficiente.	No funcionan o permanecen inoperables.
Distribución del flujo	El flujo se distribuye uniformemente en el tanque.	Presenta pequeñas variaciones sin afectar la sedimentación.	La distribución es moderadamente irregular.	La distribución del flujo es deficiente.	No existe una distribución adecuada del flujo.
Control del nivel de agua	El nivel de agua se mantiene dentro de los parámetros de operación.	Presenta pequeñas variaciones.	El control es moderado y requiere ajustes.	El control del nivel es deficiente.	No existe control del nivel de agua.

4. Salida del agua					
Elemento	5	4	3	2	1
Descarga	La descarga funciona correctamente y sin restricciones.	Presenta leves variaciones sin afectar el servicio.	La descarga presenta deficiencias moderadas.	La descarga es deficiente.	La descarga no funciona.
Continuidad del flujo de salida	El flujo de salida es continuo y estable.	Presenta interrupciones ocasionales.	El flujo presenta interrupciones moderadas.	El flujo es irregular y afecta el servicio.	No existe salida de agua.

5. Limpieza del tanque					
Elemento	5	4	3	2	1
Frecuencia de limpieza	La limpieza se realiza periódicamente según un programa establecido.	La limpieza es periódica con ligeras variaciones en la frecuencia.	La limpieza se realiza de manera ocasional.	La limpieza es poco frecuente.	No se realiza limpieza del tanque.

Retiro de sedimentos	Los sedimentos se retiran completamente durante cada mantenimiento.	Se retira la mayor parte de los sedimentos.	El retiro es parcial.	El retiro de sedimentos es insuficiente.	No se realiza retiro de sedimentos.
-----------------------------	---	---	-----------------------	--	-------------------------------------

6. Operatividad del sistema					
Elemento	5	4	3	2	1
Operatividad durante el mantenimiento	El sistema continúa operando sin afectar significativamente el abastecimiento durante las actividades de mantenimiento.	Presenta afectaciones leves durante el mantenimiento.	La operación se reduce parcialmente durante el mantenimiento.	La operación se interrumpe con frecuencia durante el mantenimiento.	El sistema debe suspender completamente su funcionamiento para realizar el mantenimiento.
Disponibilidad operativa	El sistema permanece disponible y operativo de forma continua.	Presenta interrupciones menores.	La disponibilidad es moderada.	La disponibilidad es limitada.	El sistema presenta frecuentes interrupciones o está fuera de servicio.

ANEXO 14: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad ambiental del tanque sedimentador.

Matriz de Vulnerabilidad Ambiental - Tanque Sedimentador							
N	Indicador	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Entorno	Cobertura vegetal	5			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección de campo y la fotografía N.º 31 se verificó que el entorno del tanque sedimentador presenta abundante cobertura vegetal, la cual protege el suelo frente a procesos erosivos y favorece la estabilidad del área circundante.
		Erosión	4			Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	La inspección visual y la fotografía N.º 32 permitieron verificar que el terreno alrededor del tanque sedimentador no presenta procesos erosivos significativos. El mapa (Anexo 23) de pendientes permitió identificar el predominio de pendientes bajas en el entorno del tanque, con sectores localizados de mayor inclinación próximos a la infraestructura, complementando la evaluación de las condiciones de escurrimiento y erosión del terreno.
Promedio 'Entorno'				4,50	Muy bueno		
2	Protección ambiental	Área de protección	1			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección de campo y las fotografías N.º 31 y N.º 32 , se constató que el tanque sedimentador no dispone de un área de protección delimitada, debido a la ausencia de malla o cerramiento perimetral que restrinja el ingreso de personas, animales y actividades externas que puedan afectar la infraestructura y la calidad del agua.
		Actividades antrópicas	1			Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante la observación directa y la fotografía N.º 33 se verificó la presencia de actividades agrícolas y pecuarias en las inmediaciones del tanque sedimentador, las cuales representan un riesgo potencial de contaminación.
Promedio 'Protección ambiental'				1,00	Muy malo		
3	Calidad ambiental	Residuos sólidos	5			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual, el recorrido del área circundante y el registro fotográfico, se verificó que no existe presencia de residuos sólidos acumulados en el área inmediata del tanque sedimentador ni en sus alrededores.
		Presencia de animales	1			Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual y la fotografía N.º 34 se verificó que el tanque sedimentador no dispone de barreras físicas que impidan el ingreso de animales, incrementando el riesgo de contaminación del agua.
Promedio 'Calidad ambiental'				3,00	Regular		
4	Estado del entorno	Alteración del entorno.	1			Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual, el recorrido del área y la fotografía N.º 33 , se verificó la presencia de áreas destinadas al cultivo de pastizales para alimentación de ganado en las proximidades del tanque sedimentador, evidenciándose una modificación del uso y de las condiciones naturales del entorno inmediato de la infraestructura.

