

Maestría en

MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y RESPONSABILIDAD SOCIAL ORGANIZACIONAL

Trabajo de investigación previo a la obtención del título de Magíster en Desarrollo Sostenible y Responsabilidad Social Organizacional

AUTORES:

Ana Karen Acosta Larreta
Alex Leonardo Ayala Bravo
Rayza Alexandra Macias Ruiz
Mariana del Rocío Ramírez Méndez
Emily Domenica Valle Ullaui
Grace del Cisne Vera Romero

TUTORES:

Marcelo Fabián Cabrera Jara
Beatriz Zambruno Fernández
Cecilia del Carmen Puertas Donoso

Evaluación del desempeño sostenible de la Planta de Tratamiento de Relaves de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.

Quito, junio 2026

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Ana Karen Acosta Larreta, Alex Leonardo Ayala Bravo, Rayza Alexandra Macias Ruiz, Mariana del Rocío Ramírez Méndez, Emily Domenica Valle Ullauri y Grace del Cisne Vera Romero**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ANA KAREN ACOSTA LARRETA

Firma del graduando

Ana Karen Acosta Larreta



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ALEX LEONARDO AYALA BRAVO

Firma del graduando

Alex Leonardo Ayala Bravo



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
RAYZA ALEXANDRA MACIAS RUIZ

Firma del graduando

Rayza Alexandra Macias Ruiz



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARIANA DEL ROCIO RAMIREZ MENDEZ

Firma del graduando

Mariana del Rocío Ramírez Méndez



Emily Domenica Valle Ullauri
Time Stamping
Security Data

Firma del graduando

Emily Domenica Valle Ullauri



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
GRACE DEL CISNE VERA ROMERO

Firma del graduando

Grace del Cisne Vera Romero

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

AUTORIZACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Nosotros, **Ana Karen Acosta Larreta, Alex Leonardo Ayala Bravo, Rayza Alexandra Macias Ruiz, Mariana del Rocío Ramírez Méndez, Emily Domenica Valle Ullauri y Grace del Cisne Vera Romero**, en calidad de autores del trabajo de investigación titulado *Evaluación del desempeño sostenible de la planta de tratamiento de relaves de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.*, autorizamos a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) para hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autores nos corresponden, lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento en Ecuador.

D. M. Quito, junio de 2026



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ANA KAREN ACOSTA LARRETA

Firma del graduando

Ana Karen Acosta Larreta



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ALEX LEONARDO AYALA BRAVO

Firma del graduando

Alex Leonardo Ayala Bravo



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
RAYZA ALEXANDRA MACIAS RUIZ

Firma del graduando

Rayza Alexandra Macias Ruiz



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARIANA DEL ROCIO RAMIREZ MENDEZ

Firma del graduando

Mariana del Rocío Ramírez Méndez



Emily Domenica Valle Ullauri
Time Stamping
Security Data

Firma del graduando

Emily Domenica Valle Ullauri



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
GRACE DEL CISNE VERA ROMERO

Firma del graduando

Grace del Cisne Vera Romero

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

APROBACIÓN DE DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN DEL PROGRAMA

Nosotros, **Alberto Martínez Villar** y **Cecilia Puertas Donoso**, declaramos que los graduandos: **Ana Karen Acosta Larreta, Alex Leonardo Ayala Bravo, Rayza Alexandra Macias Ruiz, Mariana del Rocío Ramírez Méndez, Emily Domenica Valle Ullauri y Grace del Cisne Vera Romero**, son los autores exclusivos de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal de ellos.



Alberto Martínez Villar

Director de la

Maestría en Desarrollo Sostenible y
Responsabilidad Social Organizacional



Cecilia Puertas Donoso

Coordinadora de la

Maestría en Desarrollo Sostenible y
Responsabilidad Social Organizacional

DEDICATORIA

Dedicamos esto a nuestros padres, familiares, amigos y aquellas personas que nos acompañaron en silencio, un abrazo, un consejo y fuerzas para seguir adelante.

A nuestros docentes, por su guía constante y la confianza depositada en nuestro desarrollo académico.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirnos para culminar esta etapa, a nuestra familia, que celebraron cada pequeño avance; este título les pertenece.

A los docentes de la Universidad Internacional del Ecuador, por su compromiso con la excelencia académica, compartieron sus conocimientos con precisión y disciplina, y por orientarnos con excelencia en cada capítulo del proceso de este posgrado.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el desempeño sostenible de la Planta de Tratamiento de Relaves (PTR) de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (AIC), ubicada en la comuna El Corazón, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura. El estudio corresponde a un proyecto aplicado, descriptivo y propositivo, orientado a analizar la contribución de la PTR a la gestión responsable de relaves mineros y a la sostenibilidad organizacional. Para ello, se consideran herramientas de planificación estratégica, una propuesta de Sistema Integrado de Gestión (SIG), indicadores ESG y análisis de ciclo de vida (ACV). La investigación identifica aspectos ambientales, sociales y económicos asociados al proceso de tratamiento de relaves, destacando la recuperación y recirculación de agua, el aprovechamiento de recursos y el fortalecimiento del cumplimiento ambiental. Asimismo, se reconocen oportunidades de mejora relacionadas con la gestión ambiental, el seguimiento de indicadores y la mejora continua. Finalmente, se concluye que la PTR constituye un componente estratégico para fortalecer la sostenibilidad, competitividad y gestión responsable de la actividad minera en Ecuador.

Palabras claves planta de tratamiento de relaves; desempeño sostenible; análisis de ciclo de vida; gestión ambiental; recuperación de agua.

ABSTRACT

This study evaluates the sustainable performance of the Tailings Treatment Plant (TTP) of Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (AIC), located in the El Corazón community, Cotacachi canton, Imbabura province. The study corresponds to an applied, descriptive, and propositional project aimed at analyzing the contribution of the TTP to responsible mine tailings management and organizational sustainability. For this purpose, strategic planning tools, a proposed Integrated Management System (IMS), ESG indicators, and Life Cycle Assessment (LCA) are considered. The research identifies the environmental, social, and economic aspects associated with the tailings treatment process, highlighting water recovery and recirculation, resource use optimization, and the strengthening of environmental compliance. Likewise, improvement opportunities related to environmental management, indicator monitoring, and continuous improvement are recognized. Finally, it is concluded that the TTP constitutes a strategic component for strengthening sustainability, competitiveness, and responsible mining management in Ecuador.

Keywords: Tailings Treatment Plant; sustainable performance; Life Cycle Assessment; environmental management; water recovery.

TABLA DE CONTENIDOS (Índice)

DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
TABLA DE CONTENIDOS (Índice).....	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Generalidades	17
1.2. Planteamiento del problema	18
1.2.1. Definición del proyecto	18
1.2.2. Naturaleza o tipo de proyecto.....	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general	19
1.3.2. Objetivos específicos.....	19
1.4. Justificación e importancia del trabajo de investigación	20
1.5. Perfil de la organización	22
1.5.1. Nombre de la empresa.....	22
1.5.2. Misión, visión, valores	22
1.5.3. Actividades, marcas, productos y servicios.....	23
1.5.4. Ubicación.....	23
1.5.5. Tamaño de la organización e información sobre empleados y otros trabajadores	

1.5.6.	Procesos claves relacionados con el objetivo propuesto.....	24
1.5.7.	Principales cifras, ratios y números que definen a la empresa	25
1.5.8.	Modelo de negocio	25
1.5.9.	Grupos de interés internos y externos.....	25
CAPÍTULO 2: ELABORACIÓN Y GESTIÓN DE PROYECTOS SOSTENIBLES.....		26
2.1.	Análisis externo para la propuesta de solución	26
2.1.1.	Análisis PESTEL	26
2.1.2.	Estudio de benchmarking (análisis de la competencia).....	28
2.1.3.	Estudio de proveedores y stakeholders	29
2.2.	Modelo de negocio	30
2.2.1.	Business Model Canvas.....	30
2.2.2.	Go to Market con enfoque sostenible	31
CAPÍTULO 3: SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN		33
3.1.	Análisis del contexto de la organización	33
3.1.1.	Cinco fuerzas de Porter	33
3.1.2.	Análisis de la cadena de valor	34
3.1.3.	Análisis FODA	35
3.2.	Sistema de Gestión de Calidad	36
3.2.1.	Alcance geográfico del SGC	36
3.2.2.	Alcance operativo del SGC	36
3.2.3.	Productos y servicios incluidos	36
3.2.4.	Aplicabilidad de la norma ISO 9001:2015	37

3.2.5.	Declaración del alcance	37
3.3.	Sistema de Gestión Ambiental	37
3.3.1.	Datos generales del plan	37
3.3.2.	Identificación de aspectos e impactos ambientales	38
3.3.3.	Requisitos legales aplicables	38
3.3.4.	Objetivos y metas ambientales	39
3.3.5.	Plan de acción para la implementación.....	40
3.3.6.	Sistema de seguimiento y evaluación.....	40
3.4.	Sistema Integrado de Gestión.....	41
3.4.1.	Datos generales del plan	41
3.4.2.	Apoyo y compromiso de la alta dirección	41
3.4.3.	Alcance y componentes del SIG.....	42
3.4.4.	Análisis de brechas del SIG	43
3.2.6.	Plan de acción para la implementación.....	43
3.2.7.	Sistema de seguimiento y evaluación.....	44
CAPÍTULO 4: DISEÑO PARA LA SOSTENIBILIDAD Y SU CONTEXTO GLOBAL		45
4.1.	Análisis ESG.....	45
4.1.1.	Gobernanza.....	45
4.1.2.	Social	45
4.1.3.	Ambiental	46
4.1.4.	Económico.....	47
4.2.	Indicadores	47

4.2.1.	Indicadores legales	47
4.2.2.	Indicadores sociales.....	47
4.2.3.	Indicadores económicos	48
4.2.4.	Indicadores ambientales	48
4.3.	Análisis de impactos ambientales	48
4.3.1.	Impactos reales	49
4.3.2.	Impactos potenciales	49
4.3.3.	Análisis comparativo con el Plan de Manejo Ambiental.....	50
4.4.	Análisis del ciclo de vida.....	50
4.4.1.	Definición del objetivo y alcance	51
4.4.2.	Análisis del inventario	51
4.4.3.	Evaluación de impactos.....	53
4.4.4.	Interpretación de resultados	56
4.4.5.	Beneficios del ACV para la gestión organizacional	57
4.4.6.	Análisis de mejoras que se pueden implementar.....	58
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y APLICACIONES		59
5.1.	Conclusiones generales	59
5.2.	Conclusiones específicas.....	60
5.2.1.	Análisis del cumplimiento de los objetivos de la investigación	60
5.2.2.	Contribución a la gestión empresarial	60
5.2.3.	Contribución a nivel académico	61
5.2.4.	Contribución a nivel personal.....	61

5.2.5. Limitaciones a la investigación	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	70

LISTA DE TABLAS (Índice de tablas)

Tabla 1 Estudio de Benchmarking	29
Tabla 2 Estrategia Go to Market con enfoque sostenible	31
Tabla 3 Análisis de las cinco fuerzas de Porter	33
Tabla 4 Cadena de valor del proceso de tratamiento de relaves	34
Tabla 5 Identificación de aspectos e impactos ambientales.....	38
Tabla 6 Objetivos y metas ambientales.....	39
Tabla 7 Plan de acción para la implementación del SGA.....	40
Tabla 8 Alcances y componentes del Sistema Integrado de Gestión	42
Tabla 9 Plan acción para el cierre de brechas.....	43
Tabla 10 Principales entradas de la Planta de Tratamiento de Relaves	52
Tabla 11 Principales salidas de la Planta de Tratamiento de Relaves	53
Tabla 12 Categorías de impacto ambiental.....	53

LISTA DE FIGURAS (Índice de figuras)

Figura 1 Esquematización del análisis PESTEL	26
--	----

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

La sostenibilidad se ha consolidado como un enfoque estratégico que integra criterios ambientales, sociales y de gobernanza en la toma de decisiones empresariales (Tessema et al., 2024). En Ecuador, aunque la sostenibilidad avanza mediante iniciativas de responsabilidad social empresarial y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, aún persisten limitaciones de cumplimiento ambiental, barreras financieras y organizacionales (Escobar et al., 2025; Ormaza Andrade et al., 2020). En el sector minero del país, estos desafíos se reflejan en conflictos socioambientales y debilidad institucional para el control y fiscalización de la actividad (Andrade Manzano et al., 2025).

Los residuos generados por la actividad minera durante el beneficio del mineral son denominados relaves mineros, los cuales se caracterizan por contener partículas finas, agua y sustancias químicas asociadas a la composición del material procesado o a las utilizadas en la recuperación del mineral, como cianuro (Bamigboye et al., 2021; Cacciuttolo Vargas & Pérez Campomanes, 2022). Además, los relaves aún contienen metales valiosos como oro y plata, lo que supone un desperdicio de recursos (Lin et al., 2023).

Para el almacenamiento de relaves se requieren estructuras especiales y grandes superficies, que demandan mantenimiento riguroso y costoso (Li et al., 2024). La gestión inadecuada de estos residuos puede afectar los recursos hídricos y la seguridad de la vida humana, así como favorecer la erosión del suelo (Garcés et al., 2025). Por lo que, el desarrollo de estrategias efectivas de gestión y aprovechamiento de relaves es crucial para lograr prácticas mineras sostenibles y reducir el desperdicio de recursos (Liu et al., 2025).

En la actualidad, se buscan nuevas alternativas para el manejo de relaves que vayan más allá del confinamiento y abandono (Jácome Calderón et al., 2022). Alrededor del mundo, la tecnología de filtración de relaves ha sido aplicada en distintos proyectos mineros, contribuyendo a incrementar la recuperación de agua, disminuir el área de impacto en el almacenamiento, aumentar su estabilidad física de los depósitos y mejorar la precepción de las partes interesadas (Cacciuttolo Vargas & Pérez Campomanes, 2022).

En este contexto, la Planta de Tratamiento de Relaves (PTR) de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (AIC) constituye un elemento relevante para analizar la gestión sostenible de los residuos mineros, debido a su relación con la recuperación de agua, aprovechamiento de recursos y reducción de impactos ambientales. Por tanto, la evaluación de su desempeño sostenible permite valorar su contribución ambiental, operativa y organizacional, así como identificar oportunidades de mejora.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Definición del proyecto

El presente proyecto de titulación se define como una evaluación del desempeño sostenible de la PTR de AIC, orientada a analizar su contribución a la gestión responsable de los residuos mineros y a la sostenibilidad organizacional. Para ello, se contempla el análisis del contexto organizacional y modelo de negocio que influye en la sostenibilidad de la compañía, así como la revisión de los aspectos vinculados al proceso de tratamiento de relaves. De igual manera, el proyecto incluye el diseño de una propuesta de Sistema Integrado de Gestión que articule los componentes de calidad y de gestión ambiental, con el objetivo de fortalecer la mejora continua de la PTR. Finalmente, el proyecto incorpora un análisis del

ciclo de vida, con un enfoque de puerta a puerta, con el propósito de identificar entradas y salidas del sistema, impactos ambientales y oportunidades de optimización del proceso.

