

**La reutilización del agua en la minería con  
enfoque en economía circular**

**The reuse of wastewater in mining with a  
focus on circular economy**

Daniela Grace Aliaga Churrurrin <sup>1</sup>

**Instituto de Investigaciones en Ciencias Económicas y Financieras,  
Universidad La Salle, La Paz – Bolivia**  
daniela.aliaga.churrurrin@gmail.com

---

**Artículo Recibido:** 06-07-2022

**Artículo Aceptado:** 19-01-2023

---

**Resumen**

**E**l presente trabajo de investigación tiene como objetivo mostrar la realidad actual de las medidas que realizan las empresas mineras en Bolivia respecto a la reutilización del agua residual, propiamente llamadas aguas ácidas con enfoque en economía circular. Por ello, el trabajo se divide en dos partes; La primera parte se refiere a la realidad en Bolivia respecto a la reutilización de las aguas ácidas de la minería. La segunda parte se refiere a los avances y aportes de Chile respecto a la reutilización del agua en la minería. La metodología del trabajo consiste en una revisión y análisis de la información sobre el tema, utilizando la base lógica inductiva por medio de investigación bibliográfica y documental. Los resultados, se sintetizan en la relación entre la importancia de la economía circular y la reutilización del agua residual que deriva de las actividades mineras representada a través de un diagrama de causa y efecto en base a la información recopilada, que busca responder la siguiente pregunta de investigación ¿Qué dificultades existen para implementar la EC - economía circular en la minería para reutilizar el drenaje ácido? Como resultado, se identifica que existen varias causas en las dimensiones de medición y método que generan dificultades en poder iniciar la implementación de la Economía Circular, principalmente la falta de información cuantitativa del consumo del agua en la minería que permite calcular una aproximación de la cantidad de DAM producido. Como conclusión para resolver

---

<sup>1</sup> Licenciada en ingeniería industrial y especialista en sistemas de gestión de calidad, seguridad y salud ocupacional, experta en comercio internacional, consultora en proyectos de medio ambiente y minas en Consultores Roman, docente con carga horaria en pregrado en la Universidad La Salle Bolivia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4430-671X1>

este problema es necesario que instituciones, científicas, estatales, gubernamentales, privadas realicen mediciones del consumo del agua y evaluar las normativas vigentes para alinearlas al enfoque de economía circular.

**Palabras clave:**

Aguas ácidas, Medio ambiente, metalurgia, optimización del agua, sostenibilidad

**Abstract:**

The objective of this research work is to show the current reality of the measures carried out by mining companies in Bolivia regarding the reuse of residual water, properly called acid waters with a focus on circular economy. For this reason, the work is divided into two parts; The first part refers to the reality in Bolivia regarding the reuse of acid waters from mining. The second part refers to the advances and contributions of Chile regarding the reuse of water in mining. The methodology of the work consists of a review and analysis of the information on the subject, using the inductive logical basis through bibliographic and documentary research. The results are synthesized in the relationship between the importance of the circular economy and the reuse of residual water derived from mining activities represented through a cause-and-effect diagram based on the information collected, which seeks to answer the following question research What are the difficulties in implementing CE - circular economy in mining to reuse AMD - acid mine drainage? In our country. As results, it is identified that there are several causes in the dimensions of measurement and method that generate difficulties in being able to start the implementation of the Circular Economy, mainly the lack of quantitative information on water consumption in mining that allows calculating an approximation of the amount of AMD produced. In conclusion, to solve this problem, it is necessary for scientific, state, government, and private institutions to measure water consumption and evaluate current regulations to align them with the circular economy approach.

**Key Words:**

Acid waters, Environment, metallurgy, water optimization, sustainability

## Introducción

La importancia de la presente investigación radica en una de las razones máximas de la economía circular que es considerar la optimización de los recursos, como una alternativa para la reducción del consumo de materias primas y el aprovechamiento de los residuos o recursos, que al reciclar, estos pueden ser convertidos en nuevos productos, a esto se puede denominar que se está haciendo economía circular (REPSOL Global 2022).

El concepto de economía circular según la Fundación Ellen MacArthur que en su página web oficial define basado en tres principios que son:

El presente modelo económico de “extraer, producir, desperdiciar” está llegando ya al límite de su capacidad física. La economía circular es una alternativa atractiva que busca redefinir qué es el crecimiento, con énfasis en los beneficios para toda la sociedad. Esto implica disociar la actividad económica del consumo de recursos finitos y eliminar los residuos del sistema desde el diseño. Respaldada por una transición a fuentes renovables de energía, el modelo circular crea capital económico, natural y social y se basa en tres principios: (i) Eliminar residuos y contaminación desde el diseño, (ii) Mantener productos y materiales en uso, (iii) Regenerar sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, sección: Economía Circular, s.a., p.1).