		Presencia de focos de contaminación	1		Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante la inspección visual, el recorrido y la fotografía N.º 33 , se verificó la presencia de actividades de siembra de pastizales y ganadería en las proximidades del tanque sedimentador. Estas actividades constituyen focos potenciales de contaminación debido a la posible presencia de estiércol de ganado cerca de la infraestructura y del recurso hídrico.
Promedio 'Estado del entorno'				1,00	Muy malo	
5	Condiciones sanitarias del entorno	Limpieza	2		Observación directa del entorno y registro fotográfico.	Mediante observación directa del entorno y la fotografía N.º 34 , se evidenció lo siguiente: La limpieza es deficiente; requiere mayor frecuencia de limpieza.
		Condiciones de higiene del entorno	3		Inspección visual del entorno y registro fotográfico.	Mediante inspección visual del entorno y la fotografía N.º 34 se verificó lo siguiente: Las condiciones de higiene son regulares y requieren mejoras.
Promedio 'Gestión ambiental'				2,50	Malo	

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Entorno	4,50	0,08	0,37
Protección ambiental	1,00	0,41	0,41
Calidad ambiental	3,00	0,25	0,75
Estado del entorno	1,00	0,09	0,09
Condiciones sanitarias del entorno	2,50	0,17	0,42
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	2,04

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	2,04	3,96	Malo	Alta

1. Entorno					
Elemento	5	4	3	2	1
Cobertura vegetal	Cobertura vegetal abundante y bien conservada que protege el suelo.	Cobertura vegetal adecuada con pequeñas áreas descubiertas.	Cobertura vegetal moderada con sectores degradados.	Escasa cobertura vegetal que favorece la erosión.	Ausencia de cobertura vegetal o fuerte degradación del entorno.
Erosión	No existe erosión del terreno.	Erosión superficial sin afectar la estabilidad.	Erosión moderada que requiere medidas de control.	Erosión importante que afecta el entorno del tanque.	Erosión severa con riesgo para la infraestructura.

2. Protección ambiental					
Elemento	5	4	3	2	1
Área de protección	Existe un área de protección delimitada, señalizada y conservada.	El área de protección presenta pequeñas deficiencias.	El área de protección es parcial o insuficiente.	El área de protección está deteriorada o con limitado cumplimiento.	No existe área de protección alrededor del tanque sedimentador.
Actividades antrópicas	No existen actividades humanas que representen riesgo para la infraestructura.	Existen actividades de bajo impacto alejadas del tanque.	Se observan actividades moderadas con posible afectación.	Existen actividades frecuentes que generan riesgo para el tanque.	Existen actividades intensivas que afectan directamente el tanque y su entorno.

3. Calidad ambiental					
Elemento	5	4	3	2	1
Residuos sólidos	No existen residuos sólidos en el entorno del tanque.	Se observan residuos aislados sin afectar el funcionamiento.	Existe una cantidad moderada de residuos que requiere limpieza.	Acumulación importante de residuos sólidos.	Acumulación severa de residuos que afecta las condiciones ambientales.
Presencia de animales	No existe evidencia del ingreso o permanencia de animales.	Existe bajo riesgo de ingreso de animales.	Se observa presencia ocasional de animales.	La presencia de animales es frecuente.	Existe ingreso permanente de animales que representa riesgo de contaminación.

4. Estado del entorno					
Elemento	5	4	3	2	1
Alteración del entorno	El entorno permanece sin alteraciones y conserva sus condiciones naturales.	Presenta alteraciones leves que no afectan significativamente las condiciones del entorno.	Presenta alteraciones moderadas que generan cambios en las condiciones naturales del entorno.	Presenta alteraciones importantes que afectan las condiciones del entorno inmediato.	El entorno presenta una fuerte alteración debido a actividades humanas o procesos de degradación.
Presencia de focos de contaminación	No existen focos de contaminación en el entorno de la infraestructura.	Existen focos aislados de contaminación sin afectación significativa.	Se observan focos moderados de contaminación que pueden afectar el entorno o recurso hídrico.	Existen focos importantes de contaminación próximos a la infraestructura o al recurso hídrico.	Existen focos permanentes de contaminación que comprometen las condiciones ambientales y el recurso hídrico.

5. Condiciones sanitarias del entorno					
Elemento	5	4	3	2	1
Limpieza	El entorno permanece limpio y recibe mantenimiento periódico.	Se observan pequeñas deficiencias de limpieza.	La limpieza es aceptable, pero requiere mayor frecuencia.	La limpieza es deficiente.	No se realizan actividades de limpieza.
Condiciones de higiene del entorno	El entorno presenta condiciones higiénicas adecuadas y sin riesgos sanitarios.	Existen leves deficiencias que no representan riesgo.	Las condiciones de higiene son regulares y requieren mejoras.	Las condiciones higiénicas son deficientes	El entorno presenta condiciones insalubres que representan un riesgo para la calidad del agua.

ANEXO 15: Matriz de evaluación de la vulnerabilidad organizacional del tanque sedimentador.

Matriz de Vulnerabilidad Organizacional o Administrativa - Tanque Sedimentador							
N	Componente	Elemento	Calificación (1-5)	Promedio del indicador (IC)	Estado (IC)	Método de verificación	Verificación
1	Organización operativa	Responsable del tanque	5			Entrevista al responsable del sistema.	Mediante la entrevista (Anexo 1) realizada al responsable del sistema se verificó que existe un encargado designado para la operación, supervisión y mantenimiento del tanque sedimentador.
		Supervisión	5			Entrevista al responsable y observación directa.	Durante la entrevista (Anexo 1) al responsable y la observación de campo se constató que se realizan inspecciones periódicas para verificar el estado y funcionamiento del tanque sedimentador; sin embargo, estas actividades no cuentan con registros documentales.
Promedio 'Operación'				5,00	Muy bueno		

