

Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo

Environmental impact assessment of mining activities in the micro-basin of the Siporo community

LOPEZ – Vladimir^{1*}

¹ *Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental*

Recibido septiembre,05, 2025; Aceptado octubre, 30, 2025

Resumen

Este trabajo evaluó el impacto ambiental generado por las actividades mineras desarrolladas por cooperativas que operan en la microcuenca de la comunidad de Siporo, ubicada en el municipio de Betanzos, departamento de Potosí, Bolivia. La investigación se enfocó en la etapa de funcionamiento de la actividad minera, considerando los componentes ambientales agua, ecológico y socioeconómico. Para la evaluación se aplicó el método de Battelle–Columbus Modificado, adaptado a la normativa ambiental boliviana vigente. Se elaboró una línea base ambiental mediante trabajo de campo, análisis de laboratorio de muestras de agua, encuestas a la población y revisión documental. Los resultados evidenciaron alteraciones significativas en la calidad del agua, presencia de descargas líquidas con parámetros fuera de los límites permisibles, afectaciones ecológicas relacionadas con pérdida de cobertura vegetal y procesos erosivos, así como impactos socioeconómicos vinculados a salud y dinámica productiva. Finalmente, se cuantificó el impacto ambiental neto y se propusieron medidas de mitigación orientadas a reducir los efectos negativos más críticos, promoviendo una gestión ambiental más sostenible en la microcuenca.

Palabras Clave

Battelle-Columbus, minería, contaminación hídrica, Siporo.

Abstract

This study assessed the environmental impact of mining activities carried out by cooperatives operating in the micro-watershed of the community of Siporo, located in the municipality of Betanzos, department of Potosí, Bolivia. The research focused on the operational phase of mining activities, considering the environmental components of water, ecology, and socioeconomic factors. The Modified Battelle–Columbus method, adapted to current Bolivian environmental regulations, was applied for the assessment. An environmental baseline was established through fieldwork, laboratory analysis of water samples, surveys of the population, and a literature review. The results revealed significant alterations in water quality, the presence of liquid discharges with parameters exceeding permissible limits, ecological impacts related to loss of vegetation cover and erosion processes, as well as socioeconomic impacts linked to health and productive dynamics. Finally, the net environmental impact was quantified, and mitigation measures were proposed to reduce the most critical negative effects, promoting more sustainable environmental management in the micro-watershed.

Keywords

Battelle-Columbus, mining, water pollution, Siporo.

Citación: Lopez V.(2025). Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 157-164

Introducción

La minería, siendo una actividad económica fundamental en Bolivia, conlleva impactos ambientales significativos que afectan la calidad del agua y los ecosistemas circundantes. En la microcuenca de la Comunidad de Siporo, las actividades mineras han generado preocupaciones sobre la contaminación del agua y la salud ambiental, especialmente debido a la descarga de residuos y efluentes. (Mudd M, 2010)

En la microcuenca de la comunidad de Siporo, ubicada en el municipio de Betanzos del departamento de Potosí, operan cooperativas mineras que desarrollan actividades extractivas en etapa de funcionamiento. Estas actividades incluyen la extracción de minerales y la descarga de efluentes hacia cuerpos de agua cercanos. La proximidad de estas operaciones al cauce del río Siporo ha generado preocupación en la población local respecto a la posible contaminación hídrica y la degradación del entorno natural

Este estudio aborda la problemática mediante la evaluación de impactos ambientales aplicando el método de Battelle-Columbus Modificado. Este método permite utilizar indicadores de impacto ambiental para determinar los porcentajes de afectación sobre el medio ambiente y expresar el valor del impacto ambiental neto. La investigación se justifica en la necesidad urgente de cuantificar los daños en una zona estratégica para el abastecimiento de agua y la agricultura, donde la falta de regulaciones estrictas pone en riesgo la salud de las comunidades locales. (Gerard, 2007)

La microcuenca constituye un sistema ambiental complejo donde interactúan componentes físicos, biológicos y socioeconómicos. El agua del río es utilizada por la comunidad para actividades domésticas, agrícolas y pecuarias, lo que incrementa la vulnerabilidad ante cualquier alteración en su calidad.

Asimismo, la cobertura vegetal y la estabilidad del suelo cumplen un rol fundamental en la regulación hídrica y la prevención de procesos erosivos.