1.2.2. Naturaleza o tipo de proyecto

El presente trabajo corresponde a un proyecto de titulación aplicado, de alcance descriptivo y propositivo, con enfoque mixto. Es aplicada debido a que se propone generar una propuesta práctica orientada a mejorar el desempeño sostenible de la PTR de AIC. Se considera descriptiva porque analiza el contexto organizacional, los grupos de interés, el modelo de negocio y los aspectos ambientales asociados al proceso de tratamiento. Asimismo, es propositiva porque plantea el diseño de un Sistema Integrado de Gestión que articula los componentes de calidad y gestión ambiental como base para la mejora continua. Finalmente, presenta un enfoque mixto, ya que integra información cualitativa, relacionada como el análisis del contexto y de los grupos de interés, e información cuantitativa vinculada con entradas, salidas, procesos y aspectos ambientales del ciclo de vida.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño sostenible de la planta de tratamiento de relaves de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el contexto de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. considerando factores externos, grupos de interés y modelo de negocio vinculados a su desempeño sostenible.
- Diseñar una propuesta de Sistema Integrado de Gestión para la Compañía

Agroindustrial El Corazón S.A., articulando los componentes de calidad y gestión ambiental como base para la mejora continua de su planta de tratamiento de relaves.

- Analizar el ciclo de vida del proceso de tratamiento de relaves bajo un enfoque de puerta a puerta, identificando las entradas, salidas y principales aspectos ambientales asociados a su operación.

1.4. Justificación e importancia del trabajo de investigación

Los relaves mineros son residuos generados a partir del procesamiento y separación de las fracciones valiosas de los minerales, que generalmente son una mezcla de partículas minerales finas y agua (Bamigboye et al., 2021). Se estima que entre el 97 % y el 98 % del mineral procesado se convierte en relave, lo que equivaldría a una generación aproximada de 7 a 14 millones de toneladas anuales de relaves en operaciones mineras a nivel mundial (Manaviparast et al., 2024).

Estos residuos generalmente son dispuestos en presas y lagunas de relaves, estructuras que se asocian con riesgos de falla y que podrían liberar material potencialmente tóxico; esta situación puede provocar daños ambientales, en algunos casos irreversibles, y comprometer la reputación de la empresa (Wu et al., 2023). Esta problemática adquiere mayor relevancia si se considera que, a nivel mundial, se reportan más de 25.000 depósitos de relaves y alrededor del 10 % han presentado problemas de estabilidad (Hudson-Edwards et al., 2024).

En Ecuador, la minería se ha consolidado como un sector estratégico para la economía, incrementando su participación en las exportaciones y en la generación de divisas (Banco Central del Ecuador, 2025). Sin embargo, su expansión también incrementa los desafíos de sostenibilidad, especialmente en la gestión de residuos mineros y el uso eficiente del agua.

Estudios sobre minería en el país señalan que el manejo de relaves constituye uno de los principales retos técnicos y ambientales, esto se debe a los riesgos asociados a la estabilidad de los depósitos, el impacto potencial sobre ecosistemas sensibles y la liberación de contaminantes si no se implementan medidas adecuadas de control y monitoreo (Garcés et al., 2025; Van Teijlingen, 2019). En respuesta, las políticas públicas ecuatorianas promueven la minería responsable mediante la adopción de tecnologías, sistemas de gestión ambiental y herramientas de evaluación orientadas a minimizar impactos y optimizar el desempeño ambiental (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables [MERNNR], 2020).

En este marco, la gestión sostenible de los residuos mineros plantea alternativas orientadas a reducir, tratar y valorizar estos materiales. Entre ellas se encuentran el apilamiento en seco de relaves, la biorremediación y la economía circular, mediante la reutilización de relaves, escorias y roca estéril en materiales de construcción, recuperación de metales u otros procesos productivos (Gairola et al., 2025).

La PTR de AIC se plantea como una alternativa para mejorar el manejo de los relaves generados en la planta de beneficio y de aquellos ya almacenados en sus relaveras. La empresa enfrenta la falta de espacio para construir nuevas relaveras, debido a las condiciones geomorfológicas y topográficas de la zona, lo que podría comprometer la continuidad de sus operaciones (Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. [AIC], 2022). Por ello, el tratamiento en esta planta busca recuperar oro y plata de los relaves, filtrarlos, reutilizar las relaveras existentes, recircular el agua del proceso y disponer los relaves con menor humedad, menor contenido metálico y mayor estabilidad física y química, reduciendo así riesgos de infiltración, licuefacción y eventuales fallas (AIC, 2024).

1.5. Perfil de la organización

1.5.1. Nombre de la empresa

Compañía Agroindustrial El Corazón S.A., constituida bajo la figura jurídica de sociedad anónima y cuenta con el RUC 1791397843001.

1.5.2. Misión, visión, valores

La compañía, desde el fortalecimiento de sus operaciones productivas a inicios del 2002, orienta su misión hacia el desarrollo de actividades mineras eficientes y sostenibles, enfocadas en la explotación y procesamiento responsable de minerales metálicos específicamente en oro y plata bajo criterios técnicos, ambientales y sociales. La organización busca generar valor económico mediante la optimización continua de sus procesos productivos, incorporando innovación tecnológica, asegurando el cumplimiento normativo y promoviendo prácticas alineadas con estándares internacionales de sostenibilidad.

Desde la consolidación de sus operaciones productivas a partir del año 2002, proyecta posicionarse como una organización referente dentro del sector de pequeña minería, destacándose por la implementación de soluciones innovadoras para la gestión sostenible de procesos críticos, especialmente en el manejo de relaves y la eficiencia en el uso de recursos naturales. La visión empresarial contempla la evolución hacia modelos de producción responsables, basados en sistemas de gestión integrados, mejora continua, contribuyendo al desarrollo sostenible del país y fortaleciendo la confianza de las partes interesadas mediante una operación transparente, segura y socio-ambientalmente responsable.

Entre los valores de la compañía se encuentran la responsabilidad ambiental, ética y cumplimiento normativo, mejora continua, seguridad y salud ocupacional, compromiso con la comunidad y transparencia en la gestión.

1.5.3. Actividades, marcas, productos y servicios

Las actividades principales de la empresa comprenden la explotación y beneficio de minerales metálicos, principalmente oro y plata, mediante procesos de cianuración, flotación y gestión técnica de relaves.

1.5.4. Ubicación

AIC cuenta con una dirección administrativa ubicada en Boyacá N19-68 y Av. Universitaria, Edificio Valencia, en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, Ecuador. Por su parte, la operación minera se localiza en la Comuna El Corazón, parroquia García Moreno, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura.

La compañía dispone de aproximadamente 240 hectáreas dentro de su concesión minera, ubicadas al norte de la Cordillera Occidental y en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. En esta área se desarrollan las actividades de explotación minera y operación de la planta de beneficio.

1.5.5. Tamaño de la organización e información sobre empleados y otros trabajadores

AIC cuenta con aproximadamente 180 trabajadores vinculados a actividades operativas y administrativas; se enmarca en la categoría de pequeña minería, al poseer una capacidad de 300 ton/día en minería subterránea y 1000 ton/día a cielo abierto.

Por otro lado, su estructura organizacional es de tipo jerárquico-funcional, conforme se detalla en el Anexo 1, liderada por la Gerencia General, responsable de la dirección

estratégica y la toma de decisiones. Bajo este nivel operan las coordinaciones de Mina, Geología, Planta y Laboratorio, y el Proyecto PTR, encargadas del control técnico de los procesos productivos. Destaca la Unidad de Seguridad, Salud, Medio Ambiente y Cumplimiento, responsable del cumplimiento normativo y gestión ambiental. La organización se complementa con áreas de apoyo como mantenimiento, relaciones comunitarias, comunicación, administración de campamento y bodegas.

1.5.6. Procesos claves relacionados con el objetivo propuesto

En su fase de explotación minera, principalmente de oro y plata, en la Mina El Corazón se realiza la extracción del material y posteriormente ingresa a la planta de beneficio. En esta etapa, mediante distintos procesos de trituración, clasificación y molienda, se reduce el tamaño del mineral hasta obtener una granulometría adecuada para su procesamiento. Luego, el material es sometido a un tratamiento químico mediante procesos de lixiviación y adsorción, con la aplicación de reactivos como cal, cianuro y carbón activado, con el propósito de recuperar los metales de interés.

Como resultado del beneficio mineral y la separación de los valores metálicos, se generan relaves, los mismos que contienen arenas, agua residual del proceso, restos de reactivos y minerales no recuperados. Para su almacenamiento, la empresa cuenta con un sistema integrado de gestión de relaves compuesto de 25 piscinas.

Con el propósito de disminuir la toxicidad de los relaves, aumentar la estabilidad de los depósitos, reducir la generación de lixiviados y prolongar la vida útil de las relaveras existentes, AIC cuenta con una PTR. El proceso comprende el dragado de arenas, acondicionamiento con reactivos, flotación, espesamiento, filtrado y disposición final de los

relaves. Estas etapas implican el uso de insumos químicos, la manipulación de materiales con contenido de sulfuros y la generación de subproductos como el concentrado con minerales aprovechables, relave deshidratado y agua recuperada del proceso, la cual es recirculada dentro del sistema. Finalmente, el relave deshidratado es transportado hacia escombreras para su disposición final.

1.5.7. Principales cifras, ratios y números que definen a la empresa

La empresa presenta un crecimiento de ingresos netos, cercano al 40 % en los últimos ejercicios financieros disponibles, así como una expansión de sus activos totales superior al 20 %. Además, registra exportaciones de oro en barras por valores superiores a USD 40 millones en años recientes, siendo Estados Unidos su principal mercado de exportación.

1.5.8. Modelo de negocio

AIC opera bajo un modelo de negocio enfocado en la explotación y beneficio de minerales metálicos, principalmente oro y plata, integrando procesos de trituración, flotación y cianuración. La generación de valor se sustenta en la exportación de barras de oro hacia mercados internacionales, principalmente Estados Unidos, contribuyendo al dinamismo del sector minero ecuatoriano.

1.5.9. Grupos de interés internos y externos

A nivel interno destacan la Gerencia General, las coordinaciones técnicas y la Unidad de Seguridad, Salud y Medio Ambiente, responsables del control operativo y cumplimiento normativo. Entre los stakeholders externos se encuentran el Ministerio de Ambiente y Energía (MAE), la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) y las comunidades locales del área de influencia.

CAPÍTULO 2: ELABORACIÓN Y GESTIÓN DE PROYECTOS SOSTENIBLES

2.1. Análisis externo para la propuesta de solución

2.1.1. Análisis PESTEL

El análisis PESTEL de AIC, que se encuentra detallado en el Anexo 2 y esquematizado en la Figura 1, permite identificar los principales factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que inciden en la evaluación de su desempeño sostenible (Makos, 2024).

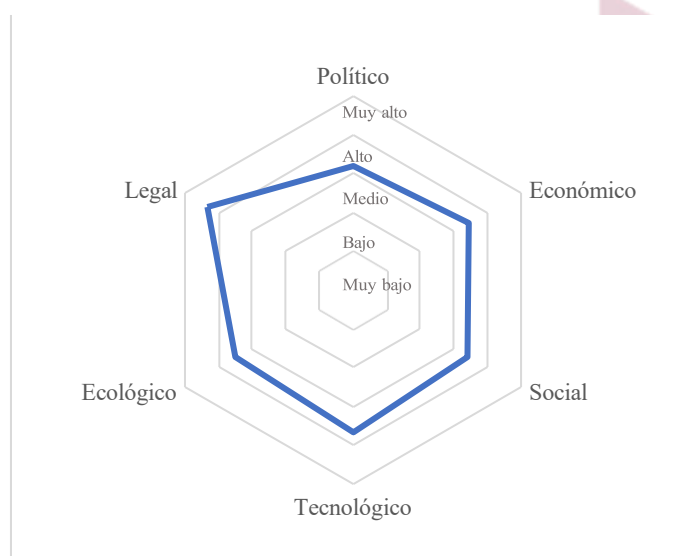


Figura 1 Esquematización del análisis PESTEL

Elaboración: Autores, 2026.

El factor político es clave para la minería en Ecuador, pues depende de decisiones gubernamentales, estabilidad institucional y regulación. Las políticas públicas impulsan formalización y supervisión estatal del sector minero (MERNNR, 2020); sin embargo, su ejecución puede generar tensiones sociales y económicas en el territorio (El Oriente, 2026; Ministerio de Ambiente y Energía [MAE], 2026).

En el factor económico, la minería aporta a exportaciones y divisas del país, pero su rentabilidad depende del precio del oro, costos ambientales y acceso a financiamiento (Banco Central del Ecuador, 2025). Este último aspecto se encuentra limitado por tasas altas y riesgo, lo que concentra la inversión en la minería a gran escala (Planetgold, 2025).

En el factor social, la gestión de relaves mineros representa un aspecto crítico debido a la percepción de riesgo que genera en las comunidades cercanas, especialmente por su posible afectación a la salud, al agua y a los medios de vida (Cacciuttolo et al., 2023). En AIC, la relación entre el uso de sustancias químicas, las relaves y las quebradas cercanas, refuerza la necesidad de una gestión transparente y técnicamente sólida, orientada a reducir conflictos y fortalecer la aceptación comunitaria (Endara Espinosa, 2025).

La gestión moderna de relaves exige tecnologías que mejoren el desempeño ambiental y operativo; la modernización de equipos, como filtros prensa, optimiza la recuperación de agua y mejora la estabilidad de los depósitos (Bascetin et al., 2022). La automatización mediante sensores, monitoreo en tiempo real, SCADA, Big Data y modelamiento predictivo facilita el control de variables críticas, la anticipación de fallas y la toma de decisiones basadas en datos (Nagaralawala, 2025; Peppas et al., 2026).

La gestión de relaves constituye un factor ecológico relevante por sus posibles impactos sobre el suelo, las aguas superficiales y subterráneas, la calidad del aire y a la biodiversidad (Cacciuttolo et al., 2023; Endara Espinosa, 2025). En el caso de AIC, su ubicación en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Cotacachi Cayapas incrementa la importancia de controlar los riesgos asociados a filtraciones, drenaje ácido y fallas

estructurales, debido a su posible incidencia sobre la microcuenca del río Verde Chico si no se aplican estándares técnicos adecuados (Endara Espinosa, 2025).