2	Mantenimiento	Programa de mantenimiento	1			Entrevista al responsable del sistema.	La entrevista (Anexo 1) realizada al responsable permitió verificar que no existe un programa formal de mantenimiento preventivo para el tanque sedimentador, por lo que las actividades se ejecutan de acuerdo con las necesidades del sistema.
		Ejecución	3			Entrevista al responsable y observación directa del estado del tanque.	Mediante la entrevista (Anexo 1) al operador y la observación directa se verificó que las actividades de mantenimiento se realizan cuando el sistema lo requiere, aunque no siguen una planificación formal establecida.
Promedio 'Mantenimiento'				2,00	Malo		
3	Registros	Inspecciones	1			Entrevista al responsable y verificación de la existencia de registros.	La entrevista (Anexo 1) al responsable y la revisión documental permitieron constatar que no existen registros de las inspecciones realizadas al tanque sedimentador.
		Mantenimiento	1			Entrevista al responsable y verificación de la existencia de registros.	Durante la revisión documental y la entrevista (Anexo 1) al responsable se verificó que las actividades de mantenimiento ejecutadas no son registradas mediante bitácoras, informes u otros documentos de respaldo.
Promedio 'Registros'				1,00	Muy malo		
4	Capacitación	Capacitación del personal en operación.	2			Entrevista al responsable.	Mediante la entrevista (Anexo 1) realizada al operador se verificó que ha recibido capacitación para la operación y mantenimiento del tanque sedimentador, permitiéndole desarrollar las actividades rutinarias del sistema.
		Gestión del riesgo	1			Entrevista al responsable.	La entrevista (Anexo 1) al operador permitió constatar que no ha recibido capacitación específica sobre procedimientos de actuación ante una posible erupción del volcán Cotopaxi.
Promedio 'Capacitación'				1,50	Muy malo		
5	Recursos disponibles	Herramientas	1			Observación directa e inspección visual.	Mediante la inspección visual se verificó que el sistema dispone de herramientas suficientes para realizar actividades de mantenimiento y atender una emergencia que afecte al tanque sedimentador.
		Materiales	3			Observación directa e inspección visual.	Durante la inspección visual se constató que se dispone de materiales básicos para efectuar reparaciones menores o ejecutar acciones de respuesta ante una emergencia.
Promedio 'Recursos disponibles'				2,00	Malo		
6	Comunicación	Reporte de fallas	2			Entrevista al responsable del sistema.	Mediante la entrevista (Anexo 1) al responsable se verificó que no existe un mecanismo formal para reportar oportunamente fallas o anomalías detectadas en el tanque sedimentador.
Promedio 'Comunicación'				2,00	Malo		

7	Emergencias	Procedimientos de emergencia	1			Entrevista al responsable del sistema.	La entrevista (Anexo 1) realizada al responsable permitió verificar que no existen procedimientos establecidos para proteger y mantener operativo el tanque sedimentador ante una posible erupción del volcán Cotopaxi.
Promedio 'Emergencias'				1,00	Muy malo		
8	Control	Seguimiento y evaluación	3			Entrevista al responsable y observación directa.	Mediante la entrevista(Anexo 1) al responsable y la observación directa se verificó que se realizan evaluaciones periódicas del funcionamiento del tanque sedimentador, identificando necesidades de mantenimiento y acciones correctivas durante la operación normal.
Promedio 'Control'				3,00	Regular		

Ponderación de los indicadores mediante el método AHP

Indicador	IC	Peso AHP (wi)	IC × wi
Organización operativa	5,00	0,19	0,93
Mantenimiento	2,00	0,22	0,45
Registros	1,00	0,07	0,07
Capacitación	1,50	0,11	0,16
Recursos disponibles	2,00	0,04	0,08
Comunicación	2,0	0,08	0,17
Emergencias	1,00	0,23	0,23
Control	3,00	0,06	0,17
Índice de condición ponderado (IC)		1,00	2,26

Resultado final

Vulnerabilidad funcional	IC ponderado	V = 6 – IC	Estado (IC)	Nivel de vulnerabilidad
	2,26	3,74	Malo	Alta

1. Organización operativa					
Elemento	5	4	3	2	1
Responsable del tanque	Existe un responsable claramente designado con funciones definidas.	Existe un responsable con funciones parcialmente definidas.	La responsabilidad es compartida o poco clara.	Existe un responsable ocasional o sin funciones definidas.	No existe responsable del tanque sedimentador.
Supervisión	La supervisión es periódica, documentada y efectiva.	La supervisión es frecuente, aunque con documentación limitada.	La supervisión es ocasional.	La supervisión es poco frecuente.	No existe supervisión del funcionamiento del tanque.
2. Mantenimiento					
Elemento	5	4	3	2	1

Programa de mantenimiento	Existe un programa formal, actualizado y se cumple periódicamente.	Existe un programa con pequeños incumplimientos.	Existe un programa, pero se ejecuta de forma irregular.	El programa está desactualizado o casi no se aplica.	No existe un programa de mantenimiento.
Ejecución	El mantenimiento se ejecuta oportunamente y conforme a la planificación.	Se ejecuta con ligeras demoras.	Se realiza únicamente cuando aparecen problemas.	Se realiza de forma esporádica.	No se ejecuta mantenimiento.

3. Registros					
Elemento	5	4	3	2	1
Inspecciones	Existen registros completos, actualizados y organizados de las inspecciones.	Los registros presentan información parcialmente actualizada.	Los registros son incompletos.	Existen pocos registros y están desactualizados.	No existen registros de inspección.
Mantenimiento	Se registran todas las actividades de mantenimiento realizadas.	Se registra la mayor parte de las actividades.	Solo se registran algunas intervenciones.	Los registros son escasos e incompletos.	No existen registros de mantenimiento.