El estudio se fundamenta en la legislación ambiental boliviana, incluyendo la Ley del Medio Ambiente N° 1333 y el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. El objetivo principal es evaluar el impacto ambiental en la etapa de funcionamiento de las mineras para formular medidas de mitigación y control efectivas.

Materiales y métodos

Área de estudio.

El estudio se realizó en la microcuenca de la comunidad de Siporo, situada en el municipio de Betanzos, Departamento de Potosí, a una altitud media de 3.200 m.s.n.m. El área de influencia directa se determinó en base a la extensión de los impactos sobre la calidad del agua del río Siporo y las zonas de operación de las cooperativas mineras. Se delimitó el área de influencia directa e indirecta de las actividades mineras considerando la ubicación de las descargas líquidas, el recorrido del cauce y la proximidad a zonas habitadas.

Población y muestra

La población de interés estuvo conformada por los habitantes de la comunidad de Siporo, quienes dependen de los recursos naturales de la microcuenca. Se seleccionó una muestra representativa mediante un muestreo aleatorio simple, con el fin de recopilar información sobre la percepción de la contaminación minera y sus efectos en la salud y actividades económicas.

Metodología

La investigación combinó métodos teóricos y empíricos:

Métodos Teóricos.

- Análisis documental de normativa ambiental vigente, literatura científica y estudios previos relacionados con minería y calidad del agua.
- Método deductivo, partiendo de principios generales sobre contaminación minera para analizar la situación específica de la microcuenca.
- Método inductivo, basado en observaciones y datos de campo para establecer conclusiones generales. (Sánchez Flores, 2018)

Métodos Empíricos

- Observación directa en campo para identificar fuentes de impacto.
- Toma de muestras de agua en puntos estratégicos aguas arriba y aguas abajo de las descargas.
- Análisis de laboratorio para determinar parámetros físico-químicos como pH, aceites y grasas, y otros indicadores relevantes.
- Aplicación de encuestas a la población local.
- Georreferenciación de puntos de muestreo mediante GPS. (Rodrigo Herrera, Pacheco Mollinedo, Orihuela, Piñeiros, & Cobo, 2018)

Método de Evaluación

Se utilizó el método de Battelle-Columbus Modificado, seleccionando 3 categorías (Agua, Ecología y Socioeconómico), 11 componentes y 29 parámetros ambientales. Para la valoración de la importancia del impacto, se utilizó la caracterización según la Norma Española y la siguiente ecuación: (Gerard, 2007)

$$IM = \pm (3I + 2EX + \sum_{i=1}^{11} Ci)$$

$$IM = \pm (3 * I + 2 * EX + MO + PE + RV + MC + EF + SI + AG + PR)$$

En donde IM es la Importancia del Impacto, I es la intensidad, EX la extensión, y los demás términos corresponden a momento, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, efecto, sinergia, acumulación y periodicidad. (Coneza Fdez, 2011)

Para el cálculo del Impacto Neto y el porcentaje de afectación según el método Battelle, se emplearon las Unidades de Impacto Ambiental (UIA) y el Índice Ponderal (IP), utilizando la siguiente relación:

$$\% \text{ del Impacto Neto} = \left(1 - \frac{UIA_{total}}{IP_{total}}\right) * 100$$

Línea Base Ambiental

La línea base ambiental se estructuró en tres componentes:

Medio físico (calidad del agua): Evaluación de calidad del agua del río Siporo mediante análisis de laboratorio y comparación con los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Medio ecológico (cobertura vegetal y alteración del entorno): Identificación de cobertura vegetal, presencia de procesos erosivos y alteraciones en el paisaje.

Medio socioeconómico (percepción de la población): Caracterización de la población, actividades productivas y percepción sobre los impactos mineros.

Se realizaron visitas de campo para identificar puntos de descarga, áreas de influencia directa e indirecta y condiciones generales del entorno. (Bolivia Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)

Recolección de datos

Se establecieron dos puntos de muestreo de agua: uno aguas arriba y otras aguas abajo de las operaciones mineras. Los análisis físico-químicos se contrastaron con los Límites Máximos Permisibles (LMP) del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Bolivia, 1995). Además, se aplicaron encuestas a la población para evaluar la percepción socioeconómica y de salud.

Aplicación del Metodo Battelle – Columbus Modificado.