En Ecuador, la minería se desarrolla bajo un marco legal amplio condicionado por la Constitución de 2008, que reconoce los derechos de la naturaleza, el agua y un ambiente sano, así como por estándares internacionales que fortalecen las operaciones (Ayala Lomas, 2025; Villagómez Moncayo et al., 2023). Paralelamente, el uso de recursos naturales requiere de autorizaciones, sujetas al cumplimiento ambiental y al control de las autoridades (Asamblea Nacional del Ecuador, 2009); su incumplimiento puede derivar en sanciones, suspensión o revocatoria de dichas autorizaciones (Soria-Maldonado & Cáceres-Romero, 2022).

2.1.2. Estudio de benchmarking (análisis de la competencia)

El estudio de benchmarking, que se presenta en la Tabla 1, evidencia un avance significativo de AIC en la variable tecnológica, debido a que cuenta con la PTR en operación. Esto la posiciona por encima del Proyecto Mirador, que presenta una aplicación parcial del sistema, y de Fruta del Norte, donde los relaves no son filtrados; aunque aún por debajo de Cerro Lindo, que muestra mayor madurez tecnológica. En recuperación de agua, AIC proyecta niveles superiores al 70 %, por encima de las operaciones nacionales y cercanos al estándar internacional.

Sin embargo, se identifica una brecha en el Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001, ya que AIC no cuenta con certificación formal, a diferencia de las referencias comparadas. Respecto al enfoque de ciclo de vida, AIC lo plantea como propuesta estructurada, lo que representa una ventaja metodológica frente a Mirador y Fruta del Norte.

En cuanto al estándar ICMM, monitoreo ambiental continuo, sostenibilidad pública y comunicación con stakeholders, AIC se encuentra en proceso de alineación y fortalecimiento, mientras que las demás operaciones presentan mayor consolidación.

Tabla 1 *Estudio de Benchmarking*

Variable	Agrocorazón	Mirador	Fruta del Norte	Cerro Lindo
Tecnología de relaves filtrados	En operación	Parcial	No filtrado	Sí
Recuperación de agua	Alta (objetivo >70%)	Media	Media	Alta (>80%)
SGA ISO 14001	No implementado	Sí	Sí	Sí
Enfoque ciclo de vida	Propuesto	No explícito	No explícito	Parcial
Estándar ICMM	En alineación	Sí	Sí	Sí
Monitoreo ambiental continuo	Propuesto	Sí	Sí	Sí
Estrategia de sostenibilidad pública	En desarrollo	Sí	Sí	Sí
Comunicación con stakeholders	En fortalecimiento	Media	Alta	Alta
Gestión de pasivos ambientales	Preventiva	Correctiva	Preventiva	Preventiva
Nivel de innovación tecnológica	Medio–alto	Medio	Medio	Alto

Elaboración: Autores, 2026.

2.1.3. Estudio de proveedores y stakeholders

La calidad técnica y tecnológica de los proveedores influye directamente en la estabilidad y eficiencia de la gestión de relaves. Por ello, los principales proveedores identificados corresponden a empresas de maquinaria y equipos para el tratamiento de relaves, laboratorios ambientales acreditados, consultoras ambientales, y proveedores de geomembranas, sistemas de impermeabilización y sustancias químicas.

En el estudio de stakeholders se identifican como actores clave al MAE, ARCOM, las comunidades locales, el GAD Municipal y el GAD Parroquial, todos con un nivel alto de influencia e interés en la propuesta. El MAE tiene un rol determinante en el control y

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

aprobación ambiental, mientras que ARCOM interviene desde la fiscalización técnica de la actividad minera. Por su parte, las comunidades locales representan un grupo de interés relevante debido a su ubicación dentro de área de influencia proyecto y a su rol fundamental en los procesos de participación ciudadana. Asimismo, el GAD Municipal y el GAD Parroquial inciden en el apoyo territorial y en la articulación local.

2.2. Modelo de negocio

2.2.1. Business Model Canvas

El modelo de negocio, detallado en el Anexo 3, se orienta a evaluar el desempeño sostenible del sistema de relaves filtrados, dirigido principalmente a un segmento Business to Business (B2B) técnico-especializado conformado por empresas del sector minero metálico que generan relaves y requieren mejorar su eficiencia, cumplimiento ambiental y desempeño sostenible. La propuesta de valor se centra en una evaluación técnico-operativa y ambiental del sistema, mediante el levantamiento de información, revisión de datos técnicos, definición de indicadores, elaboración de balances, identificación de brechas y ACV.

Para su aplicación, el modelo requiere recursos técnicos como registros operativos, datos históricos, especialistas ambientales y herramientas de análisis. Además, involucra actores estratégicos como autoridades, proveedores y comunidades. Sus canales corresponden a mecanismos técnicos e institucionales y espacios de comunicación con partes interesadas. Mientras que, en términos económicos, el modelo genera principalmente beneficios indirectos asociados a la optimización operativa, reducción del consumo de agua, mejora del cumplimiento ambiental, disminución de sanciones y reducción de pasivos ambientales.

2.2.2. Go to Market con enfoque sostenible

La estrategia Go to Market con enfoque sostenible, presentada en la Tabla 2, define la forma en que la propuesta de evaluación del sistema de relaves filtrados puede introducirse y posicionarse en empresas mineras metálicas de pequeña y mediana escala, bajo un modelo B2B. Su propuesta de valor se centra en transformar la gestión del relave en un activo técnico, ambiental y económico, mediante una recuperación de agua superior al 70%, la recuperación potencial de oro remanente y otros metales valiosos y la reutilización del relave filtrado en esquemas compatibles con la sostenibilidad y la economía circular.

Tabla 2 Estrategia Go to Market con enfoque sostenible

Elemento estratégico	Descripción
Segmento objetivo	Empresas mineras metálicas de pequeña y mediana escala
Modelo de negocio	B2B
Propuesta de valor	Transformación del relave en activo técnico y económico
Beneficios clave	Recuperación de agua (>70 %) y oro, reutilización del relave
Canales	Consultoría técnica, reportes de sostenibilidad y alianzas estratégicas
Relación con stakeholders	Transparencia, diálogo comunitario y fortalecimiento reputacional
Aliados estratégicos	Proveedores con certificaciones ambientales y energéticas
Logística	Ciclo cerrado con recirculación de agua y reutilización de relaves
Estrategia de precios	Pricing basado en valor sostenible
Impacto esperado	Reducción de costos, pasivos ambientales y riesgos regulatorios

Elaboración: Autores, 2026.

La estrategia se apoya en canales técnicos e institucionales, como consultoría especializada, reportes de sostenibilidad y alianzas estratégicas, junto con una relación con stakeholders basada en transparencia, diálogo comunitario y fortalecimiento reputacional. Asimismo, considera aliados estratégicos con certificaciones ambientales y energéticas, una

logística orientada al ciclo cerrado mediante la recirculación de agua y la reutilización de

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

relaves, y una estrategia de precios basada en el valor sostenible generado. Como impacto esperado, se proyecta la reducción de costos, pasivos ambientales y riesgos regulatorios.

CAPÍTULO 3: SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN

3.1. Análisis del contexto de la organización

3.1.1. Cinco fuerzas de Porter

El modelo de las cinco fuerzas de Porter permite analizar el entorno competitivo en el que se desarrolla la actividad de la organización, identificando la influencia de clientes, proveedores, competidores, nuevos entrantes y productos sustitutos (Garzón & Landázuri, 2023). Este análisis, presentado en la Tabla 3, facilita el entendimiento de las condiciones del sector minero y de aquellos factores que pueden incidir en el desempeño de la PTR.

Tabla 3 *Análisis de las cinco fuerzas de Porter.*

Fuerza	Nivel	Implicaciones en el SGC
Clientes y partes interesadas	Alto	La operación minera se desarrolla en un entorno donde crece la exigencia ambiental, transparencia y sostenibilidad por parte de todas las partes interesadas. Además, los clientes cada vez exigen más certificaciones o sellos que aseguren la sostenibilidad.
Proveedores	Medio	El proyecto depende de proveedores tecnológicos y técnicos especializados para el funcionamiento de la PTR, como proveedores de insumos y equipos, laboratorios acreditados y consultoras ambientales.
Competidores o referentes del sector	Alto	En operaciones de proyectos como Mirador, Fruta del Norte y Cerro Lindo, se han implementado distintos niveles de gestión de relaves y sistemas de sostenibilidad, constituyendo estándares de referencia importantes. AIC presenta avances tecnológicos en filtrado de relaves y recuperación de agua, aunque mantiene brechas en certificaciones ambientales y posicionamiento en sostenibilidad.
Nuevos entrantes	Bajo	La alta inversión y la adopción de tecnologías avanzadas de gestión de relaves, bajo estrictos estándares, son factores que condicionan el desarrollo de nuevas operaciones con características similares.
Productos sustitutos	Bajo	El desarrollo de tecnologías alternativas para el manejo de relaves y nuevas metodologías de gestión ambiental en la industria minera pueden influir en la evolución de las prácticas del sector y en los estándares operativos aplicables.

Fuente: Autores, 2026.

3.1.2. Análisis de la cadena de valor

El análisis de la cadena de valor permite identificar las actividades internas que generan valor dentro de la organización y que influyen en el desempeño de sus procesos; para lo cual se distinguen las actividades primarias y actividades de apoyo (Vásquez Barajas et al., 2020). El análisis, detallado en la Tabla 4, se centra en el proceso de la PTR de AIC, identificando las actividades que intervienen en su operación y gestión.

Tabla 4 Cadena de valor del proceso de tratamiento de relaves

Tipo de actividad	Actividad	Descripción dentro del proceso
Actividades primarias	Logística interna	Recepción y manejo del relave proveniente del proceso de beneficio mineral y control de insumos necesarios para el funcionamiento del sistema.
	Operaciones	Procesos de espesamiento, filtrado y manejo del relave para reducir su contenido de humedad y permitir la recuperación de agua para recirculación en la operación minera.
	Logística externa	Transporte y disposición final del relave filtrado en las áreas designadas para su almacenamiento o manejo posterior.
	Marketing y ventas	Comunicación del cumplimiento de estándares ambientales y prácticas responsables en la gestión de relaves.
	Servicios	Actividades de monitoreo, mantenimiento y seguimiento técnico de la PTR y de la gestión ambiental asociada al proceso.
Actividades de soporte	Infraestructura	Sistemas de gestión, procedimientos operativos y estructura organizacional que permiten la operación y control del proceso.
	Gestión de personas	Capacitación del personal operativo y técnico en manejo de relaves, seguridad industrial y cumplimiento de estándares ambientales.
	Desarrollo tecnológico	Implementación y mejora de tecnologías y sistemas de monitoreo para optimizar el proceso y reducir impactos ambientales.
	Abastecimiento	Selección y gestión de proveedores especializados en equipos, insumos y servicios técnicos necesarios para el funcionamiento de la PTR.

Fuente: Autores, 2026.

3.1.3. Análisis FODA

En el Anexo 4, se presenta la evaluación de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas vinculadas a la PTR. En este análisis destaca, como principal fortaleza, la capacidad tecnológica de la planta para la deshidratación de relaves mediante filtro prensa, así como su la recirculación de agua. No obstante, también se identifican debilidades relacionadas con la dependencia de proveedores especializados, brechas en certificaciones ambientales y la falta de una evaluación estructurada del desempeño sostenible. A nivel externo, las oportunidades se asocian con las tendencias de sostenibilidad, economía circular y posicionamiento como referente en pequeña minería; mientras que las amenazas se relacionan con el marco legal sancionatorio, la conflictividad social por recursos, el escenario económico adverso y los riesgos ambientales inherentes al manejo de relaves.

A partir del análisis FODA, se plantearon estrategias orientadas a consolidar un modelo de gestión de relaves filtrados como eje técnico, ambiental y estratégico para fortalecer el desempeño sostenible de la PTR de AIC, especificados en el Anexo 5. La estrategia principal consiste en potenciar la capacidad instalada y el sistema de recirculación de agua, con el fin de mejorar el desempeño hídrico y facilitar el acceso a financiamiento sostenible. Como acciones prioritarias, se propone implementar estándares internacionales de gestión ambiental, incorporar herramientas de monitoreo en tiempo real y formalizar el modelo de evaluación bajo un enfoque de ACV. Complementariamente, se recomienda fortalecer alianzas con proveedores especializados, maximizar la eficiencia en el uso del agua y consolidar una estrategia de reputación corporativa que contribuya a reducir riesgos regulatorios, prevenir conflictos socioambientales y aumentar la competitividad.

3.2. Sistema de Gestión de Calidad

Actualmente, AIC no cuenta con un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) formalmente implementado; por ello, con base en los principales factores identificados en el análisis del contexto organizacional, se proponen los lineamientos básicos que deben considerarse para un SGC enfocado en el tratamiento de relaves.

3.2.1. Alcance geográfico del SGC

El SGC comprende las operaciones de la PTR ubicadas en la comuna El Corazón, parroquia García Moreno, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, Ecuador. La sede administrativa de Quito no se incluye dentro del alcance operativo; sin embargo, procesos de apoyo participan de manera indirecta en el funcionamiento del sistema.

3.2.2. Alcance operativo del SGC

El SGC abarca todas las actividades relacionadas con el tratamiento de relaves, desde la recepción del material proveniente de trituración, molienda y flotación, hasta los procesos de espesamiento, filtración, recuperación de agua y disposición final. Asimismo, incluye actividades de mantenimiento, monitoreo, control y verificación operacional.

3.2.3. Productos y servicios incluidos

El SGC controla el relave filtrado con parámetros adecuados de humedad y estabilidad física para su disposición segura; agua recuperada apta para recirculación en el proceso industrial; y servicios de monitoreo ambiental y operacional orientados a verificar el desempeño del sistema y prevenir impactos ambientales.

3.2.4. Aplicabilidad de la norma ISO 9001:2015

Para el alcance definido, los requisitos de la norma ISO 9001:2015 se consideran aplicables al proceso de tratamiento de relaves, ya que no se identifican exclusiones evidentes que limiten su implementación. El sistema comprende el diseño, operación, seguimiento y mejora de los procesos asociados al tratamiento de relaves, promoviendo la satisfacción de las partes interesadas y la mejora continua del desempeño organizacional.

3.2.5. Declaración del alcance

El SGC de AIC aplica al proceso de tratamiento de relaves desarrollado en la unidad operativa de Cotacachi, incluyendo la recepción del relave, espesamiento, filtración, recuperación de agua, control operacional y disposición final. Su propósito es asegurar la calidad y trazabilidad del proceso, fortalecer el cumplimiento de requisitos aplicables y promover la mejora continua bajo un enfoque de gestión responsable y sostenible.