4. Capacitación					
Elemento	5	4	3	2	1
Capacitación del personal en operación	El personal recibe capacitación periódica y documentada sobre operación del tanque.	La capacitación es ocasional.	La capacitación es limitada y poco frecuente.	El personal recibió capacitación hace mucho tiempo o de forma insuficiente.	El personal no ha recibido capacitación en operación.
Gestión del riesgo	El personal recibe capacitación periódica en gestión del riesgo y respuesta ante emergencias.	La capacitación es ocasional.	La capacitación es limitada.	La capacitación es insuficiente.	No existe capacitación en gestión del riesgo.

5. Recursos disponibles					
Elemento	5	4	3	2	1
Herramientas	Se dispone de todas las herramientas necesarias para la operación y mantenimiento.	Existen pequeñas limitaciones de herramientas.	Las herramientas disponibles cubren únicamente las necesidades básicas.	Las herramientas son insuficientes.	No existen herramientas disponibles.
Materiales	Existe disponibilidad permanente de materiales para mantenimiento y reparación.	Los materiales presentan pequeñas limitaciones.	Los materiales son suficientes solo para actividades básicas.	La disponibilidad de materiales es insuficiente.	No existen materiales disponibles.

6. Comunicación					
Elemento	5	4	3	2	1
Reporte de fallas	Las fallas se reportan de forma inmediata y documentada.	Los reportes presentan pequeñas demoras.	Los reportes se realizan de manera ocasional.	Los reportes son poco frecuentes o tardíos.	No existe un procedimiento para reportar fallas.

7. Emergencias					
Elemento	5	4	3	2	1
Procedimientos de emergencia	Existen procedimientos documentados, difundidos y aplicados para atender emergencias.	Existen procedimientos con pequeñas deficiencias.	Los procedimientos son incompletos o desactualizados.	Los procedimientos son insuficientes y poco conocidos.	No existen procedimientos de emergencia.

8. Control					
Elemento	5	4	3	2	1
Seguimiento y evaluación	Se realiza seguimiento y evaluación periódica del funcionamiento, documentando e implementando acciones de mejora.	El seguimiento es frecuente con pequeñas deficiencias en la documentación.	El seguimiento se realiza de forma ocasional.	El seguimiento es poco frecuente y limitado.	No se realiza seguimiento ni evaluación del funcionamiento.

ANEXO 16: Resultado del cálculo AHP integral de la vulnerabilidad del sistema de captación

RESULTADO AHP INTEGRAL DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN

Los pesos AHP de las 4 dimensiones de vulnerabilidad y los pesos locales de todos los indicadores, tanto de la Obra de Captación como del Tanque Sedimentador, y luego combina ambos componentes en el resultado del sistema completo.

RESULTADO AHP INTEGRAL — OBRA DE CAPTACIÓN

El cálculo integra los pesos AHP de las cuatro dimensiones y los pesos locales de todos los indicadores. Los pesos globales suman 1,00.

Dimensión	IC ponderado local	Peso de dimensión	Aporte al IC global	Nivel local
Física	4,12	0,42	1,73	Bueno
Funcional	4,19	0,37	1,54	Bueno
Ambiental	2,47	0,11	0,26	Malo
Administrativa	2,40	0,11	0,25	Malo
TOTAL / IC GLOBAL		1,00	3,79	

Resultado final — Obra De Captación	
IC global ponderado	3,79
Vulnerabilidad V = 6 – IC	2,21
Estado del IC	Bueno
Nivel de vulnerabilidad	Baja

Ponderación global de todos los indicadores — Obra De Captación							
Dimensión	Indicador	IC	Peso local	Peso dimensión	Peso global	Aporte al IC	Vulnerabilidad aportada
Física	Muros de ala	4,80	0,29	0,42	0,12	0,59	0,15
Física	Caja de recolección	3,50	0,46	0,42	0,19	0,67	0,48
Física	Tubería de conducción (aducción)	N/V	0,15	0,42	0,06	N/V	N/V
Física	Canal (acequia)	4,67	0,10	0,42	0,04	0,20	0,06
Funcional	Muros de ala	5,00	0,38	0,37	0,14	0,70	0,14
Funcional	Caja de recolección	5,00	0,21	0,37	0,08	0,39	0,08
Funcional	Tubería de conducción	N/V	0,19	0,37	0,07	N/V	N/V
Funcional	Operación	1,00	0,12	0,37	0,04	0,04	0,21
Funcional	Mantenimiento	4,00	0,10	0,37	0,04	0,15	0,08

Ambiental	Entorno de la captación	4,00	0,15	0,11	0,02	0,06	0,03
Ambiental	Fuente de abastecimiento (acequia)	3,50	0,41	0,11	0,04	0,15	0,11
Ambiental	Protección ambiental	1,00	0,35	0,11	0,04	0,04	0,19
Ambiental	Conservación del entorno	1,00	0,09	0,11	0,01	0,01	0,05
Administrativa	Gestión de la operación	4,50	0,24	0,11	0,03	0,11	0,04
Administrativa	Mantenimiento	2,00	0,16	0,11	0,02	0,03	0,07
Administrativa	Registros técnicos	1,00	0,06	0,11	0,01	0,01	0,03
Administrativa	Preparación ante emergencias	1,00	0,26	0,11	0,03	0,03	0,14
Administrativa	Capacitación	1,00	0,11	0,11	0,01	0,01	0,06
Administrativa	Comunicación	3,50	0,08	0,11	0,01	0,03	0,02
Administrativa	Recursos	3,00	0,05	0,11	0,01	0,02	0,02
Administrativa	Control administrativo	4,00	0,03	0,11	0,00	0,01	0,01
TOTAL		—	—	—	1,00	3,26	1,95

RESULTADO AHP INTEGRAL — TANQUE SEDIMENTADOR

El cálculo integra los pesos AHP de las cuatro dimensiones y los pesos locales de todos los indicadores. Los pesos globales suman 1,00.