La fundación Elle MacArthur vio los medios para difundir el enfoque de Economía Circular a nivel mundial a través de conferencias, capacitaciones y reuniones estratégicas con empresas estatales como empresas privadas, primeramente, en el continente europeo, para luego expandirse en los demás continentes difundiendo los tres principios que ayudan a comprender mejor en que consiste la economía circular.

La idea de economía circular ya aparece hace mucho tiempo atrás, como ser en el libro *Economics of Natural Resources and the Environment* que habla sobre Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente, para mayor precisión se usa el término de economía circular en el capítulo 2 que es titulado «La economía circular», actualmente este término tiene

mucha importancia como trabajo por realizar, porque se está trabajando en diferentes ámbitos, no sólo académico, también está siendo tratado en los ámbitos político, económico, empresarial y social. (Pearce y Turner, 1989).

Por eso es importante buscar alianzas estratégicas, porque la economía circular no se puede implementar sola, o de forma aislada, es parte de un sistema de gestión macro, o también denominado simbiosis industrial que es un instrumento englobado bajo el paradigma de la economía circular que promueve el crecimiento sostenible y el aumento en la eficiencia de recursos, mediante el establecimiento de sinergias de intercambio y aprovechamiento entre industrias con la finalidad de que se produzca una relación beneficiosa para las industrias involucradas (Hurtado y Jordá, s.f.).

Las sinergias que pueden surgir dentro de un proceso de simbiosis industrial se clasifican de acuerdo con tres tipos principales: (i) Sinergias de mutualidad: basadas en el uso compartido de servicios comunes, instalaciones o infraestructura. (ii) Sinergias de sustitución: basadas en la reutilización de flujos o corrientes residuales. (iii) Sinergias de génesis: relacionadas con la creación de una nueva actividad para satisfacer necesidades de reutilización de flujos (Marchi, Zanoni, y Zavarella, 2017).

Según (Devisscher, 2008) la actividad minera en Bolivia, especifica que, la actividad minera ocasiona impactos con distintos niveles de intensidad, en recursos como el agua y suelos, transformando paisajes por la destrucción de cerros, construcción de diques, acumulación de colas de minerales, todo debido a la generación de distintos contaminantes durante los procesos de extracción y concentración.

Entre estos se identifican tres causas principales de impactos ambientales negativos por la actividad minera, que son:

“1) la apertura de socavones, 2) los desmontes que tienen metal extraído de poco valor económico, y 3) la generación de colas, que son los residuos provenientes de los ingenios mineros que procesan el mineral extraído de la mina para obtener concentrados minerales para su comercialización”

(Devisscher, 2008, p. 28).

Esto se aplica para la actividad minera en general, sin importar la dimensión del proyecto, locación, o tipo de mineral a extraer, los impactos ambientales mencionados son parte del proceso de extracción de yacimientos mineros subterráneos o también los de cielo abierto, muchos de ellos son identificados cuando se efectúa el proyecto y la elaboración documental para la obtención de la licencia o permiso para la explotación del mineral.

El consumo de agua en las operaciones mineras es elevado por eso se habla de procesos de reutilización del agua, estos son ensayos experimentales donde se evalúan los caudales a tratar y las concentraciones presentes en los efluentes, estos determinan si se puede realizar como primera opción solo tratamiento, o como segunda opción el tratamiento con recuperación de metales. Si se elige la primera opción se denomina “Proceso Directo” por ser solo una etapa, pero, si se opta por la segunda opción se denomina “Proceso por Etapas” (Aduviri, 2019).

Si continúa el ritmo actual de crecimiento y sólo aplicamos cambios tecnológicos (mejoras de eficiencia) el abuso a los recursos naturales para el 2030 será equivalente a un 15% y para el 2050 un 75% en los escenarios más optimistas (Lacy y Rutqvist, 2015). Un método para reducir el consumo excesivo de los recursos naturales es poder reutilizarlo, que puede ser a través de la construcción de sistemas de circuito cerrado, que consiste en crear bucles para que recircule el agua, teniendo el cuidado de encerrar los ecosistemas aguas abajo. Esto crearía valor sostenible a las empresas que apliquen en sus procesos, encaminándolas a la economía circular, minimizando el impacto ambiental y social de sus negocios.