3.3. Sistema de Gestión Ambiental

3.3.1. Datos generales del plan

Este plan de implementación del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) basado en ISO 14001 se aplica a las principales actividades operativas de AIC, especialmente a las relacionadas con la minería subterránea, el procesamiento de minerales y la gestión de relaves. Estas actividades representan los procesos centrales de la operación y, a su vez, constituyen las etapas donde se generan los principales aspectos e impactos ambientales. Por ello, el plan se enfoca en establecer directrices para mejorar la gestión ambiental en estas áreas clave, promoviendo prácticas responsables en el uso de los recursos naturales, la gestión adecuada de residuos y el control de emisiones.

3.3.2. Identificación de aspectos e impactos ambientales

Con base en el análisis de las actividades operativas de AIC, se identificaron cinco aspectos ambientales relevantes vinculados con la explotación minera, el beneficio del mineral y el manejo de relaves, junto con sus respectivos impactos ambientales. El detalle se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5 *Identificación de aspectos e impactos ambientales*

Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Generación y manejo de relaves	Contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Contaminación de suelos. Riesgos ecológicos y para la salud humana.
Consumo agua y generación de efluentes	Agotamiento del recurso hídrico Alteración de calidad de cuerpos hídricos Afectación a ecosistemas acuáticos.
Generación de emisiones atmosféricas	Aumento de la huella de carbono Afectación a la calidad del aire por material particulado y gases (NO _x , SO ₂ y CO ₂) Afectación a la salud de comunidades cercanas y trabajadores
Aprovechamiento del recurso suelo	Deforestación Erosión del suelo Fragmentación de hábitats, pérdida de la biodiversidad
Uso de sustancias químicas	Contaminación del suelo y agua con desechos peligrosos Derrames de sustancias químicas peligrosas Riesgos ecológicos y para la salud humana

Fuente: Autores, 2026

3.3.3. Requisitos legales aplicables

AIC, para el desarrollo de sus actividades mineras, debe cumplir con una serie de requisitos legales, los cuales se exponen en el Anexo 6. Estos requisitos abarcan las autorizaciones administrativas ambientales requeridas para las fases de explotación y beneficio, la presentación periódica de auditorías ambientales de cumplimiento, la autorización para el uso y aprovechamiento del recurso hídrico, el control del uso de cianuro

en el proceso de beneficio del mineral y el registro como generador de desechos peligrosos y/o especiales.

3.3.4. Objetivos y metas ambientales

A partir de los aspectos e impactos ambientales identificados y de los requisitos legales aplicables, se establecieron objetivos y metas ambientales. Estos lineamientos permiten orientar el SGA hacia la mejora del desempeño ambiental, priorizando el uso eficiente del recurso hídrico, el manejo adecuado de relaves, la reducción de emisiones atmosféricas y el manejo seguro de sustancias químicas utilizadas. Para cada objetivo se define una meta medible y un indicador de seguimiento. El detalle se presenta en la Tabla 6 de objetivos y metas ambientales.

Tabla 6 *Objetivos y metas ambientales*

Objetivo	Meta	Indicador
Optimizar el uso del recurso hídrico en los procesos	Reducir en un 15 % el consumo de agua utilizada en los procesos durante los próximos dos años mediante la implementación de prácticas de recirculación y control del uso del recurso hídrico.	Consumo de agua por tonelada de mineral procesado (m ³ /ton de mineral).
Mejorar la gestión y control ambiental de los relaves generados en la operación minera	Garantizar que el 100 % de los relaves generados en los procesos de beneficio del mineral sean gestionados y dispuestos conforme a los procedimientos establecidos en el plan de manejo ambiental durante el período de implementación del sistema.	Porcentaje de relaves gestionados conforme a los procedimientos ambientales establecidos (%).
Fortalecer el manejo seguro de sustancias químicas utilizadas en el proceso de beneficio del mineral	Capacitar al 100 % del personal involucrado en el manejo de sustancias químicas peligrosas, especialmente cianuro, en procedimientos de manejo seguro y respuesta ante emergencias durante el primer año.	Porcentaje de trabajadores capacitados en manejo seguro de sustancias químicas (%).

Fuente: Autores, 2026

3.3.5. Plan de acción para la implementación

Con el propósito de alcanzar los objetivos y metas ambientales, se establece un plan de acción que contempla una serie de actividades orientadas a fortalecer la gestión ambiental de las principales operaciones de la empresa, presentadas en la Tabla 7. El plan de acción se enfoca principalmente en optimizar el consumo de agua en los procesos de beneficio del mineral, fortalecer el manejo adecuado de relaves, y promover el manejo seguro de sustancias químicas utilizadas en el proceso productivo.

Tabla 7 Plan de acción para la implementación del SGA

Acción	Responsable	Recursos	Plazo
Implementar un programa de monitoreo y control del consumo de agua en los procesos	Jefe de Operaciones/ Responsable Ambiental	Equipos de medición, registros de control, personal técnico	6 meses
Implementar prácticas de recirculación y reutilización de agua en los procesos.	Jefe de Planta	Infraestructura hidráulica, bombas de recirculación, presupuesto operativo	12 meses
Fortalecer los procedimientos de manejo, tratamiento y disposición de relaves generados en la planta.	Responsable Ambiental	Equipos de control, capacitación técnica, manuales operativos	6 meses
Desarrollar programas de capacitación para el personal en manejo seguro de sustancias químicas peligrosas (cianuro) utilizadas en el proceso productivo.	Departamento de Talento Humano / Responsable Ambiental	Material de capacitación, instructores especializados, salas de capacitación	3 meses

Fuente: Autores, 2026

3.3.6. Sistema de seguimiento y evaluación

El sistema de monitoreo se fundamenta en indicadores de desempeño ambiental asociados al consumo de recursos naturales, gestión de relaves, manejo de residuos, control de emisiones atmosféricas y uso seguro de sustancias químicas. El responsable ambiental, en coordinación con los jefes de área, deberá mantener registros periódicos y evaluar los

resultados con una frecuencia trimestral o semestral, según la disponibilidad de información y la naturaleza de cada indicador. Adicionalmente, se realizarán auditorías internas ambientales para verificar el cumplimiento de los procedimientos y evaluar la eficacia del SGA, permitiendo detectar no conformidades y fortalecer el control de los aspectos e impactos ambientales significativos.

3.4. Sistema Integrado de Gestión

3.4.1. Datos generales del plan

Actualmente, AIC no cuenta con un Sistema Integrado de Gestión (SIG) formalmente implementado; por ello, se propone una estructura básica orientada a integrar los componentes de calidad, ambiente y seguridad y salud ocupacional. El SIG se enfoca en los procesos críticos vinculados con la PTR y su propósito es fortalecer su gestión integrada mediante la estandarización de procesos, control operacional, cumplimiento legal, gestión de riesgos y oportunidades, trazabilidad documental y mejora continua. Bajo este enfoque, el sistema no se limita al cumplimiento normativo, sino que busca mejorar el desempeño sostenible de la operación, reduciendo impactos ambientales, optimizando el uso de recursos y fortaleciendo la seguridad de los trabajadores.

3.4.2. Apoyo y compromiso de la alta dirección

El compromiso de la Alta Dirección constituye un pilar clave en la implementación efectiva del SIG, debido a que asume un rol activo en la implementación del sistema. Este compromiso se refleja en la definición de políticas organizacionales, la asignación de responsabilidades y la supervisión del desempeño del sistema; así como la incorporación de la gestión del cambio climático, como factor estratégico.

Para garantizar la correcta implementación del SIG, la Alta Dirección debe asegurar la disponibilidad de recursos humanos, técnicos y financieros, así como la designación de responsables para cada uno de los procesos. Además, debe impulsar una cultura organizacional orientada a la mejora continua, la prevención de la contaminación y el cumplimiento de la normativa vigente.

3.4.3. Alcance y componentes del SIG

Para AIC, el alcance del sistema comprende todas las actividades relacionadas con la explotación minera, el procesamiento del mineral y la gestión de relaves, así como los procesos administrativos que respaldan dichas operaciones. Este enfoque permite integrar los elementos de gestión que permiten integrar calidad, ambiente y seguridad y salud ocupacional en una misma estructura de control. Para ello, se delimitan las normas de referencia, los procesos incluidos, los ejes de gestión aplicables y los procesos de apoyo necesarios para asegurar la operación del sistema, en la Tabla 8.

Tabla 8 *Alcances y componentes del Sistema Integrado de Gestión*

Componente	Alcance propuesto
Tipo de sistema	Sistema Integrado de Gestión de AIC, enfocado a la PTR
Normas de referencia	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 e ISO 45001:2018.
Procesos incluidos	Explotación minera, procesamiento del mineral, gestión de relaves y procesos de apoyo
Eje de calidad	Estandarización de procedimientos, control de parámetros operativos, trazabilidad de registros, evaluación de proveedores y mejora continua del proceso.
Eje ambiental	Identificación de aspectos e impactos ambientales, control de relaves, eficiencia hídrica, gestión de sustancias químicas, cumplimiento legal y prevención de contaminación.
Eje de seguridad y salud ocupacional	Identificación de peligros, evaluación de riesgos laborales, control de exposición a sustancias químicas, mantenimiento seguro, capacitación y respuesta ante emergencias.
Procesos de apoyo	Gestión documental, compras, contratación de proveedores especializados, capacitación, comunicación interna, auditorías y revisión por la dirección.

Fuentes: Autores, 2026

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

3.4.4. Análisis de brechas del SIG

En el análisis de brechas de la empresa, se evidencian deficiencias relevantes en los tres componentes del SIG. En el componente ambiental, se requiere fortalecer la matriz de aspectos e impactos ambientales, el seguimiento de indicadores hídricos y el control documentado del cumplimiento legal. En calidad, se evidencia la necesidad de formalizar procedimientos operativos, estandarizar registros y controlar indicadores asociados al desempeño del tratamiento de relaves. En seguridad y salud ocupacional, se requiere estructurar la identificación de peligros, evaluación de riesgos y controles preventivos en actividades críticas como operación de equipos, manejo de sustancias químicas y mantenimiento.

3.2.6. Plan de acción para la implementación

A partir del análisis de brechas, se identifican como áreas prioritarias de intervención la gestión ambiental, que requiere el fortalecimiento del control y monitoreo de relaves filtrados y recursos hídricos; la gestión de calidad, orientada a la estandarización de procesos operativos y documentación técnica; la seguridad y salud ocupacional, que demanda la formalización de la gestión de riesgos laborales; y la gestión integrada, que debe consolidarse mediante un enfoque sistémico basado en el ciclo planificar, hacer, verificar, actuar (PHVA).

Con el objetivo de cerrar las brechas identificadas, en la Tabla 9 se propone un plan de acción que además fortalezca la gestión ambiental, la calidad de los procesos y la seguridad y salud ocupacional.

Tabla 9 *Plan acción para el cierre de brechas*

Actividad	Responsable	Recursos	Plazo	Indicador
-----------	-------------	----------	-------	-----------

Actualización de matriz de aspectos e impactos ambientales	Área ambiental	Técnico ambiental, software de monitoreo ambiental	2 meses	% actualización
Identificación y actualización de requisitos legales	Área legal / ambiental	Normativa MAATE, ARCERNNR	1 mes	% cumplimiento
Estandarización de procesos (relaves, agua, químicos)	Operaciones	Manuales técnicos, procedimientos	3 meses	Nº procedimientos
Implementación de indicadores ambientales y operativos	SIG	Sistema digital de monitoreo	2 meses	KPI definidos
Implementación de matriz de riesgos laborales (IPER)	SST	Técnico SST, herramientas de evaluación	2 meses	Nº riesgos evaluados
Capacitación en SIG al personal	RRHH	Programas de capacitación	Continuo	% personal capacitado
Implementación del ciclo PHVA	Alta dirección	Sistema SIG	6 meses	Auditorías internas
Auditoría interna del SIG	Equipo SIG	Auditor interno	6 meses	Informe de auditoría

Fuentes: Autores, 2026

3.2.7. Sistema de seguimiento y evaluación

Para garantizar el cumplimiento del plan acción se establecerá un sistema de seguimiento y evaluación basado en indicadores de desempeño, reportes periódicos y auditorías internas, que permitan conocer el avance y la eficacia del SIG. El seguimiento se realizará mediante indicadores clave como el consumo de agua, el nivel de cumplimiento legal, la gestión de relaves y la seguridad laboral; además, se implementarán reportes mensuales de avance por área, reuniones periódicas de seguimiento con la alta dirección y auditorías internas del SIG.

CAPÍTULO 4: DISEÑO PARA LA SOSTENIBILIDAD Y SU CONTEXTO GLOBAL

4.1. Análisis ESG

4.1.1. Gobernanza

La gobernanza de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. se refleja en su estructura organizacional, lineamientos de gestión y mecanismos de control interno. La empresa orienta sus actividades hacia una operación minera eficiente y sostenible, basada en el cumplimiento normativo, la seguridad laboral, la protección ambiental y la responsabilidad social. Su estructura responde a un modelo jerárquico funcional, encabezado por la Gerencia General, desde donde se articulan áreas técnicas, operativas y de apoyo. Dentro de esta organización destaca la Unidad de Seguridad, Salud, Medio Ambiente, Rescate y Cumplimientos, encargada de integrar el seguimiento normativo, la gestión ambiental y la prevención de riesgos. Además, dispone de planes, programas, procedimientos, registros, monitoreos y auditorías internas que permiten dar trazabilidad a sus actividades y verificar el cumplimiento de sus obligaciones, especialmente en aspectos críticos como relaves, agua cianurada, sustancias químicas y seguridad laboral.

4.1.2. Social

El componente se refleja en la interacción de la compañía con las comunidades del área de influencia, mecanismos de participación directa, generación de beneficios económicos y sociales, y apoyo al desarrollo local. La empresa mantiene convenios interinstitucionales con organizaciones locales como la comuna El Corazón, Río Verde, El Paraíso y asociaciones productivas, lo que refleja un vínculo activo con actores comunitarios. En términos de empleo, destaca la contratación de mano de obra local, alcanzando aproximadamente el 90 %

del personal tanto calificado como no calificado, lo que contribuye al desarrollo económico de la zona. Asimismo, la empresa participa en iniciativas de apoyo social, educativo, cultural, deportivo y de salud, incluyendo la construcción de un dispensario médico en la comunidad El Corazón, financiado en su totalidad por la compañía. A esto se suma la ejecución de obras de infraestructura básica, como vialidad, construcción de puentes y dotación de energía eléctrica en varias comunidades del área de influencia.