Dimensión	IC ponderado local	Peso de dimensión	Aporte al IC global	Nivel local
Física	3,62	0,35	1,27	Bueno
Funcional	4,44	0,39	1,73	Muy bueno
Ambiental	2,04	0,09	0,19	Malo
Administrativa	2,26	0,16	0,37	Malo
TOTAL / IC GLOBAL		1,00	3,57	

Resultado final — Tanque Sedimentador	
IC global ponderado	3,57
Vulnerabilidad V = 6 – IC	2,43
Estado del IC	Bueno
Nivel de vulnerabilidad	Baja

Ponderación global de todos los indicadores — Tanque Sedimentador

Dimensión	Indicador	IC	Peso local	Peso dimensión	Peso global	Aporte al IC	Vulnerabilidad aportada
Física	Muros estructurales	4,33	0,29	0,35	0,10	0,44	0,17
Física	Fondo del tanque	4,50	0,11	0,35	0,04	0,18	0,06
Física	Sistema de ingreso	5,00	0,05	0,35	0,02	0,08	0,02
Física	Compuertas de control	3,00	0,08	0,35	0,03	0,08	0,08
Física	Sistema de salida	5,00	0,05	0,35	0,02	0,08	0,02
Física	Protección del tanque	1,00	0,21	0,35	0,07	0,07	0,36

Física	Estado de conservación	4,00	0,06	0,35	0,02	0,09	0,04
Física	Condición general de la infraestructura	4,50	0,15	0,35	0,05	0,24	0,08
Funcional	Ingreso del agua	4,33	0,37	0,39	0,15	0,63	0,24
Funcional	Proceso de sedimentación	4,00	0,20	0,39	0,08	0,31	0,15
Funcional	Control hidráulico	5,00	0,12	0,39	0,05	0,24	0,05
Funcional	Salida del agua	5,00	0,19	0,39	0,07	0,37	0,07
Funcional	Limpieza del tanque	4,00	0,06	0,39	0,02	0,09	0,05
Funcional	Operatividad del sistema	4,00	0,06	0,39	0,02	0,09	0,05
Ambiental	Entorno	4,50	0,08	0,09	0,01	0,04	0,01
Ambiental	Protección ambiental	1,00	0,41	0,09	0,04	0,04	0,19
Ambiental	Calidad ambiental	3,00	0,25	0,09	0,02	0,07	0,07
Ambiental	Estado del entorno	1,00	0,09	0,09	0,01	0,01	0,04
Ambiental	Condiciones sanitarias del entorno	2,50	0,17	0,09	0,02	0,04	0,06
Administrativa	Organización operativa	5,00	0,19	0,16	0,03	0,15	0,03
Administrativa	Mantenimiento	2,00	0,22	0,16	0,04	0,07	0,15
Administrativa	Registros	1,00	0,07	0,16	0,01	0,01	0,06
Administrativa	Capacitación	1,50	0,11	0,16	0,02	0,03	0,08
Administrativa	Recursos disponibles	2,00	0,04	0,16	0,01	0,01	0,03
Administrativa	Comunicación	2,00	0,08	0,16	0,01	0,03	0,05
Administrativa	Emergencias	1,00	0,23	0,16	0,04	0,04	0,19
Administrativa	Control	3,00	0,06	0,16	0,01	0,03	0,03
TOTAL		—	—	—	1,00	3,57	2,44

RESULTADO AHP INTEGRAL — SISTEMA DE CAPTACIÓN COMPLETO (Obra de captación + Tanque sedimentador)

Componente	IC global del componente	Peso del componente	Aporte al IC del sistema	Nivel del componente
Obra de captación	3,79	50%	1,89	Bueno
Tanque sedimentador	3,57	50%	1,78	Bueno
Suma de pesos (control, debe ser 100%)		100%		

Resultado final — Sistema de Captación	
IC global del sistema	3,68
Vulnerabilidad V = 6 – IC	2,32
Estado del IC	Bueno

Nivel de vulnerabilidad global	Baja
--------------------------------	------

NIVEL DE VULNERABILIDAD GLOBAL DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN

Baja

Tabla 48: Análisis de sensibilidad del Índice de Condición global del sistema de captación ante variaciones en la ponderación entre componentes

Escenario	Peso del componente	IC obra de captación	Peso del componente	IC tanque sedimentador	IC global	Estado del IC	Vulnerabilidad $V = 6 - IC$	Nivel de vulnerabilidad
Base (50/50, pesos AHP originales)	50%	3,79	50%	3,57	3,68	Bueno	2,32	Baja
Ponderación 40/60 (captación/tanque)	40%	3,79	60%	3,57	3,66	Bueno	2,34	Baja
Ponderación 60/40 (captación/tanque)	60%	3,79	40%	3,57	3,70	Bueno	2,30	Baja