El método Battelle–Columbus consiste en la evaluación de un conjunto de parámetros ambientales agrupados en categorías, a los cuales se les asigna un peso relativo y un valor de calidad ambiental. En esta investigación, el método fue adaptado considerando tres componentes principales: agua, ecológico y socioeconómico.

Se establecieron matrices de identificación de impactos, donde se relacionaron actividades mineras con factores ambientales afectados. Posteriormente, se realizó la caracterización de los impactos según criterios como intensidad, extensión, duración, reversibilidad e importancia. El Índice de Calidad Ambiental (ICA) fue calculado para cada componente, permitiendo cuantificar el impacto ambiental neto. Finalmente, se determinó el porcentaje de afectación y se jerarquizaron los impactos en función de su significancia.

El método se adaptó considerando:

- Identificación de impactos
- Caracterización según la Norma Española (magnitud, extensión, duración, reversibilidad, etc.)
- Asignación de importancia del impacto (IM)
- Conversión de valores a unidades conmensurables (Índice de Calidad Ambiental – ICA)

La evaluación permitió determinar el impacto ambiental neto y clasificar los impactos como irrelevantes, moderados, severos o críticos. (Gerard, 2007)

Resultados

Análisis de calidad del agua: El monitoreo realizado en época húmeda mostró que, aunque hubo dilución por lluvias, ciertos parámetros excedieron la norma.

Tabla 1. Resultados de Laboratorio seleccionados comparados con LMP.

Parámetros	Unidades	Límite Máximo Permisible (RMCH)	Punto 1 (Aguas Arriba)	Punto 2 (Aguas Abajo)	Estado
pH	Esc. pH	6.9 - 9.0	8.196	7.746	Alcalino
Aceites y Grasas	mg/l	0.3	0.3	0.4	Fuera de norma
Cadmio	mg/l	0.15	0.055	0.055	Dentro de norma
Plomo	mg/l	0.05	<0.01	<0.01	Dentro de norma

Se observa que el pH es alcalino en ambos puntos y la presencia de aceites y grasas supera el límite específico de 0.3 mg/l en el punto aguas abajo, confirmando descargas de efluentes.

Estos resultados confirman la existencia de descargas líquidas provenientes de las actividades mineras hacia el cauce del río Siporo. La alteración del pH puede afectar la biota acuática, alterar procesos biogeoquímicos y limitar el uso del agua para consumo humano y riego. La presencia de aceites y grasas genera una película superficial que reduce el intercambio de oxígeno, afectando organismos acuáticos.

La comparación de parámetros con los límites permisibles permitió identificar impactos negativos significativos en el componente agua.

Evaluación Battelle-Columbus: La aplicación del método permitió cuantificar la afectación por categorías.

Tabla 2. Resumen de la Evaluación de Impacto Ambiental.

Categoría Ambiental	Índice Ponderal (IP)	UIA Calculada (Con Proyecto)	% Afectación
Ecología	195	97.5	50.00%
Contaminación (Agua)	340	157.5	53.67%
Socioeconómico	465	164.25	64.68%
TOTAL / IMPACTO NETO	1000	419.25	58.08%

El componente socioeconómico resultó ser el más afectado con un 64.68%, seguido por la contaminación del agua y la ecología.

Las encuestas aplicadas a la población revelaron percepciones mixtas respecto a la actividad minera. Por un lado, se reconoce el aporte económico y la generación de empleo. Por otro, se reportaron molestias relacionadas con polvo, ruido, tránsito de maquinaria pesada y posibles afectaciones a la salud.

El componente socioeconómico mostró impactos tanto negativos como positivos. El método permitió ponderar ambos aspectos, determinando que, aunque existen beneficios económicos, los impactos negativos en salud y calidad de vida requieren atención.

Percepción Social: Las encuestas revelaron que 17 personas notan el agua más turbia, 16 perciben olores químicos y 18 reportan caminos muy dañados por el tránsito de maquinaria. Además, 11 personas reportaron un aumento en problemas de salud dérmicos y digestivos.

Tabla 3. Resultados de la Percepción Social.