Surge la necesidad e importancia de saber controlar los residuos contaminantes, para eso las empresas mineras deben como primer paso evaluar su propio entorno identificando los riesgos de disminución de la demanda o la sustitución, determinar qué materiales se pueden recuperar de manera más efectiva e identificar dónde los nuevos modelos de negocios circulares (Bartels y Morrison, 2019).

Existe una llamada de atención a los Gobiernos Nacionales que son quienes deben emprender acciones orientadas a superar los conflictos socioambientales que afronta el sector minero, planteando objetivos estratégicos en los Planes Nacionales de Desarrollo –PND-, evaluando las medidas u orientaciones para promover el sector minero (Viana Ríos, 2018).

Para poder aplicar la economía circular del agua, la *International Water Association* (IWA), creó una metodología como estrategia para administrar mejor el agua, basado en las 5Rs: reducir, reutilizar, reciclar, restaurar y recuperar, donde reducir se refiere a la pérdida del agua natural o pura, reutilizar el agua con el mínimo de consumo o ningún tratamiento en procesos internos de la empresa si es posible porque el agua contaminada puede tener características que pueden dificultar su tratamiento para hacer reversible y recuperar a su estado inicial natural o puro, reciclar el recurso del agua y aguas residuales para reducir el consumo de agua limpia, retirar recursos de las aguas residuales y ponerlos en uso para devolver el agua al medio ambiente en una calidad igual o superior a la que fue retirada (Da-Silva y Pasold, 2019).

Esa última etapa es la más difícil y crítica en la actividad minera ya que el agua ácida es muy difícil devolverla al medio ambiente, como un agua que no contamine el medio ambiente, porque contiene elementos pesados y químicos que todos son usados para la extracción y separación de los metales preciosos de la roca en mina, por ello la reutilizar el agua dentro de un sistema de economía circular favorece en la reducción de la demanda del agua de napas superficiales y subterráneas, además de proteger el medio ambiente, economizar energía, reducir inversiones en infraestructura y proporcionar una mejora a los procesos industriales (Da-Silva y Pasold, 2019).

Esta medida es beneficiosa para el medio ambiente por el control y reducción de las aguas residuales, así también desde el enfoque de análisis de costos por el consumo del agua este podría reducirse, porque la accesibilidad al agua pura no es centralizada para las empresas, así como el cuidado

en evitar la contaminación de vertientes, todo aplicando el concepto de Sostenibilidad en las empresas que usan el recurso del agua.

A nivel mundial se percibe un rápido crecimiento de la población y escasez de recursos naturales en determinadas regiones, que pone en peligro el cuidado con el medio ambiente, debido a la alta demanda por el agua, haciendo que la reutilización del agua sea un tema importante en la actual y de relevancia mundial, el que debemos remediar conjuntamente, se plantea que al reutilizar el agua se reduciría la demanda, así altos volúmenes de agua potable pueden ser ahorrados a través del uso del agua de calidad inferior post tratados para actividades que no requieran que este recurso cumpla patrones de potabilidad aclarando que, la reutilización puede definir como el uso de agua residual o agua de calidad inferior tratada o no, es decir que haya pasado por un proceso o procesos de purificación. (Da-Silva y Pasold, 2019).

Muchas entidades internacionales están apoyando la implementación de la economía circular, es el caso del *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia* que clasifica la reutilización del agua como indirecta no planeada, indirecta planeada o directa planeada, la primera se refiere a agua contaminada y devuelta a la vertiente para que, a través de acciones naturales como la dilución, auto depuración, se diluye, así aguas abajo sean usadas por otro usuario. La segunda se refiere a que el efluente es previamente tratado antes de ser devuelto en forma planeada y controlada, con la condición de que el efluente tratado estará sujeto solo a mezclas con otros efluentes que tengan los mismos requisitos de calidad. La tercera se refiere cuando los efluentes después de tratados son llevados a su punto de descarga hasta el lugar de reutilización, no se los libera al medio ambiente, estos son conocidos como los ciclos cerrados que son más usados en actividades industriales o de riego (Da-Silva y Pasold, 2019).