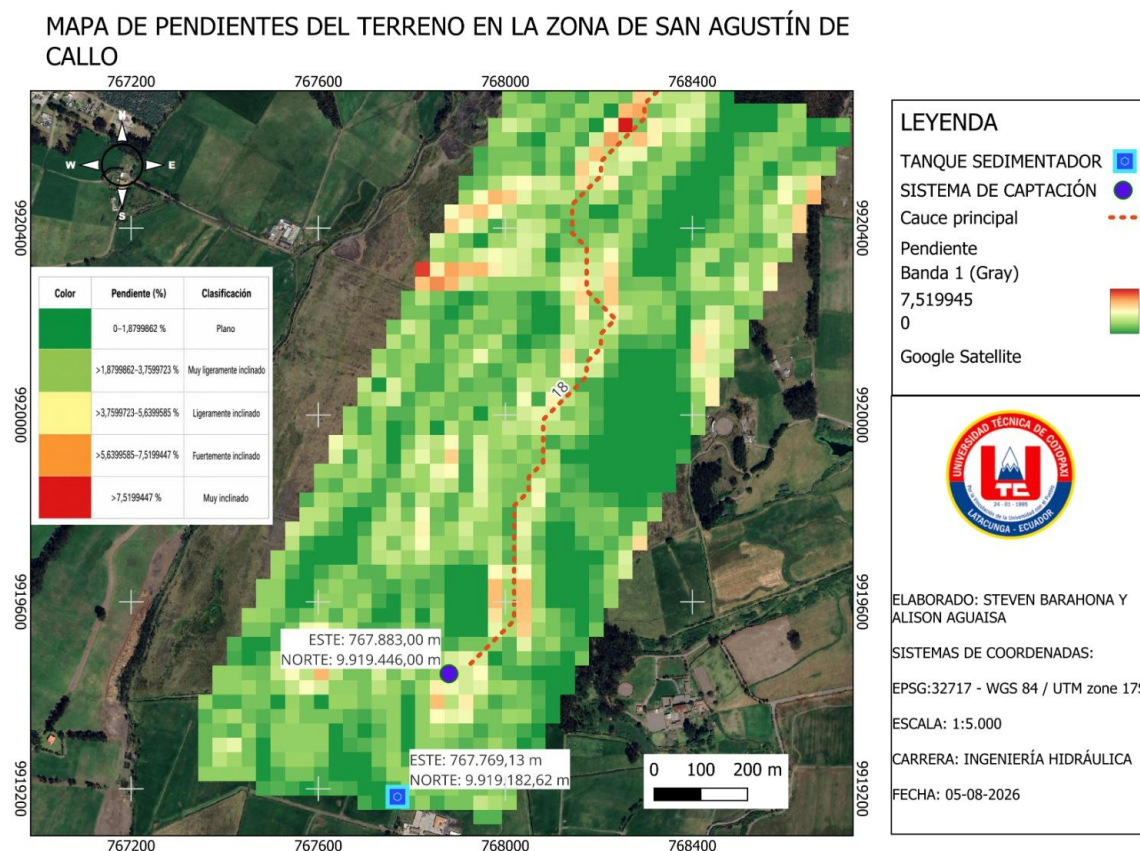
Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

Tabla 49: Análisis de sensibilidad del IC global y nivel de vulnerabilidad del sistema de captación

Escenario	Variación	Peso captación	IC captación	Peso tanque	IC tanque	IC global	Estado del IC	Vulnerabilidad $V = 6 - IC$	Nivel de vulnerabilidad
Base	0%	50%	3,79	50%	3,57	3,68	Bueno	2,32	Baja
Sensibilidad -10 %	-10 %	45%	3,79	55%	3,57	3,67	Bueno	2,33	Baja
Sensibilidad -5 %	-5 %	47,50%	3,79	52,50%	3,57	3,67	Bueno	2,33	Baja
Sensibilidad +5 %	5%	52,50%	3,79	47,50%	3,57	3,69	Bueno	2,31	Baja
Sensibilidad +10 %	10%	55%	3,79	45%	3,57	3,69	Bueno	2,31	Baja

Elaborado por: Alison Aguaisa y Steven Barahona

ANEXO 17: Mapa de pendientes del terreno en el área de influencia del sistema de captación de San Agustín de Callo



ANEXO 18: Fotografías de verificación de la matriz vulnerabilidad física de la obra de captación

Fotografía 1: Presenta desprendimiento del material



Fotografía 2: Los muros mantienen su verticalidad y alineamiento original y alineamiento original



Fotografía 3: Sin presencia de fisuras hay un leve desgaste del material en la caja de recolección



Fotografía 4: No hay pérdidas del caudal y hay una leve infiltración en las paredes en la caja de recolección



Fotografía 5: Maleza y zona de desgaste y erosión leve en el canal (acequia)



ANEXO 19:Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Funcional de la obra de captación

Fotografía 6: Se observa el caudal que ingresa sin obstrucciones a la obra de captación.



Fotografía 7: El caudal mantiene continuidad en condiciones normales



Fotografía 8: La caja de recolección no presenta pérdidas del caudal



Fotografía 9: Tubería enterrada en esta sección de la caja de recolección

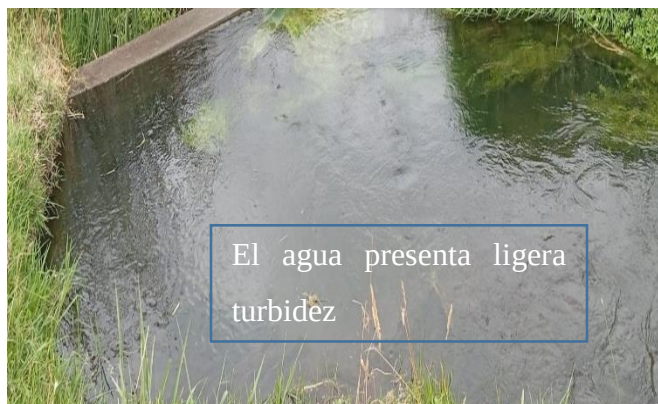


ANEXO 20: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Ambiental de la obra de captación

Fotografía 10: Presencia de cobertura vegetal abundante alrededor de la obra de captación, que favorece la protección del suelo.