4.1.3. Ambiental

La Compañía Agroindustrial El Corazón S.A., cuenta con licencias ambientales para las fases de explotación y beneficio, registro minero, autorizaciones para el uso de agua, manejo de sustancias químicas, así como el registro como generador de desechos peligrosos y/o especiales.

A nivel de gestión, la empresa cuenta con un Sistema Integrado de Gestión Ambiental, el cual articula procedimientos documentales, planes de emergencia, monitoreo ambiental, programas de reforestación y auditorías internas. Este sistema se complementa con la ejecución de los Planes de Manejo Ambiental, orientados al control, prevención y seguimiento de los impactos generados por sus actividades.

En el ámbito operativo, uno de los principales elementos corresponde a la gestión de relaves a través de la Planta de Tratamiento, orientada al procesamiento de los relaves mineros generados y recuperación de agua. En este proceso también se obtiene concentrado recuperado, lo que evidencia un aprovechamiento adicional de materiales y contribuye a una gestión más eficiente de recursos. Adicionalmente, la empresa implementa un circuito cerrado

para el manejo de agua cianurada, que permite su recirculación dentro del proceso productivo, optimizando el consumo del recurso hídrico y reduciendo la generación de efluentes.

4.1.4. Económico

El desempeño económico revela una tendencia de crecimiento sostenido en los últimos años, reflejada en el incremento de sus ingresos netos, estimado en aproximadamente un 40 % en los ejercicios financieros recientes. Este comportamiento se complementa con una expansión de su estructura de activos, con un crecimiento superior al 20 %, lo que sugiere un fortalecimiento progresivo de su capacidad operativa y productiva. En cuanto a su actividad comercial, se registran exportaciones de oro en barras por valores superiores a USD 40 millones, teniendo como principal destino el mercado de Estados Unidos.

4.2. Indicadores

4.2.1. Indicadores legales

El cumplimiento legal de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. se evalúa a través de diversos indicadores, como se aprecia en el Anexo 7, los más relevantes se relacionan con el cumplimiento de la normativa aplicable, la vigencia de numerosos permisos conforme la actividad minera, así como la presentación de informes regulatorios y la ausencia de sanciones recibidas.

4.2.2. Indicadores sociales

En el componente social, se presentan indicadores clave que permiten valorar la relación de la empresa con la comunidad, como aquellos asociados a reuniones comunitarias, atención de quejas, contratación local, capacitación e inversión social, conforme se detalla en el Anexo 7. Estos indicadores reflejan el nivel de relacionamiento de la empresa con las

comunidades del área de influencia, así como su aporte al empleo local, al fortalecimiento de capacidades, así como al desarrollo local y económico.

4.2.3. Indicadores económicos

En el componente económico, los indicadores considerados se enfocan en la asignación de recursos para sostener la gestión ambiental y social de la empresa, incluyendo la inversión destinada a medidas ambientales, manejo de relaves, recirculación de agua, inversión comunitaria y aportes vinculados al desarrollo local, conforme se presenta en el Anexo 7. También se consideran aspectos asociados al costo de gestión de relaves y a los beneficios económicos derivados de la optimización de procesos.

4.2.4. Indicadores ambientales

En el componente ambiental, los indicadores se relacionan principalmente con el cumplimiento del Plan de Manejo Ambiental, ejecución de monitoreos, conformidad de los resultados obtenidos, recirculación de agua, gestión de relaves filtrados y prevención de incidentes ambientales, conforme se detalla en el Anexo 7. Estos aspectos permiten dar seguimiento a los puntos críticos de su operación, especialmente aquellos vinculados con el manejo de agua cianurada, control de descargas y disposición de relaves. Dentro de este componente, adquiere especial relevancia la Planta de Tratamiento de Relaves, al estar asociada con la recuperación de agua y tratamiento de arenas, lo que aporta al cierre técnico y rehabilitación progresiva de las relaveras.

4.3. Análisis de impactos ambientales

Como parte del análisis de este proyecto, se identifican los principales aspectos e impactos reales y potenciales asociados a la operación de la planta de tratamiento de relaves.

Cabe mencionar que esta alternativa tecnológica tiene como propósito no solo recuperar minerales remanentes, sino reducir el contenido de humedad, favoreciendo la recirculación de agua, disminución del potencial de generación de lixiviados, incrementar la estabilidad física de la escombrera y extender la vida útil de las relaveras existentes.

4.3.1. Impactos reales

Durante la operación de la Planta de Tratamiento de Relaves se identificaron aspectos e impactos ambientales reales asociados a sus procesos, detallados en el Anexo 8. El uso de bombas, sistemas de conducción, equipos de agitación, flotación y filtrado genera ruido, se relaciona con la alteración de los niveles de presión sonora y afectación a la fauna local y salud humana. El consumo de combustibles fósiles para generación eléctrica implica el agotamiento de recursos no renovables y la emisión de gases de combustión, con deterioro de la calidad del aire. Mientras que la adición de reactivos genera envases vacíos considerados como desechos peligrosos y exposición ocupacional a sustancias químicas. Como impactos positivos destacan la generación de empleo, recuperación de material concentrado, la recuperación y recirculación de agua, reducción del consumo de agua fresca y disminución del potencial de generación de lixiviados.

4.3.2. Impactos potenciales

En los impactos potenciales de la Planta de Tratamiento de Relaves se consideraron eventos no previstos como fallas operativas, derrames o deficiencias en el control del proceso, especificados en el Anexo 9. En el dragado de arenas, una falla en tuberías o sistemas de bombeo podría generar derrames de pulpa de relaves, con riesgo de contaminación del suelo y agua. Durante el acondicionamiento, el derrame accidental de reactivos podría afectar el

suelo, el agua o exponer al personal a sustancias químicas. En la flotación, una baja eficiencia del circuito podría reducir la recuperación de minerales y afectar el desempeño del sistema. En el espesamiento y filtrado, fallas en la separación sólido-líquido podrían incrementar la humedad del relave, disminuir la recuperación de agua y aumentar el potencial de lixiviados. Finalmente, una compactación inadecuada o deficiencias de drenaje en la disposición final podrían comprometer la estabilidad física del depósito y favorecer procesos de infiltración o erosión.

4.3.3. Análisis comparativo con el Plan de Manejo Ambiental

Se evaluó si las medidas contenidas en el Plan de Manejo Ambiental vigente de AIC permiten mitigar, corregir o compensar los aspectos e impactos ambientales asociados al proceso de tratamiento de relaves. Los resultados del análisis, detallados en el Anexo 10, evidencian que el plan cubre varios de los aspectos e impactos identificados; sin embargo, también presenta áreas con cobertura parcial. Por ello, resulta pertinente fortalecer la gestión de riesgos operativos y ambientales mediante la incorporación de controles específicos, indicadores de seguimiento, protocolos detallados e inspecciones técnicas en campo.

4.4. Análisis del ciclo de vida

El ACV del proceso de tratamiento de relaves desarrollado en la PTR de AIC, se plantea conforme a las directrices establecidas en las normas ISO 14040:2006, sobre principios y marco de referencia del ACV, e ISO 14044:2006, sobre requisitos y directrices para su aplicación (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b).

4.4.1. Definición del objetivo y alcance

El propósito principal de este ACV es analizar los impactos ambientales asociados al proceso de tratamiento de relaves, identificando oportunidades de mejora ambiental y fortalecimiento de la sostenibilidad operativa del proceso. Para esto, la unidad funcional corresponde al tratamiento de una tonelada métrica seca (TMS) de relave inicial ingresado al sistema, bajo un enfoque de puerta a puerta. A partir de esta unidad funcional, se consideraron las etapas que se encuentran bajo control directo de la compañía, excluyendo la extracción y disposición final; siendo los límites del sistema las siguientes etapas operacionales: acondicionamiento químico, flotación selectiva, espesamiento de relaves, ensacado y almacenamiento de concentrado, filtración mediante filtro prensa y recirculación del agua.

4.4.2. Análisis del inventario

La fase de inventario del ciclo de vida consistió en recopilar y cuantificar las entradas y salidas asociadas a las etapas operacionales evaluadas dentro del proceso de tratamiento de relaves. Para ello, se utilizó información obtenida del Reporte de Producción PTR Primer Trimestre 2026 y de los flujogramas operacionales de la empresa.

Cabe indicar que se utilizan reactivos químicos para mejorar la recuperación metalúrgica durante la flotación selectiva, como xantatos, sulfato de cobre, espumantes y floculantes. El mayor consumo corresponde a la cal utilizada durante el espesamiento y estabilización del relave.

En este sentido, con base en la unidad funcional definida para el estudio, correspondiente al tratamiento de 1,00 TMS de relave inicial ingresado al sistema, se identificaron las principales entradas del proceso, las cuales se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10 Principales entradas de la Planta de Tratamiento de Relaves

Entrada	Cantidad	Unidad
Relave alimentado	1,00	TMS
Consumo energético	43,75	kWh/TMS
Agua recirculada	3,13	m ³ /TMS
Sulfato de cobre	0,86	kg/TMS
Cal	3,10	kg/TMS
Floculante aniónico	0,19	kg/TMS
Espumante MIBC	0,14	kg/TMS
Xantato amílico Z-6	0,02	kg/TMS

Fuente: Autores con base en AIC (2026).

Posteriormente, se identificaron las principales salidas del sistema, considerando las corrientes resultantes del proceso de tratamiento de relaves. La salida principal corresponde al relave filtrado, obtenido como resultado del tratamiento, cuyo propósito es reducir su potencial de afectación ambiental y permitir su manejo posterior en condiciones más estables. Adicionalmente, el proceso genera concentrado recuperado, el cual es ensacado y almacenado para su posterior aprovechamiento debido a que conserva contenido de metales de interés; así como agua recuperada, que es reincorporada al sistema.

Por otro lado, debido a que la energía eléctrica empleada en el proceso proviene de un generador alimentado con diésel, se estimaron las emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético del tratamiento. Para ello, se utilizó el factor de emisión de 0,8 kg CO₂/kWh establecido por la herramienta metodológica TOOL33 de United Nations Framework Convention on Climate Change (2025), para sistemas de generación eléctrica con diésel de capacidad superior a 200 kW.

Al igual que las entradas, las salidas fueron expresadas con base en la unidad funcional definida para el estudio. Las principales salidas identificadas se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11 Principales salidas de la Planta de Tratamiento de Relaves

Salida	Cantidad	Unidad
Relave filtrado	0,94	TMS/TMS
Concentrado recuperado	0,06	t/TMS
Agua recuperada/recirculada	3,13	m ³ /TMS
Emisiones estimadas de CO ₂ por generación eléctrica con diésel	35,00	kg CO ₂ /TMS

Fuente: Autores con base en AIC (2026).

Es pertinente resaltar que la recuperación y recirculación de agua dentro del sistema permite reducir la necesidad de incorporación de agua fresca y fortalecer la eficiencia hídrica de la operación minera. No obstante, en esta sección no se incluyó la generación de desechos asociados al proceso, tales como envases de sustancias químicas, residuos provenientes del mantenimiento de equipos, posibles pérdidas de agua u otras corrientes secundarias, debido a la ausencia de datos específicos para su cuantificación.

4.4.3. Evaluación de impactos

La evaluación de impactos ambientales, especificada en el Anexo 11, permitió identificar y analizar los efectos potenciales asociados a las entradas y salidas de la operación de PTR. Las principales categorías de impacto evaluadas se indican en la Tabla 12.

Tabla 12 Categorías de impacto ambiental

Categoría de impacto	Nivel	Indicador del parámetro (unidad de medida)	Justificación en el sistema
Agotamiento de recursos	Alto	kg Antimonio (Sb) equivalente	Consumo de insumos no renovables por tonelada tratada.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Cambio climático	Alto	kg CO ₂ equivalente	Evaluado por el consumo eléctrico en el bombeo de los 150 m ³ de mezcla durante el turno de 16 horas.
Acidificación	Medio-Alto	kg SO ₂ equivalente	Monitoreo del arrastre de trazas de sulfuros presentes en las 80 ton de material arenoso.
Ecotoxicidad acuática	Alto	kg Zn equivalente	Evaluado por la interacción de reactivos orgánicos disueltos en el volumen hídrico de la pulpa.

Fuente: Autores, 2026.

El uso de reactivos químicos como sulfato de cobre, espumantes y xantatos representa riesgos de contaminación ambiental, especialmente en caso de derrames o manejo inadecuado. Asimismo, el funcionamiento de bombas, motores y filtros prensa genera consumo energético y emisiones indirectas de gases de efecto invernadero.

Con base en la información recopilada del inventario del ciclo de vida y considerando los principales insumos utilizados en el proceso, se realizó una estimación de los impactos ambientales asociados mediante la metodología de ACV.

Los resultados obtenidos permiten identificar las categorías ambientales más relevantes relacionadas con el consumo energético y el uso de reactivos químicos dentro del proceso evaluado. Cabe indicar que los valores presentados corresponden a resultados estimados obtenidos a partir de factores de caracterización y factores de emisión reportados en literatura técnica y metodologías internacionales de ACV.

Los resultados estimados para la categoría de calentamiento global muestran que el mayor aporte de emisiones de gases de efecto invernadero proviene del consumo de energía eléctrica con 7,07 Tn CO₂ eq, seguido por el uso de cal con 2,325 Tn CO₂ eq y sulfato de cobre con 0,00322 Tn CO₂ eq.

En la categoría de acidificación terrestre, el sulfato de cobre presenta un aporte de 0,001548 kg SO₂ eq/TMS asociado a la generación potencial de compuestos acidificantes equivalentes a SO₂. Este resultado representa un impacto ambiental negativo, ya que contribuye potencialmente a procesos de acidificación atmosférica y alteración de ecosistemas terrestres y acuáticos. No obstante, el valor obtenido es relativamente bajo, indicando una contribución moderada dentro del sistema evaluado.

El resultado de ecotoxicidad acuática evidencia que el sulfato de cobre constituye una fuente potencial de toxicidad para organismos acuáticos debido al contenido de cobre presente en el reactivo. El valor obtenido fue de 1,78 kg Zn eq representa un impacto negativo para el ambiente, puesto que refleja la capacidad potencial de generar efectos tóxicos sobre ecosistemas acuáticos. Este comportamiento es característico de compuestos metálicos utilizados en procesos mineros y metalúrgicos.

Aunque el valor estimado agotamiento de recursos fue de 0.000663 kg Sb eq/kg Cu, considerándose bajo, el impacto se considera ambientalmente negativo, ya que implica el uso continuo de recursos abióticos finitos. En comparación con otras categorías de impacto, el agotamiento de recursos presenta una contribución relativamente menor dentro del proceso analizado.