Así también la KfW Banco de Desarrollo en el Documento de Investigación Programa de Energía, Medio Ambiente y Recursos titulado La economía circular en América Latina y el Caribe se refiere a la eficiencia de los recursos materiales como la utilización sostenible de los recursos, mediante

la reducción del uso, la optimización y el reciclaje, para producir la misma cantidad de productos. La adopción de prácticas eficaces, como la producción ajustada (*lean production*) y la optimización de la vida útil, se puede traducir en un uso más eficiente de los recursos materiales que, a su vez, puede ayudar a responder a una serie de problemas medioambientales, incluyendo la mitigación del cambio climático y la reducción del consumo de agua y el volumen de residuos (como citó Schröder, Albaladejo, Ribas, MacEwen y Tilkanen, 2020).

El objetivo del presente trabajo es analizar el tema de reutilización de las aguas ácidas en el ámbito de la economía circular como un instrumento que ayude a las empresas mineras a optimizar el consumo de agua y controlar el residuo de las aguas ácidas para evitar la contaminación del medio ambiente. El presente trabajo se divide en dos partes; La primera parte se refiere a la realidad en Bolivia respecto a la reutilización de las aguas ácidas producto de la minería. La segunda parte se refiere a los avances y aportes del país de Chile para optimizar el consumo de agua y controlar este residuo.

### **Métodos y materiales.**

La metodología del trabajo consiste en una revisión y análisis de la información sobre el tema, utilizando la base lógica inductiva por medio de investigación bibliográfica y documental.

El artículo se desarrolló teniendo en cuenta la metodología de revisión sistémica de la literatura, como estudio integrativo, observacional y retrospectivo. Se analizó 84 fuentes de información, de las cuales se recuperaron 38 de plataformas como ser Google académico, Scielo, Dialnet, también se analizó información audio visual de YouTube, el criterio de selección se realizó en base a palabras claves que son, aguas ácidas, medio ambiente, metalurgia, optimización del agua, sostenibilidad, y las combinaciones utilizadas son, reutilización del agua, aprovechamiento del agua, consumo del agua en la minería. toda la información se organizó en mendeley, dividiendo en las siguientes categorías:

Respecto a la primera parte del trabajo la información analizada, está conformada por 15 fuentes, como ser artículos, reportes e informes de entidades estatales de Bolivia, como se muestra en la Figura 1. En la segunda parte del trabajo la información analizada consta de 12 fuentes que son artículos, reportes de entidades estatales de Chile, reportes de universidades de Chile, páginas web, blogs, periódicos, videos en YouTube, como se refleja en la Figura 2. El resto de la información analizada se sub divide en dos grupos, 11 fuentes de información de EC Economía Circular y 14 documentos de otros países, que consiste en información de la realidad de países diferentes a Chile y Bolivia.

**Figura 1.**

*Información analizada respecto a la realidad en Bolivia*

Bolivia				
★	📄	Authors	Title	Year
☆	📄	Villegas, Pablo	Los recursos naturales en Bolivia	2005
☆	📄	Devisscher, Tahia	Informe temático sobre desarrollo humano en Bolivia	2008
☆	📄	Campanini, Oscar	El Agua para la minería	2012
☆	📄	Roche, Michel-Alain; Fernandez Jauregui, Carlos; Aliaga Rivera, Ange...	Balace Hídrico Superficial de Bolivia	2012
☆	📄	Estefanía, Miranda; Heredia, Irma; Guzmán, Luis; Iñiguez, Patricia	Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales	2013
☆	📄	CEDIB, Centro de documentación e información Bolivia	Agua y minería en Bolivia	2014
☆	📄	El Diario	CEDIB IDENTIFICA CUATRO AMENAZAS	2016
☆	📄	Madrid, Emilio Lara; Zubieta, Luis Javier; Córdova, Roy; Saavedra, Carlos	Gestión de cuencas en áreas con actividad minera: La experiencia en río Blanco y Chairó Huarinilla	2018
☆	📄	Copana Paucara, Carlos Felipe	Efectos del Cambio Climático sobre la Disponibilidad de Agua y los Recursos Hídricos en Bolivia: Pronóstico para el 2030	2018
☆	📄	Periódico La Patria	Aguas contaminadas de la minera Huanuni siguen afectando a Machacamarca	2019
☆	📄	Bimensual, Informe	Informe Bimensual Regalías Mineras Gestión 2019	2019
☆	📄	Zamora, Gerardo; Hinojosa, Octavio	Economía circular-Caso de estudio: producción minera de concentrados de Pb-Ag-Zn	2019
☆	📄	Rodriguez, Fernando; Guzmán, Guillermo; De Marchi, Bianco; Escala...	Efectos de la minería en el desarrollo económico, social y ambiental del Estado Plurinacional de Bolivia	2020
☆	📄	ROMAN/Consultora	Complejo metalúrgico royal resumen ejecutivo	2020
☆	📄	Zamora, Gerardo; Tórrez, José Ariel	ECONOMÍA CIRCULAR EN EL PROCESAMIENTO MINERAL: USO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS TRATADAS EN PROCESOS DE FLOTACIÓN DE MIN...	2021
Normativa Boliviana				
★	📄	Authors	Title	Year
☆	📄	Ley Nº 1333	Ley Nº 1333 Del Medio Ambiente	1992
☆	📄	Honorable Congreso Nacional	Ley Nº 1777 código de minería	1997
☆	📄	La Asamblea Legislativa Plurinacional	Ley N.º 300 (15 de Outubro de 2012) - Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien	2012
☆	📄	Estado Plurinacional de Bolivia	Ley Nro. 535 Ley de Minería y Metalurgia	2014