Fotografía 11: Muros de ala tapados por vegetación y no existe ninguna obra de drenaje



Fotografía 12: Vegetación abundante, no dispone de una área de protección



Fotografía 13: Presencia de actividades ganadería y pastoreo

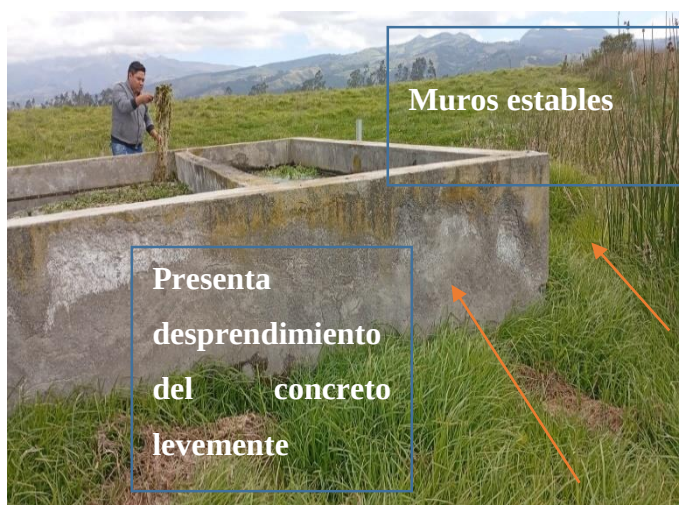


ANEXO 21: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Física del tanque sedimentador

Fotografía 14: No se presenta fisuras tampoco grietas



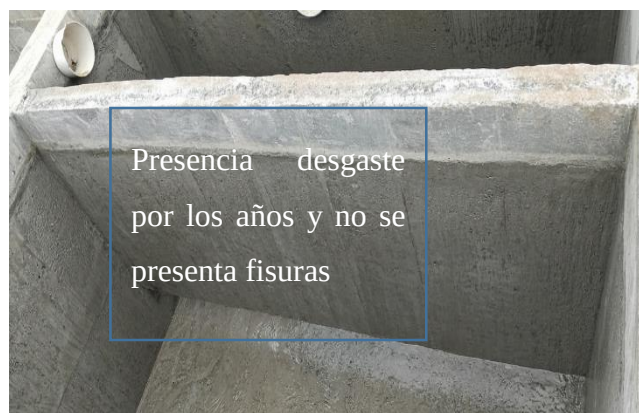
Fotografía 15: Muros estables, presenta desprendimiento del concreto



Fotografía 16: Presencia de humedad en el tanque



Fotografía 17: Presencia desgaste por los años y no se presenta fisuras



Fotografía 18: Tubería en buen estado



Fotografía 19: Abre y cierra con dificultad



Fotografía 20:Corrosión por humedad en las compuertas



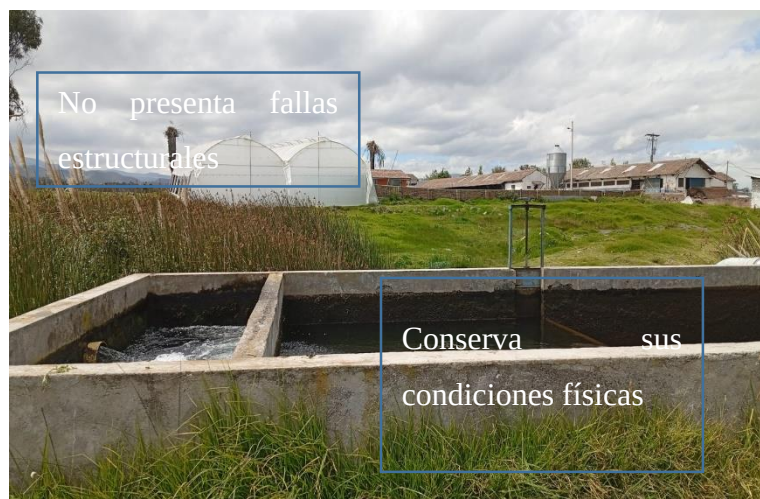
Fotografía 21:Tubería en buen estado, pero con sedimentos