Indicador Evaluado	Problema Identificado por la Comunidad	Cantidad de Personas (Encuestadas)	Interpretación del Impacto
Calidad del Agua	El agua está más turbia y sucia	17	Impacto Severo (Recurso Hídrico)
Calidad del Aire	Olor fuerte a químicos y polvo	16	Impacto Severo (Calidad de Aire)
Infraestructura	Caminos muy dañados por maquinaria	18	Impacto Severo (Infraestructura Vial)
Economía Local	Aumento de precios y alquileres	19	Alteración Económica (Inflación local)
Salud Pública	Problemas dérmicos y digestivos	11	Riesgo Sanitario Directo

Medidas de mitigación y control.

Con base en los resultados obtenidos, se propusieron las siguientes medidas:

Tratamiento de efluentes mineros: Implementación de sistemas de sedimentación y tratamiento previo a la descarga.

Control de aceites y grasas: Instalación de trampas de grasas y mantenimiento periódico de maquinaria.

Reforestación y restauración ecológica: Recuperación de áreas degradadas mediante especies nativas.

Control de polvo: Humectación de vías y uso de barreras naturales.

Monitoreo ambiental continuo: Programas periódicos de monitoreo de calidad de agua y seguimiento de indicadores ambientales.

Capacitación y educación ambiental: Sensibilización de trabajadores y comunidad sobre buenas prácticas ambientales.

Estas medidas buscan reducir el impacto ambiental neto y promover una gestión más responsable de la actividad minera en la microcuenca.

Discusión

El análisis realizado evidenció que el impacto neto del proyecto minero sobre la microcuenca alcanzó un 58,08 %, lo que refleja una afectación ambiental de magnitud considerable. Aunque la temporada de lluvias favoreció la dilución de metales pesados, evitando que en este muestreo específico se superaran los límites normativos, la persistencia de aceites, grasas y un pH alcalino pone de manifiesto deficiencias en la gestión de los efluentes.

En el ámbito socioeconómico se registró el mayor grado de afectación, atribuible a la relación directa entre la actividad minera y el deterioro de la calidad de vida. Este deterioro se manifestó en el incremento de precios locales, el daño severo a la infraestructura vial y los riesgos a la salud pública derivados de la exposición a polvo y agua contaminada.

Se identificaron impactos críticos que requieren medidas de mitigación inmediata, entre ellos la operación de maquinaria pesada responsable de emisiones de polvo y ruido, así como la descarga directa de efluentes sin tratamiento. Las acciones propuestas como la instalación de trampas de grasa, la neutralización del pH y el riego de vías se consideran técnica y económicamente viables para reducir dichos impactos.

La aplicación del método Battelle–Columbus Modificado permitió calcular el Índice de Calidad Ambiental para cada componente. El recurso hídrico presentó la mayor disminución en su índice, seguido del componente ecológico. El componente socioeconómico mostró un impacto neto moderado, resultado de la coexistencia de efectos positivos y negativos. En conjunto, el impacto ambiental neto global confirma una afectación significativa, lo que justifica la implementación prioritaria de medidas de mitigación, especialmente en el manejo de efluentes y el control de sedimentos, con el fin de preservar la integridad ecológica y social de la microcuenca.

Conclusiones

El estudio de línea base, complementado con la aplicación del método Battelle–Columbus Modificado, permitió determinar que las actividades mineras en Siporo generan un impacto ambiental neto del 58,08 %, lo que evidencia una afectación significativa. Los componentes más comprometidos fueron el socioeconómico y el recurso hídrico. Se constató que las operaciones de las cooperativas mineras constituyen la principal fuente de contaminación, afectando la calidad del agua mediante valores de pH y concentraciones de grasas fuera de norma, además de incrementar la turbidez por procesos de sedimentación. En el ámbito social, la comunidad enfrenta problemas de salud, inflación local y deterioro de la infraestructura vial, mientras que el componente ecológico reflejó pérdida de cobertura vegetal. La metodología empleada permitió cuantificar y jerarquizar los impactos según su relevancia, facilitando la identificación de medidas de mitigación orientadas a los efectos más críticos. Entre las acciones prioritarias destacan la construcción de áreas de mantenimiento impermeables con trampas de grasa, la implementación de sistemas de neutralización de efluentes y el establecimiento de un programa riguroso de control de polvo y mantenimiento vial. La adopción de estas medidas resulta esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental de la comunidad de Siporo, contribuyendo a la reducción de los impactos negativos y al fortalecimiento de la resiliencia socioecológica de la microcuenca.