Sin embargo, la PTR implementado por la empresa reduce significativamente el contenido de humedad del material dispuesto, disminuyendo riesgos de infiltración y posibles afectaciones al recurso hídrico. Además, la recuperación de agua mediante filtros prensa constituye una medida importante de sostenibilidad y economía circular. De manera complementaria, el PMA de la empresa establece medidas de prevención y mitigación

relacionadas con: recirculación de agua, monitoreo de emisiones, manejo de químicos, control de partículas, mantenimiento de relaveras, tratamiento de aguas industriales.

4.4.4. Interpretación de resultados

La interpretación de resultados permitió identificar las etapas del proceso PTR que generan mayor carga ambiental y establecer oportunidades de mejora para fortalecer el desempeño ambiental de la operación. Los resultados evidenciaron que los principales impactos ambientales se encuentran asociados al consumo de reactivos químicos, consumo energético de bombas y filtros, manejo de relaves y uso de agua industrial.

No obstante, también se identificaron importantes beneficios ambientales derivados de la PTR implementado por la empresa. La recirculación de aproximadamente 7049,34 m³ de agua durante el primer trimestre de 2026 representa una medida significativa de eficiencia hídrica y reducción del consumo de agua fresca (AIC, 2026).

Asimismo, la utilización de filtros prensa permite obtener arenas secas con menor contenido de humedad, mejorando la estabilidad física del depósito y reduciendo riesgos de infiltración y generación de drenaje ácido.

En función de los resultados obtenidos, se recomienda fortalecer el monitoreo ambiental, optimizar la dosificación de reactivos, mejorar la eficiencia energética, incrementar la automatización del proceso, fortalecer estrategias ESG y economía circular e implementar indicadores de huella hídrica y huella de carbono.

De manera general, el ACV aplicado a la PTR de AIC demuestra que la integración de procesos de recirculación de agua y relaves filtrados constituye una alternativa

ambientalmente favorable para fortalecer la sostenibilidad minera y reducir impactos asociados al manejo convencional de relaves.

4.4.5. Beneficios del ACV para la gestión organizacional

En el caso de la PTR de AIC, el ACV permite analizar el comportamiento ambiental del sistema, con un enfoque de puerta a puerta, identificando oportunidades para optimizar el uso de agua, energía y reactivos químicos.

Entre los principales beneficios identificados en la PTR destaca la recuperación y recirculación de agua industrial, logrando reutilizar aproximadamente 7049,34 m³ de agua durante el primer trimestre de 2026. Esto permite disminuir el consumo de agua fresca y fortalecer la sostenibilidad hídrica de la operación minera.

Asimismo, el uso de filtros prensa permite obtener relaves filtrados con menor contenido de humedad, reduciendo riesgos de infiltración y mejorando la estabilidad física del depósito de relaves. Sin olvidar que, este relave filtrado tiene el potencial de ser aprovechado para la fabricación de adoquines para su uso en zonas de tránsito peatonal y de estacionamiento (Jácome Calderón et al., 2022).

Otros beneficios del ACV del proceso de tratamiento de relaves incluyen la identificación de procesos críticos con mayor carga ambiental, la optimización del consumo de recursos, la reducción de costos operativos, el fortalecimiento de programas de sostenibilidad y el cumplimiento normativo. Además, contribuye a mejorar el desempeño ambiental, la imagen corporativa y la competitividad organizacional, así como a prevenir riesgos ambientales asociados al manejo de relaves y sustancias químicas.

4.4.6. Análisis de mejoras que se pueden implementar

Uno de los principales aspectos de mejora corresponde al consumo de reactivos químicos utilizados en el proceso de flotación selectiva. Durante el primer trimestre de 2026, el sulfato de cobre presentó un consumo de 1930 kg y la cal alcanzó un consumo de 6975 kg. En este sentido, se recomienda optimizar la dosificación de reactivos mediante sistemas automatizados de control y monitoreo, con el fin de reducir consumos innecesarios y minimizar riesgos de contaminación.

Otra mejora relevante corresponde al fortalecimiento de la eficiencia energética de bombas, filtros prensa y equipos de flotación, debido a que su operación continua representa un consumo significativo de energía eléctrica y genera emisiones indirectas de gases de efecto invernadero. Para ello, se propone ejecutar mantenimientos preventivos, optimizar los tiempos de operación, incorporar motores de alta eficiencia energética y evaluar el uso de energías renovables, considerando que actualmente la energía utilizada proviene de combustibles fósiles.

En relación con la gestión hídrica, la PTR presenta resultados positivos por la recuperación y recirculación de agua industrial; sin embargo, se recomienda fortalecer el monitoreo de la calidad del agua recirculada y evaluar periódicamente la eficiencia del sistema de reutilización. Asimismo, se identificó la necesidad de reforzar el monitoreo de emisiones atmosféricas, el control de material particulado, el monitoreo geoquímico de los relaves filtrados y el mantenimiento de relaveras y drenajes. Desde el enfoque organizacional, también se resulta pertinente que AIC implemente indicadores ESG que fortalezcan la sostenibilidad corporativa y mejoren la transparencia institucional.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y APLICACIONES

5.1. Conclusiones generales

La evaluación sistemática de la PTR de AIC permitió corroborar que la transición tecnología de relaves filtrados constituye una solución técnica eficiente para la gestión de residuos mineros, al reducir el contenido de humedad del material, mejorar la estabilidad física del depósito y optimizar la recuperación de agua para su recirculación en el proceso productivo, también constituye una alternativa de alto valor técnico y ambiental dentro de la pequeña minería en el país.

El ACV evidenció que los principales impactos ambientales del sistema se concentran en el consumo de energía, el uso de agua y el manejo de reactivos químicos. Sin embargo, se determinó que la implementación del sistema de filtrado reduce significativamente los riesgos de infiltración, la generación de efluentes y la ocupación de nuevas áreas para almacenamiento de relaves.

Finalmente, el diagnóstico estructural del entorno y de la organización resalta que, si bien la empresa cuenta con una sólida base técnica, el verdadero desafío radica en la articulación formal de sus procesos. La implementación del SIG propuesto subsana las desconexiones detectadas entre las áreas de calidad, gestión ambiental, seguridad y salud ocupacional. Al alinear las operaciones de la planta con los estándares internacionales ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001, la organización no solo asegura el estricto cumplimiento legal frente a los entes de control estatales, sino que construye una plataforma de gobernanza corporativa que potencia su posicionamiento institucional, reduce sus pasivos ambientales y minimiza la probabilidad de conflictos socioambientales en el territorio.

El estudio demuestra que la PTR posee un alto potencial para consolidarse como un modelo de minería sostenible en el Ecuador, al integrar innovación tecnológica, eficiencia operativa, cumplimiento normativo y responsabilidad ambiental, generando beneficios técnicos, económicos, sociales y ambientales para la organización y sus grupos de interés.

5.2. Conclusiones específicas

5.2.1. Análisis del cumplimiento de los objetivos de la investigación

El desarrollo metodológico planteado en este trabajo de investigación cumple con el objetivo general y específico. Respecto a la caracterización del entorno, las herramientas de planificación estratégica permitieron identificar de qué manera los factores políticos, legales y sociales condicionan de forma directa la continuidad de la operación minera en la provincia de Imbabura. De igual manera, se diseñó con éxito la estructura conceptual y operativa del SIG, dotando a la empresa de un mapa de trabajo con indicadores, metas y frecuencias de monitoreo que formalizan la mejora continua en la planta de tratamiento. Por último, el análisis de ciclo de vida cumplió el propósito de mapear con resultados estimados las corrientes de entrada y salida del proceso.

5.2.2. Contribución a la gestión empresarial

La propuesta proporciona indicadores, metas y planes de acción que fortalecen la toma de decisiones, el control operacional y el cumplimiento normativo de IAC. El modelo permite reducir costos operativos y riesgos ambientales mediante la recuperación de agua, la valorización del relave y la integración de los sistemas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001

A nivel corporativo, esta investigación dota a la Alta Dirección de la Compañía de un modelo de referencia preliminar basado en las estimaciones del ACV. Los planes de acción

derivados de la propuesta del SIG configuran una guía estratégica para proyectar retornos económicos indirectos, orientados a optimizar a futuro los costos vinculados al acarreo de agua fresca y a mitigar potenciales contingencias ambientales por lixiviados.

5.2.3. Contribución a nivel académico

Este trabajo de titulación aporta a nivel académico al integrar herramientas de sostenibilidad, sistemas integrados de gestión, indicadores ESG y ACV en el estudio de una PTR. Su contribución radica en ofrecer una base metodológica aplicable al análisis de procesos mineros desde una perspectiva ambiental, operativa y organizacional, fortaleciendo el conocimiento sobre la gestión sostenible de relaves en Ecuador. Además, el trabajo puede servir como referencia para futuras investigaciones relacionadas con minería responsable, recuperación de agua, mejora continua y evaluación del desempeño sostenible en el sector extractivo.

5.2.4. Contribución a nivel personal

El desarrollo del trabajo fortaleció competencias en gestión ambiental, análisis técnico, interpretación normativa y formulación de indicadores de desempeño. La investigación consolidó capacidades para diseñar soluciones sostenibles aplicables a problemas reales de la industria minera ecuatoriana.

5.2.5. Limitaciones a la investigación

Es de vital importancia reconocer que la investigación se enfrentó a restricciones informáticas y operativas concretas. La ausencia de registros históricos digitalizados y continuos sobre el consumo específico de energía y reactivos en fases previas limitó la profundidad del análisis cuantitativo en ciertos periodos del inventario del ACV. Por tal

motivo, fue imperativo recurrir al uso de literatura científica especializada y a supuestos técnicos validados por expertos para modelar matemáticamente los impactos de la PTR. En consecuencia, los resultados de este ciclo de vida deben ser interpretados como una aproximación diagnóstica detallada del sitio de estudio y se recomienda su recalibración con datos de campo directos antes de intentar extrapolar sus conclusiones a otros depósitos de relaves en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade Manzano, X. C., Dávila Velasteguí, A. M., Quiroz Miranda, H. J., & Satian Cuenca, C. P. (2025). Minería en Ecuador: Aprovechamiento, sostenibilidad y desafíos para el desarrollo. *Dominio de las Ciencias*, 11(3), 766–783.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2009). *Ley de Minería*. Registro Oficial No 517 Suplemento. https://asambleanacional.gob.ec/documentos/leyes_aprobadas/aprobacion_ley_mineria.pdf
- Ayala Lomas, R. (2025). Normativas mineras en Ecuador: Desafíos y oportunidades. *Mundo Minero*. <https://mundominero.com.ec/mineria-ecuador-desafios-normas-tecnicas/>
- Bamigboye, G. O., Bassey, D. E., Olukanni, D. O., Ngene, B. U., Adegoke, D., Odetoyan, A. O., Kareem, M. A., Enabulele, D. O., & Nworgu, A. T. (2021). Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124581>
- Banco Central del Ecuador. (2025). *Boletín del Sector Minero, Cuarto trimestre de 2025*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero042026.pdf>
- Bascetin, A., Tuylu, S., & Adiguzel, D. (2022). New Technologies in Mining Sustainable Production. Tailings Management and Mining Chemicals. *Engineering Journal of Satbayev University*, 144(6), 41–50. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i6.06>
- Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings

- Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>
- Cacciuttolo Vargas, C., & Pérez Campomanes, G. (2022). Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution. *Minerals*, 12(7), 889. <https://doi.org/10.3390/min12070889>
- Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (2022). *Plan de manejo de relaves* [Documento interno].
- Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (2024). *Plan de manejo ambiental* [Documento interno].
- Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (2025). *Organigrama 2025* [Documento interno].
- Compañía Agroindustrial El Corazón S.A. (2026). *Reporte de Producción PTR Primer Trimestre 2026* [Documento interno].
- El Oriente. (2026). *Mineros de la Amazonía anuncian marcha en Quito para exigir diálogo con el Gobierno*. El Oriente Ecuador. <https://www.eloriente.com/articulo/mineros-de-la-amazonia-anuncian-marcha-en-quito-para-exigir-dialogo-con-el-gobierno/55510>
- Endara Espinosa, M. de L. (2025). Los efectos de las actividades de la concesión minera El Corazón, dentro del ecosistema de la microcuenca del río Verde Chico. *Andares: Revista de Derechos Humanos y de la Naturaleza*, (7), 31–41. <https://doi.org/10.32719/29536782.2025.1.3>
- Escobar, D. C., Silva Pérez, E. J., Ortiz Campi, J. O., & Morejón Puente, B. M. (2025). Sostenibilidad y rentabilidad: Dilemas estratégicos en la gestión de empresas comerciales responsables. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e*

Innovación, 10(V CICACI).

<https://revistas.utb.edu.ec/index.php/magazine/article/view/4050>

Gairola, S., Khanduri, A., & Bhuvaneswari, V. (2025). Sustainable mining: Reducing waste and enhancing resource efficiency. *Discover Civil Engineering, 2*.

<https://doi.org/10.1007/s44290-025-00233-9>

Garcés, D., Jiménez-Oyola, S., Sánchez-Palencia, Y., Guzmán-Martínez, F., Villavicencio-Espinoza, R., Jaramillo-Zambrano, S., Rosado, V., Salgado-Almeida, B., & Marcillo-Guillén, J. (2025). Assessment of Tailings Contamination Potential in One of the Most Important Gold Mining Districts of Ecuador. *Minerals, 15*(8), 767.

<https://doi.org/10.3390/min15080767>

Garzón, G., & Landázuri, B. (2023). Estudio de las fuerzas competitivas de PORTER en empresas industriales: Una revisión de la literatura. *Revista electrónica TAMBARA, 21*(120), 1839–1857.

Hudson-Edwards, K. A., Kemp, D., Torres-Cruz, L. A., Macklin, M. G., Brewer, P. A., Owen, J. R., Franks, D. M., Marquis, E., & Thomas, C. J. (2024). Tailings storage facilities, failures and disaster risk. *Nature Reviews Earth and Environment, 5*(9).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43017-024-00576-4>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.

<https://www.iso.org/standard/37456.html>

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.

<https://www.iso.org/standard/38498.html>

Jácome Calderón, J. F., Burbano Morillo, D. S., & Núñez Romero, J. A. (2022). Desarrollo de adoquines a partir de los relaves de mina. *Perfiles*, 1(27).

<https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.151>

Li, S., Chen, J., Gao, W., Lyu, X., Liang, Z., & Zhou, W. (2024). Current situation and prospects for the clean utilization of gold tailings. *Waste Management*, 180, 149–161.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.033>

Lin, Y., Hu, X., Zi, F., Chen, S., Chen, Y., Yang, P., Zhang, Y., & Li, X. (2023). Accelerating gold extraction from refractory gold tailings via NH₄HF₂ pre-treatment. *Journal of Molecular Liquids*, 371, 121061. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121061>

Liu, Y., Li, G., Yeoh, J. K.-W., & Hou, J. (2025). Tailings management in sustainable mining: A production scheduling optimization framework. *Results in Engineering*, 28, 108365.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108365>

Makos, J. (2024). *What is PESTLE Analysis?* PESTLE Analysis.