Fotografía 22:No dispone de cubierta, no cuenta con cerramiento

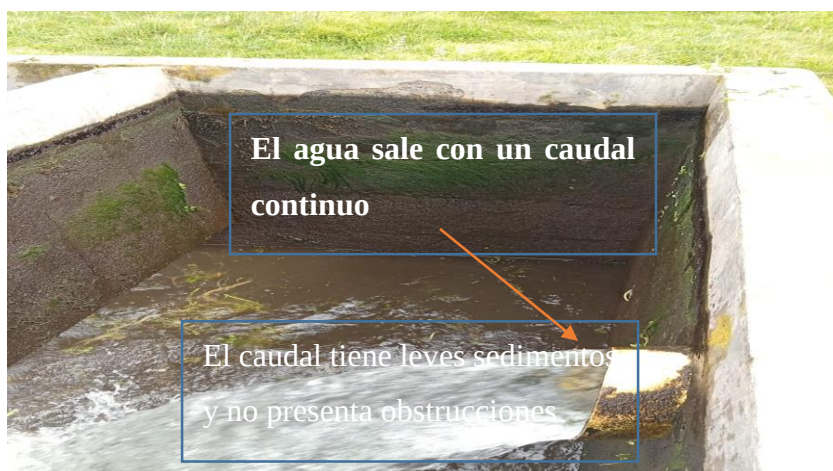


Fotografía 23:No presenta fallas estructurales en el tanque sedimentador



ANEXO 22: Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Funcional u Operativa del tanque sedimentador

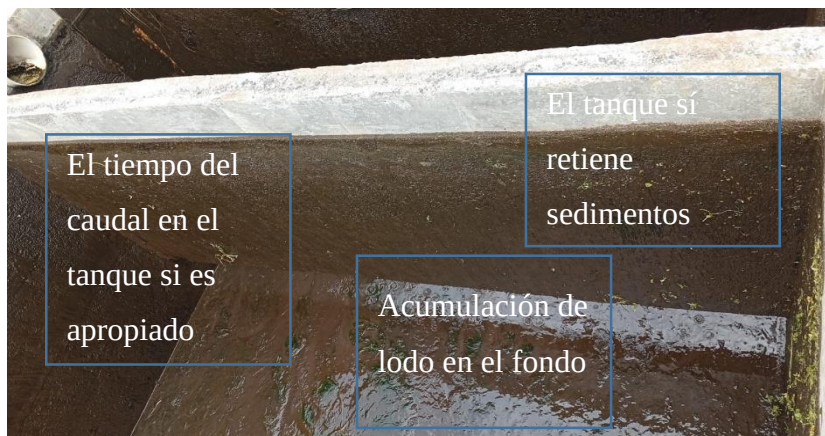
Fotografía 24: El caudal tiene leves sedimentos y no presenta obstrucciones



Fotografía 25: El caudal puede regularse adecuadamente



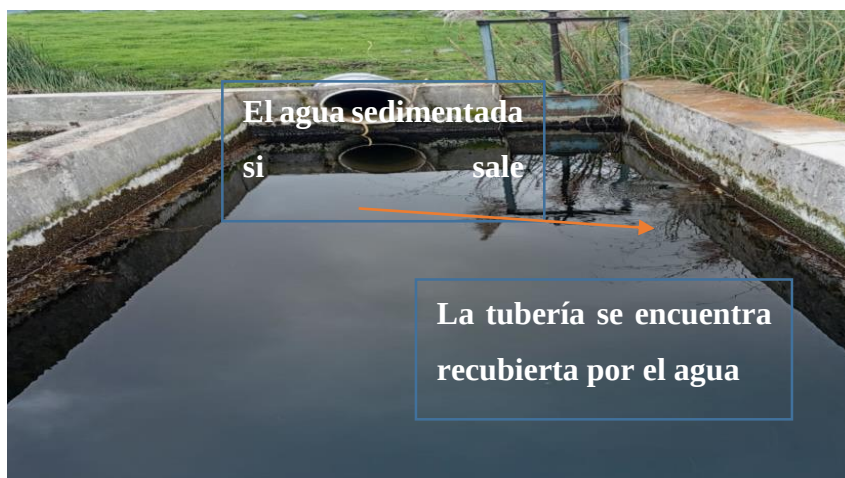
Fotografía 26: El tanque sí retiene sedimentos



Fotografía 27: El nivel de agua puede manejarse correctamente



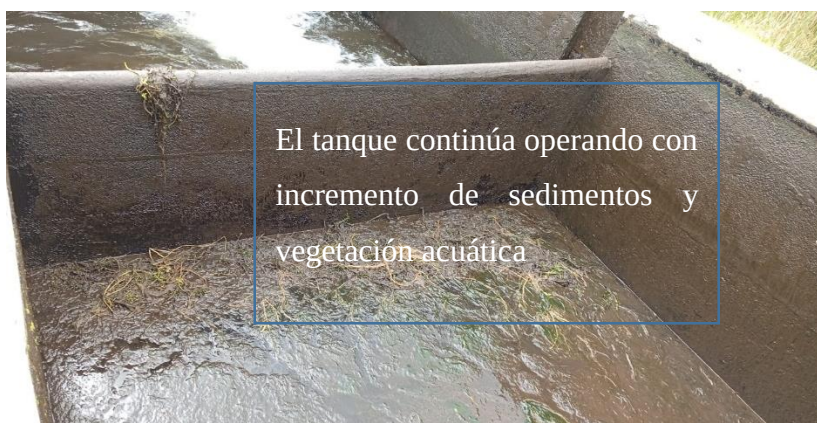
Fotografía 28: El agua sedimentada si sale correctamente



Fotografía 29:El tanque mantiene su funcionamiento



Fotografía 30:El tanque continúa operando con incremento de sedimentos y vegetación acuática



ANEXO 23:Fotografías de verificación de la matriz Vulnerabilidad Ambiental

Fotografía 31:Vegetación abundante alrededor del tanque sedimentador



Fotografía 32:El terreno no presenta procesos erosivos



Fotografía 33: Actividad agrícola y ganadera



Fotografía 34: Exceso de vegetación en el tanque sedimentador