Referencias

- Albornoz Zamora, E. J., Guzmán, M., Sidel Almache, K. G., Chuga Guamán, J. G., & González Villanueva, J. L. (2023). *Metodología de la investigación aplicada a las ciencias de la salud y educación*. Mawil Publicaciones de Ecuador. doi:<https://doi.org/10.26820/978-9942-622-59-4>
- Aliaga Churrurrin, D. G. (vol.25 no.25 La Paz mar. 2023 de Marzo de 2023). La reutilización del agua en la minería con enfoque en economía circular. *Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 25 (25). Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2023000100010
- Berna, K. (2017). La minería y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una revisión sistemática de la literatura. En *Desarrollo sostenible en la industria minera* (p. 4). Píripiri: Agiuotantis.
- Conesa Fernández-Vitoria, V. (2010) *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Mundi-prensa. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=wa4SAQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Gerard , K. (Diciembre de 2007). *Valoración de Impactos Ambientales en Ingeniería Ambiental - 48148*. INERCO, Sevilla . Obtenido de Studocu: <https://www.studocu.com/bo/document/uni-versidad-mayor-real-y-pontificia-san-francisco-xavier-de-chuquisaca/manejo-de-residuos-solidos/componente-48148-libro-ingenieria-ambiental/51936672>

- INERCO. (Diciembre de 2007). Valoración de impactos ambientales. *Studocu*. Obtenido de <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-real-y-pontificia-san-francisco-xavier-de-chuquisaca/manejo-de-residuos-solidos/componente-48148-libro-ingenieria-ambiental/51936672>
- Luyo Carrasco, A. F. (2019). *Aplicación del modelo cuantitativo Battelle Columbus para la caracterización ambiental del entorno de un proyecto minero*. Lima: Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo.
- Martínez Salgado, C. (Marzo de 2012). El muestreo en investigación cualitativa: principios básicos y algunas controversias. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(3). doi:10.1590/S1413-81232012000300006
- Morales Anaya, J. A., & Evia V, J. L. (Agosto de 1995). Minería y medio ambiente en Bolivia. (U. C. Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC), Ed.) *ECONSTOR*(04/95). Obtenido de https://iisec.ucb.edu.bo/assets_iisec/publicacion/Mineria_y_medio_ambiente_en_Bolivia.pdf
- Moyya Colque, J. (2020). *Impacto economico y ambiental de la extraccion de minera en las comunidades y las subcuencas Poopo-Antequera-Pazña*. La Paz: Universidad San Andres.
- Mudd M, G. (2010). Megatendencias clave y limitaciones inminentes. En *La sostenibilidad ambiental de la minería en Australia*: (págs. 98-115). Elsevier.
- Reglamento de Ley No 1333 del Medio Ambiente. (1992, 15 de junio). *Reglamento General de Gestión Ambiental; Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica; Reglamento para Actividades con Sustancias Peligrosas; Reglamento de Prevención y Control Ambiental*. República de Bolivia. Obtenido de https://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/bolivia/bolivia_1333.pdf
- Sánchez Flores, F. A. (15 de Junio de 2018). Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos. *Revista digital de investigación en docencia universitaria ISSN 2223-2516*. Obtenido de <https://orcid.org/0000-0002-0144-9892>
- SEET . (2018). Nación del agua derivada de la actividad minera: Una visión general. En *Actas de Conferencia Anual* (p. 703). Akure: SEET'18.
- Strosnider W. H. J., Llanos, F. S., Marcillo, C. E., Callapa, R. R., & Nairn, R. (2014, julio-septiembre). Impacto en afluentes del río Pilcomayo por contaminantes adicionales de drenaje ácido de minas desde Cerro Rico, Potosí-Bolivia. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(3). <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323632128001.pdf>
- Tripathi, S. (2020). Evaluación del impacto ambiental y de los medios de vida de las inundaciones utilizando un sistema de evaluación utilizando un sistema de evaluación. En *Teledetección y GISciencia* (págs. 11-34).

Vilela Pincay , W. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *revista internacional de administración No. 8, 3*.

Weston Solution . (12 de August de 2015). *Superfund Technical Assessment and Response Team (START)*. Obtenido de Draft Technical : https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2015-08/documents/draft_technical_memo_august_12_2015_08-1574032.pdf