<https://pestleanalysis.com/what-is-pestle-analysis/>

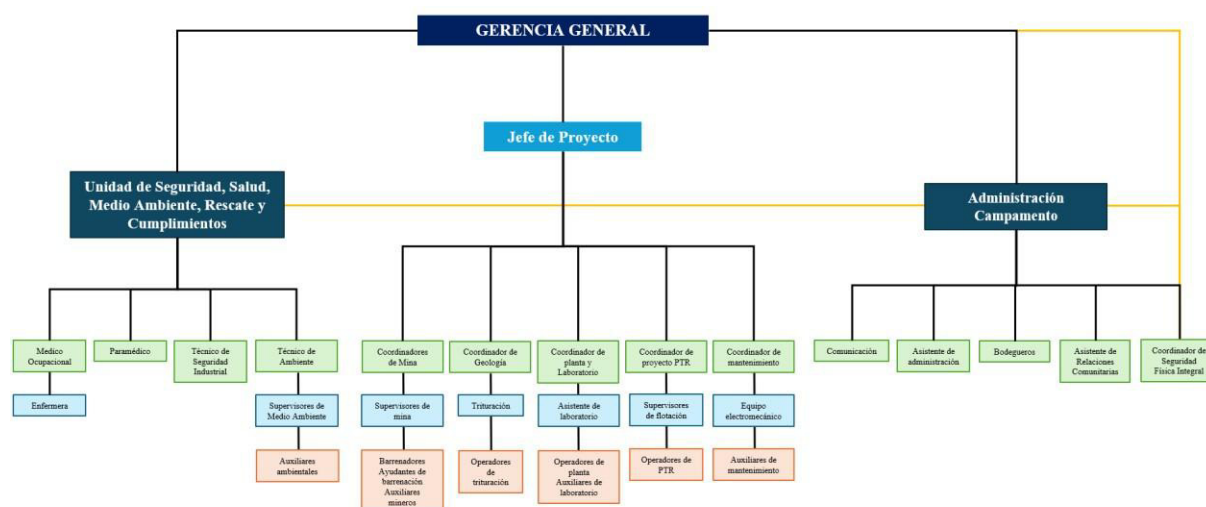
- Manaviparast, H. R., Miranda, T., Pereira, E., & Cristelo, N. (2024). A Comprehensive Review on Mine Tailings as a Raw Material in the Alkali Activation Process. *Applied Sciences*, 14(12), 5127. <https://doi.org/10.3390/app14125127>
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2026). *Gobierno de Daniel Noboa suspende actividades mineras en Napo, El Oro y Loja para reforzar acciones de protección ambiental y contra la extracción ilícita de minerales – Ministerio de Ambiente y Energía*.
<https://www.ambienteyenergia.gob.ec/gobierno-de-daniel-noboa-suspende-actividades-mineras-en-napo-el-oro-y-loja-para-reforzar-acciones-de-proteccion-ambiental-y-contra-la-extraccion-ilicita-de-minerales/>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero 2020-2030*. <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/Plan-Nacional-de-Desarrollo-del-Sector-Minero-2020-2030.pdf>
- Nagaralawala, A. (2025). PLC and SCADA Integration in Mining Industry. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 12.
https://www.researchgate.net/publication/392439005_PLC_and_SCADA_Integration_in_Mining_Industry
- Ormaza Andrade, J., Ochoa Crespo, J., Ramírez Valarezo, F., & Quevedo Vázquez, J. (2020). Responsabilidad social empresarial en el Ecuador: Abordaje desde la Agenda 2030. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVI(3).
<https://www.redalyc.org/journal/280/28063519009/html/>

- Peppas, A., Politi, C., & Giannakopoulos, A. (2026). Tailings Storage Facilities Smart Monitoring: Environmental and Risk Assessment Towards Digitalisation. *Eng*, 7(3), 109. <https://doi.org/10.3390/eng7030109>
- Planetgold. (2025). *Global Project Assessment PHASE 1 (2019-2025)*.
https://www.planetgold.org/sites/default/files/PGold_GlobalRpt_F_20JUN.pdf
- Soria-Maldonado, F. E., & Cáceres-Romero, H. A. (2022). La minería ilegal y sus efectos en la vulneración de los derechos de la naturaleza. *Polo del Conocimiento*, 7(4), 1650–1664.
- Tessema, M. T., Hahn, H. J., Buck, S., Burke, M., Coppola, T., Kasprzak, K., Kral, W., & Petropoulos, G. (2024). Sustainable Business: Practices, Trends, Benefits, Challenges, and Innovative Strategies. *Journal of Sustainable Development*, 17(2), p73.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025). *TOOL33: Default values for common parameters*. Clean Development Mechanism.
<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-33-v3.pdf>
- Van Teijlingen, K. (2019). *Los depósitos de relaves en Ecuador y sus riesgos socio-ambientales*. <https://geografiacriticaecuador.org/los-depositos-de-relaves-en-ecuador-y-sus-riesgos-socio-ambientales/>
- Vásquez Barajas, E. F., Bastos Osorio, L. M., & Mogrovejo Andrade, J. M. (2020). Metodología para la evaluación interna de una cadena de valor. *CLIO América*, 14(27), 401–408.

- Villagómez Moncayo, B. E., Calle Idrovo, R. F., & Ramírez Iza, D. C. (2023). *Guía de Jurisprudencia Constitucional. Derechos de la naturaleza*. Corte Constitucional del Ecuador. <https://isbnecuador.com/catalogo.php?mode=detalle&nt=87481>
- Wu, L., Chen, X., Li, H., & Pan, Y. (2023). Mining waste utilization: Case studies and good practices. En *Managing Mining and Minerals Processing Wastes* (pp. 251–269). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91283-9.00012-2>

ANEXOS

Anexo 1 Organigrama de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.



Fuente: AIC (2025).

Anexo 2 Análisis PESTEL de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.

Factores clave del entorno		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Político	Estabilidad política y gobernabilidad del país			X		
	Lineamientos sobre sostenibilidad y transición económica				X	
	Políticas sobre gestión del agua		X			
	Programas de formalización y control de minería			X		
	Relaciones internacionales y compromisos ambientales				X	
Económico	Crisis general producida por el COVID-19		X			
	Crisis económica: descenso de la actividad			X		
	Crisis de consumo: disminución de las rentas				X	
	Crisis financiera: disminución del crédito bancario				X	
	Tipos de interés			X		
	Deuda de las administraciones autónomas			X		
	Supresión de inversiones en el sector					X
	Ayudas públicas al desarrollo				X	
	Crédito bancario			X		
	Percepción Social			X		
Social	Expectativas y demandas sociales respecto a la RSE				X	

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

	Presión por Recursos Hídricos	X
	Impacto en la calidad de vida y salud pública	X
	Empleo y desarrollo social	X
	Economía Circular y Valorización	X
	Participación comunitaria y consulta	X
Tecnológico	Grado de actualización tecnológica de equipos para la PTR	X
	Capacidad del sistema para recircular agua del relave	X
	Uso de sensores, control y monitoreo en tiempo real	X
	Capacidad de deshidratación (filtros prensa)	X
	Mejoras continuas para reducir consumo de agua fresca	X
	Uso de tecnologías que reduzcan consumo energético	X
	Nivel de mantenimiento preventivo y predictivo	X
	Uso de SCADA, modelamiento predictivo, Big Data	X
	Facilidad para incorporar nuevas tecnologías	X
	Riesgo de contaminación de suelo y agua por relaves	X
Ecológico	Estabilidad física del depósito de relaves filtrados	X
	Recuperación y eficiencia del uso del agua	X
	Generación de emisiones de polvo y calidad del aire	X
	Presión ecológica sobre recursos hídricos	X
	Cambio climático y eventos extremos	X
	Rehabilitación ambiental y cierre progresivo	X
	Conservación de biodiversidad y ecosistemas	X
	Exigencia normativa y de estándares internacionales	X
Legal	Obligaciones establecidas en autorizaciones administrativas	X
	Control y seguimiento por parte de autoridades	X
	Cambios en la normativa aplicable	X
	Sanciones por incumplimientos normativos	X
	Responsabilidad por daños penales, civiles y ambientales	X

Fuente: Autores, 2026.

Anexo 3 Business Model Canvas para la evaluación del desempeño sostenible del sistema de relaves filtrados

KEY PARTNERSHIPS	KEY ACTIVITIES	VALUE PROPOSITION	CUSTOMER RELATIONSHIPS	CUSTOMER SEGMENTS
• MAE • ARCOM • Proveedores de equipos e insumos para la PTR • Laboratorios acreditados • Consultoras especializadas • Comunidades locales • GADs	• Levantamiento de información operativa • Revisión de datos técnicos • Definición de indicadores técnicos • Elaboración de balances de materia y energía • Identificación de brechas del proceso • Elaboración de informe técnico	• Modelo estructurado para evaluar el desempeño sostenible del sistema de relaves filtrados. • <i>Integra:</i> • Evaluación técnico-operativa del proceso • Análisis de eficiencia hídrica • Enfoque de análisis de ciclo de vida • <i>Beneficios:</i> • Reducción del consumo de agua • Mejora del cumplimiento normativo y desempeño ambiental • Recuperación potencial de oro en relaves • Apoyo a la toma de decisiones estratégicas	• Relación técnica y consultiva basada en: • Acompañamiento continuo • Análisis colaborativo • Validación de indicadores • Seguimiento periódico a resultados	• Empresas del sector minero metálico (pequeña y mediana minería) que: • Generan relaves • Buscan eficiencia hídrica • Necesitan cumplir con la normativa ambiental • Necesitan mejorar su desempeño ambiental • Requieren evaluación de desempeño ambiental
COST STRUCTURE		REVENUE STREAMS		
• Horas de especialistas ambientales • Análisis de datos técnicos • Elaboración de informes		• <i>Beneficios económicos indirectos:</i> • Optimización operativa • Reducción del consumo de agua • Disminución de sanciones ambientales • Reducción de pasivos ambientales • <i>Potencial futuro:</i> • Consultorias en sostenibilidad minera • Auditorías ambientales especializadas • Asesoría en eficiencia hídrica		

Fuente: Autores, 2026.

Anexo 4 *Análisis FODA*



Fuente: Autores, 2026.

Anexo 5 Matriz estratégica derivada del análisis FODA

Tipo de estrategia	Enfoque FODA	Estrategia / acción	Descripción técnica
Línea de éxito: estrategias proactivas	Fortalezas + Oportunidades	Estrategia de potenciar tecnologías	Capitalizar la capacidad instalada de tratamiento para posicionar a AIC como un referente técnico en la gestión sostenible de relaves dentro de la pequeña minería. Esta estrategia permite aprovechar la capacidad tecnológica existente y alinearla con tendencias globales de sostenibilidad, compromisos ambientales y lineamientos de transición económica.
		Estrategia de optimización para el acceso a finanzas sostenibles	Potenciar el sistema de recuperación y recirculación de agua como un activo estratégico para acceder a ayudas públicas, incentivos o líneas de financiamiento vinculadas al desempeño hídrico, la reducción del consumo de agua y la menor presión sobre ecosistemas locales.
Línea de reacción: acciones de gran impacto	Oportunidades + Debilidades	Acción de cierre de brechas sostenibles	Implementar un sistema de gestión orientado a estándares internacionales de manejo de relaves, con miras a futuras certificaciones ambientales. Esta acción permite reducir brechas frente a operaciones mineras más consolidadas y responder a las exigencias de transparencia, cumplimiento y control por parte de autoridades, comunidades y otros grupos de interés.
		Acción de monitoreo de desempeño crítico	Integrar herramientas de analítica de datos para el monitoreo de procesos de espesamiento y filtrado. Esta acción permite superar limitaciones tecnológicas, fortalecer el control operacional y facilitar la toma de decisiones basada en evidencia técnica para la mejora continua del sistema productivo.
		Acción de estructuración del modelo de evaluación de desempeño sostenible	Formalizar un modelo de evaluación bajo enfoque de ciclo de vida, transformando la ausencia de indicadores estructurados en un sistema de control, seguimiento y gobernanza del desempeño sostenible de la PTR. Esta acción permite vincular calidad ambiental, eficiencia operativa y cumplimiento de objetivos de mejora.
Línea de adaptación: estrategias de resiliencia	Amenazas + Fortalezas	Estrategia de gestión colaborativa y alianzas en la cadena de suministro	Establecer acuerdos de nivel de servicio y soporte técnico preventivo con proveedores especializados en filtración, mantenimiento y monitoreo ambiental. Esta estrategia busca asegurar la continuidad operativa, reducir la dependencia tecnológica y prevenir fallas que puedan afectar la estabilidad física, ambiental y operativa del sistema.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Tipo de estrategia	Enfoque FODA	Estrategia / acción	Descripción técnica
		Estrategia de posicionamiento y reputación	Utilizar los procedimientos de control operativo de la PTR como mecanismo para reducir la exposición a sanciones administrativas, responsabilidades legales y riesgos reputacionales. Esta estrategia fortalece la competitividad de la organización al evidenciar una gestión técnica y ambientalmente responsable.
		Estrategia de resiliencia social y reducción de la huella hídrica	Maximizar la eficiencia del sistema de recirculación de agua para disminuir la presión sobre fuentes hídricas compartidas con la comunidad. Esta estrategia contribuye a prevenir conflictos socioambientales, fortalecer la licencia social para operar y mejorar el desempeño hídrico de la PTR.

Fuente: Autores, 2026.