Fuente. Elaboración propia en base al Mendeley

Nota. La imagen refleja la información analizada, consistente en publicaciones entre las gestiones 2005 a 2021, así mismo se analizó información de 4 normativas bolivianas. Recuperado del software Mendeley, de elaboración propia.

a. ● Documentación similar a reportes de datos, a través de informes

- de instituciones del Estado Boliviano y empresas vinculadas a la actividad minera.
- b. ● Documentación como ser trabajos de investigación, artículos de investigación, que se realizaron con el apoyo de instituciones privadas y/o universidades o instituciones similares.
  - c. ● Noticias o entrevistas publicadas en un medio de comunicación como ser periódicos.
  - d. ● Documentación interna autorizada y proporcionada por la empresa boliviana privada, para el análisis documental

## Figura 2.

*Información analizada respecto a la realidad en Chile*

Chile				
★	📄	Authors	Title	Year
☆	📄	CRHIAM	CRHIAM Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería	
☆	📄	MMAChile	Ministerio de Medio Ambiente Chile	
☆	📄	CNNChile	Minería 360   Capítulo 12: La economía circular en la minería	2013
☆	📄	Copper Alliance	The Impacts of Copper Mining in Chile: Economic and Social Implications for the Country	2017
☆	📄	Montes, Camila; Cantallopts, Jorge	Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029	2018
★	📄	Da-Silva, Maria; Pasold, Cesar	La reutilización del agua en el ámbito de la economía circular y sostenibilidad	2019
☆	📄	Harris, Pablo	Mineros de Chile ayudarán a limpiar relaves.pdf	2019
☆	📄	Concha A., Fernando; Amaya, Alvarez; Marcelo, Vergara	Minería, Energía Y Agua - Situación Actual	2020
☆	📄	Saravia, M.; Silvia, Gil, M; Blanco, E.; Llavona, A.; Naranjo, L.	Desafíos hídricos en Chile y recomendaciones para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe	2020
☆	📄	SPENCE	Informe consumo de agua, minería Spence S.A.	2020
☆	📄	CORFO	Hoja de ruta RCD, Economía circular en construcción 2035	2020
☆	📄	Humberto, Salinas	Economía Circular en la Minería	2020
☆	📄	González, Cristian	Maise Rojas, futura ministra del Medio Ambiente: "Me gustaría que la economía circular lograra permear a los otros ministerios"	2022

Fuente. Elaboración propia en base al Mendeley

Nota. La imagen refleja la información analizada, consistente en publicaciones entre las gestiones 2013 a 2020. Recuperado del software Mendeley, de elaboración propia.

- a. ● Documentación similar a reportes de datos, a través de informes de instituciones del Estado chileno y empresas vinculadas a la actividad

minera.

- b. ● Documentación similar a reportes de datos, a través de informes de instituciones y empresas vinculadas a la actividad minera, reflejando sus privados y particulares.
- c. ● Documentación como ser trabajos de investigación, artículos de investigación, que se realizaron con el apoyo de instituciones privadas y/o universidades o instituciones similares.
- d. ● Noticias o entrevistas publicadas en un medio de comunicación como ser periódicos digitales o grabaciones de transmisión de medios televisivos de un canal de noticias.
- e. ● Información de páginas web institucionales de instituciones chilenas relacionadas a la actividad minera y/o el manejo del agua

Los resultados se contextualizan en la Figura 3 "Espina de pescado Ishikawa" análisis de causa -efecto, para su desarrollo se combinaron dos técnicas que son; la técnica de los 5 "Por Qué", y la técnica de las 6 M's, que permite responder la siguiente pregunta, ¿Qué dificultades existen para implementar la EC - economía circular en la minería en la reutilización del DAM – drenaje ácido en mina?, que se explican a continuación:

El diagrama de Ishikawa analiza de una forma organizada y sistémica identifica las causas del problema raíz, cuyo resultado que afecta a la calidad se lo denominará efectos. Existen dos aspectos básicos que definen esta técnica que son: el orden y profundizar. El describir las causas evidentes de un problema puede ser más o menos sencillo, pero es necesarios ordenar dichas causas, ver de dónde provienen y profundizar en el análisis de sus orígenes con el objeto se solucionar el problema (Cuatrecasas y González, 2017).