Anexo 6 Requisitos legales aplicables

Normativa	Artículo	Requisito legal
Cuerpo legal		
Ley Orgánica reformatoria a la Ley de Minería (2013)	Art. 26.- Actos administrativos previos.- Para ejecutar las actividades mineras se requieren, de manera obligatoria, actos administrativos motivados y favorables otorgados previamente por las siguientes instituciones dentro del ámbito de sus respectivas competencias:	La empresa cuenta con Licencia Ambiental de Explotación N.º 1695 y Licencia Ambiental de Beneficio MAATE-SCA-2024-0012-R Derecho de aprovechamiento de agua N.º I-05-742 otorgado por la Secretaría Nacional del Agua
Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)	Art. 625.- Obtención del Registro de Generador.- Los proyectos, obras o actividades nuevas y en funcionamiento, que se encuentren en proceso de regularización ambiental para la obtención de una licencia ambiental; y que generen o proyecten generar residuos o desechos peligrosos y/o especiales deberán obtener el registro de generador de residuos o desechos peligrosos y/o especiales de forma paralela con la licencia ambiental. [...]	Registro de generador SUIA-11-2022-MAATE-OTIB-DZDI-00041
Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)	Art. 527.- Registro de Sustancias Químicas.- El Registro de Sustancias Químicas es la autorización administrativa ambiental que habilita al operador a ejecutar las fases de gestión de las sustancias químicas y permite a la Autoridad Ambiental Nacional regular y controlar la trazabilidad de las mismas; dicho Registro se obtendrá a través del Sistema Único de Información Ambiental.	Certificado de compra y uso de cianuro N.º 10-0165J-L
Ley Orgánica reformatoria a la Ley de Minería (2013)	Art. 78.- [...] Los titulares de derechos mineros están obligados a presentar, al año de haberse emitido la Licencia Ambiental, una auditoría ambiental de cumplimiento que permita a la entidad de control monitorear, vigilar y verificar el cumplimiento de los planes de manejo y normativa ambientales aplicable. Posterior a esto, las Auditorías Ambientales de Cumplimiento serán presentadas cada dos años, sin perjuicio de ello, las garantías ambientales deberán mantenerse vigentes cada año.	La empresa presenta auditorías ambientales de cumplimiento conforme a la periodicidad establecida

Fuente: Autores, 2026.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Anexo 7 Principales indicadores sociales, legales, económicos y ambientales de la Compañía Agroindustrial El Corazón S.A.

Dimensión	Indicador	2025	Unidad	Frecuencia	Medio de verificación
Social	Reuniones comunitarias ejecutadas	12	Nº/trimestre	Trimestral	Actas de reuniones
Social	Quejas comunitarias atendidas	5	#	Mensual	Registro de quejas
Social	Contratación local	10	#/año	Semestral	Contratos laborales
Social	Horas de capacitación	500	# /año	Anual	Registros de capacitación
Social	Inversión social	250000	USD/año	Anual	Reportes financieros
Legal	Cumplimiento legal aplicable	50	Certificados	Anual	Matriz legal
Legal	Informes regulatorios	10	Informe	Anual	Acuses de entrega
Legal	Permisos vigentes	20	Permiso	Mensual	Licencias y permisos
Legal	Sanciones recibidas	0	Nº	Anual	Resoluciones oficiales
Ambiental	Cumplimiento del PMA	100	%	Trimestral	Informes PMA
Ambiental	Monitoreos ejecutados	8	#	Semestral	Informes monitoreo
Ambiental	Resultados conformes	8	%	Semestral	Reportes laboratorio
Ambiental	Agua recirculada	4320	m3	Anual	Registros de caudal
Ambiental	Relaves filtrados gestionados	1800	t/mes	Mensual	Registros planta
Ambiental	Derrames ambientales	0	Nº	Mensual	Reportes incidentes
Económico	Inversión ambiental	60000	USD/año	Anual	Estados financieros
Económico	Inversión social	250000	USD/año	Anual	Estados financieros
Económico	Ahorro por recirculación	5000	USD/año	Anual	Análisis costos
Económico	Costo de gestión de relaves	2050	USD/t	Mensual	Costos operativos
Económico	Beneficio tributario aplicado	200000	USD/año	Anual	Declaraciones tributarias

Fuente: Autores, 2026.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Anexo 8 Matriz de aspectos e impactos ambientales reales de la Planta de Tratamiento de Relaves

Actividad	Aspecto ambiental	Impacto real	Tipo de impacto
Dragado de arenas	Generación de ruido por el uso de sistemas de bombeo y conducción	Alteración de los niveles de presión sonora, con afectación a la fauna local y a la salud humana	Negativo/Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Consumo de combustibles fósiles (fuente de energía)	Agotamiento de recursos naturales no renovables	Negativo/ Directo/ Irreversible/Temporal/Local
	Emisión de gases de combustión por operación equipos de bombeo y conducción	Deterioro de la calidad del aire por incremento de contaminantes atmosféricos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/ Local
	Requerimiento de personal para la operación del sistema de bombeo y conducción	Generación de empleo directo	Positivo/Directo/Reversible/ Temporal/Local
Acondicionamiento (adición de reactivos)	Generación de residuos peligrosos: envases vacíos de sustancias químicas	Contaminación del suelo y agua por manejo inadecuado de residuos peligrosos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Generación de ruido por el uso de equipos de agitación	Alteración de los niveles de presión sonora, con afectación a la fauna local y a la salud humana	Negativo/Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Consumo de combustibles fósiles (para generación de energía eléctrica)	Agotamiento de recursos naturales no renovables	Negativo/ Directo/ Irreversible/Temporal/Local
	Emisión de gases de combustión por operación del generador eléctrico	Deterioro de la calidad del aire por incremento de contaminantes atmosféricos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Exposición ocupacional a sustancias químicas	Afectación a la salud de los trabajadores por contacto, inhalación o manipulación de sustancias químicas	Negativo/Directo/ Reversible/Temporal/Local
Flotación	Generación de ruido por el uso de equipos de flotación	Alteración de los niveles de presión sonora, con afectación a la fauna local y a la salud humana	Negativo/Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Consumo de combustibles fósiles (para generación de energía eléctrica)	Agotamiento de recursos naturales no renovables	Negativo/Directo/ Irreversible/Temporal/Local
	Emisión de gases de combustión por operación del generador eléctrico	Deterioro de la calidad del aire por incremento de contaminantes atmosféricos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/ Local

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Actividad	Aspecto ambiental	Impacto real	Tipo de impacto
	Recuperación de minerales presentes en los relaves mediante proceso de flotación	Optimización del aprovechamiento de recursos minerales	Positivo/ Directo/ Reversible/ Temporal/Local
	Requerimiento de personal para la operación de los equipos de flotación	Generación de empleo directo	Positivo/Directo/Reversible/ Temporal/Local
Espesamiento de relaves	Separación y recirculación de agua	Reducción del consumo de agua fresca en el proceso	Positivo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Consumo de combustibles fósiles (para generación de energía eléctrica)	Agotamiento de recursos naturales no renovables	Negativo/Directo/ Irreversible/Temporal/Local
	Emisión de gases de combustión por operación del generador eléctrico	Deterioro de la calidad del aire por incremento de contaminantes atmosféricos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
Filtrado de relaves	Deshidratación del relave	Disminución del potencial de generación de lixiviados	Positivo/ Directo/ Reversible/ Permanente/Local
	Separación y recirculación de agua	Reducción del consumo de agua fresca en el proceso	Positivo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Consumo de combustibles fósiles (para generación de energía eléctrica)	Agotamiento de recursos naturales no renovables	Negativo/Directo/ Irreversible/Temporal/Local
	Emisión de gases de combustión por operación del generador eléctrico	Deterioro de la calidad del aire por incremento de contaminantes atmosféricos	Negativo/ Directo/ Reversible/Temporal/Local
Disposición de relaves filtrados	Disposición controlada de relave filtrado en escombrera	Mejora de la estabilidad geotécnica del sistema de almacenamiento	Positivo/ Directo/Reversible/ Permanente/Loca l
	Disposición controlada de relaves filtrados con baja humedad	Reducción del riesgo de infiltración y generación de lixiviados	Positivo/Directo/Reversible/ Permanente/Local

Fuente: Autores, 2026.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Anexo 9 Matriz de aspectos e impactos ambientales potenciales de la Planta de Tratamiento de Relaves

Actividad	Aspecto ambiental	Impacto potencial	Tipo de impacto
Dragado de arenas	Derrames de pulpa de relaves por fallas en tuberías o sistemas de bombeo	Contaminación del suelo y agua por liberación accidental de material	Negativo/Directo/ Reversible/ Temporal/Local
Acondicionamiento (adición de reactivos)	Derrame accidental de reactivos (sustancias químicas)	Contaminación de suelo y agua	Negativo/Directo/ Reversible/Temporal/Local
	Derrame accidental de reactivos (sustancias químicas)	Exposición accidental del personal a sustancias químicas	Negativo/Directo/Reversible/ Temporal/Local
Flotación	Generación de relaves con mayor contenido residual aprovechable por falla operativa en celdas o circuito	Menor aprovechamiento del material y afectación al desempeño del sistema de tratamiento	Negativo/Directo/ Reversible/ Temporal/Local
Espequeamiento de relaves	Generación de relaves con mayor contenido de humedad por falla en separación sólido-líquido	Menor recuperación de agua y afectación a la eficiencia de recirculación del proceso	Negativo/Directo/ Reversible/ Temporal/Local
Filtrado de relaves	Generación de relaves con mayor contenido de humedad por falla del sistema de filtración	Disminución de la estabilidad física del material dispuesto y aumento del potencial de generación de lixiviados	Negativo/Directo/ Reversible/ Temporal/Local
	Derrame o manejo inadecuado del agua recuperada del proceso	Alteración de la calidad del suelo o agua	Negativo/Directo/ Reversible/ Temporal/Local
Disposición de relaves filtrados	Compactación inadecuada del material	Disminución de la estabilidad física del depósito	Negativo/Directo/Reversible/ Temporal/Local
	Deficiencia en drenaje o escorrentía	Potencial generación de infiltraciones o erosión	Negativo/Directo/Reversible/ Temporal/Local

Fuente: Autores, 2026.

Anexo 10 *Comparación entre impactos identificados en la Planta de Tratamiento de Relaves y las medidas del Plan de Manejo Ambiental vigente*

Actividad	Aspecto e impacto identificado	Programa del PMA	Medida existente en el PMA	Observación
Dragado de arenas	Ruido por bombeo y conducción / alteración de niveles de presión sonora	Prevención y mitigación Monitoreo y seguimiento	Control de ruido, monitoreo de ruido, mantenimiento de equipos y uso de EPP auditivo	Cubierto, aplicar específicamente a bombas y sistemas de conducción de la PTR
	Derrame de pulpa por fallas en tuberías o bombeo / contaminación de suelo y agua	Prevención y mitigación Contingencias Monitoreo	Mantenimiento de tuberías, bombas, control de aguas industriales y registros de inspección	Parcial: Incorporar protocolo específico para derrames de pulpa de relaves
Acondicionamiento	Generación de envases vacíos de sustancias químicas / contaminación de suelo y agua	Manejo de desechos / Prevención y mitigación	Manejo de desechos peligrosos, almacenamiento temporal, registros y disposición autorizada	Cubierto: Verificar que incluya envases de reactivos usados en PTR
	Derrame accidental de reactivos / contaminación de suelo y agua	Prevención y mitigación / Contingencias	Manejo de productos químicos, MSDS, almacenamiento, carga y descarga, EPP e inspecciones	Cubierto: Reforzar control de kits antiderrame y registros de inspección
	Exposición ocupacional a sustancias químicas / afectación a trabajadores	Seguridad industrial y salud ocupacional / Capacitación	Dotación de EPP, capacitación, manejo seguro de químicos y hojas de seguridad	Cubierto: Enfocar capacitación en reactivos de flotación y cianuración
Flotación	Baja recuperación de minerales por falla operativa / menor aprovechamiento del material	Prevención y mitigación Monitoreo y seguimiento	Control operativo del proceso, registros y monitoreos	Parcial: Incluir indicador de eficiencia de recuperación de minerales
Espesamiento	Mayor humedad por falla en separación sólido-líquido / menor recuperación de agua	Prevención y mitigación Monitoreo y seguimiento	Recirculación de agua, mantenimiento de bombas, control de aguas recirculadas y tratadas	Parcial: Incorporar control de eficiencia de separación sólido-líquido

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Actividad	Aspecto e impacto identificado	Programa del PMA	Medida existente en el PMA	Observación
Filtrado de relaves	Deshidratación del relave / disminución de lixiviados	Prevención y mitigación Cierre y abandono	Reacondicionamiento de relaveras, manejo de aguas y control de suelo	Parcial: Definir criterio de humedad máxima del relave filtrado
	Falla del sistema de filtración / mayor humedad y potencial de lixiviados	Prevención y mitigación Monitoreo y seguimiento	Mantenimiento de equipos, manejo de aguas industriales y monitoreo de suelo/agua	Parcial: Incluir inspección específica de filtros prensa
Disposición de relaves filtrados	Disposición controlada en escombrera / mejora de estabilidad geotécnica	Rehabilitación Cierre y abandono Prevención y mitigación	Readecuación de relaveras, uso de geomembrana, manejo de suelo removido y revegetación	Parcial: Complementar con control de compactación, drenaje y estabilidad física
	Compactación inadecuada o deficiencia de drenaje / infiltración, erosión o inestabilidad	Prevención y mitigación Monitoreo Cierre y abandono	Inspecciones, monitoreo de suelo, control de aguas y rehabilitación	Parcial: Incluir registros técnicos de compactación, drenaje y control de escorrentía

Fuente: Autores, 2026.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Anexo 11 Resultados estimados de la categoría de impacto ambiental

Metodología	Resultado
Se calculó el potencial de acidificación (AP) del sulfato de cobre (CuSO_4) utilizando la metodología de ACV. Se determinó la masa molar del compuesto (159,5 g/mol), el número potencial de protones liberados (2H^+) y se aplicó la ecuación de potencial de acidificación. Posteriormente, el resultado se ajustó a la cantidad utilizada (0,86 kg de CuSO_4) y se convirtió a unidades equivalentes de SO_2 .	El uso de 0,86 kg de sulfato de cobre (CuSO_4) genera un potencial de acidificación equivalente a 0,344 kg SO_2 eq.
Se estimó la caracterización de toxicidad de ecosistemas acuáticos utilizando el factor ATP para cobre en agua (5,2 kg Zn eq/kg) y la fracción de cobre presente en el sulfato de cobre.	Se obtuvo la estimación de ecotoxicidad acuática a partir de la contribución del cobre contenido en el sulfato de cobre.
Se calculó el agotamiento de recursos considerando la cantidad de CuSO_4 utilizada (0,86 kg), la fracción de cobre presente (0,398) y el factor de agotamiento del cobre (0,00194 kg Sb eq/kg Cu).	El agotamiento de recursos asociado al uso de sulfato de cobre fue de 0,000663 kg Sb eq.
Para el cálculo del calentamiento global se emplearon factores de emisión asociados al consumo de energía, cal y sulfato de cobre, de acuerdo con fuentes técnicas de referencia. Se empleó el método de IPCC 2021 (GWP100) y el factor de emisión del sulfato de cobre obtenido de la base de datos Ecoinvent v3.11, categoría "Cambio climático: total (excluyendo CO_2 biogénico)"	Se estimó la contribución al calentamiento global a partir de los consumos registrados de energía, cal y sulfato de cobre. Factor de emisión: 3,74 kg CO_2 -eq/kg CuSO_4

Fuente: Autores, 2026.