Los pasos planteados para elaborar la espina de pescado conjuntamente con la técnica de los cinco por qué son: (i) decidir el problema a analizar (efecto definido), (ii) dibujar la flecha horizontal larga y registrar en la punta el efecto definido, (iii) con la técnica de los cinco por qué, formular la pregunta, ¿por qué ocurre?, (iv) determinar las causas principales alrededor de la flecha principal uniendo con flechas inclinadas hacia el centro, (v)

determinar y anotar las sub-causas con respecto a cada causa que afecta el problema (Méndez, 2012).

Es importante seguir el orden de los pasos y formular correctamente la pregunta problema que es el efecto y las causas saldrán de esta línea horizontal llegando a ser las espinas del pescado quienes se subdividirán en varias ramificaciones, la información debe ser ordenada y concisa manteniendo la claridad en la información.

Respecto a las técnicas utilizadas para elaborar la espina de pescado, se aplican dos, la primera que es la técnica de los cinco “Por Qué”, que consiste en sistematizar las preguntas utilizada durante la fase de análisis de problemas para buscar posibles causas principales de un problema. Durante esta fase, los miembros del equipo pueden sentir que tienen suficientes respuestas a sus preguntas. Esto podría resultar en la falla de un equipo en identificar las causas principales más probables del problema debido a que el equipo ha fallado en buscar con suficiente profundidad. La técnica requiere que el equipo pregunte “Por Qué” al menos cinco veces, o trabaje a través de cinco niveles de detalle. Una vez que sea difícil para el equipo responder al “Por Qué”, la causa más probable habrá sido identificada (SLC Sociedad Latinoamericana de Calidad, 2000).

Esta técnica permitirá contextualizar e identificar las causas raíz del problema, en base a la pregunta por qué, no es necesario u obligatorio llegar a la quinta pregunta, esta puede responderse con dos o tres, y al haber llegado a la causa raíz se identifica repetición en la respuesta.

La segunda técnica que se aplica es la de 6M’s, que consiste en agrupar las causas potenciales en seis ramas principales (6 M): métodos de trabajo, mano o mente de obra, materiales, maquinaria, medición y medio ambiente, la pregunta básica para este tipo de construcción es: ¿qué aspecto de esta M se refleja en el problema bajo análisis?, así poder identificar posibles aspectos para cada una de las 6 M que pueden ser causas potenciales de problemas (Gutiérrez y De la Vara, 2009).

Para la técnica de las 6 M's, las dimensiones analizadas son mano de obra o gente, métodos, máquinas o equipos, material, mediciones, medio ambiente, esta última dimensión es necesario recalcar que se refiere al entorno, el medio que lo rodea, la situación geográfica.

## **Resultados**

En las últimas décadas, el crecimiento económico que se dio gracias al desarrollo industrial y las modernas tecnologías han facilitado y ayudado al modo de vida aumentando el grado de confort, que como efecto ha aumentado el consumo de bienes y servicios, pero lamentablemente este crecimiento se logró agotando los recursos naturales, en especial del consumo desmedido de muchos minerales (Mart y Porcelli 2018).

Los avances de economía circular en el continente Europeo lleva la delantera, en especial el país de España, propiamente en el tratamiento de reutilización de aguas en minas, realizaron algunos avances notables que menciona el profesor Nieto (2020) de Edafotec Huelva España en el Foro Minnovación, que habla de la prevención y tratamiento de aguas ácidas en minas, quienes mencionan hacer el tratamiento de aguas ácidas con el sistema DAS – Drenajes Ácidos de Mina, que consiste en un tratamiento pasivo con un sustrato alcalino disperso, este problema es muy común, en especial en minería de sulfuros porque las concentraciones de hierro III y aluminio en acides neta es alta, el tratamiento para revertir es más costoso, lo que ocasiona que se deje en abandono las aguas ácidas cuando concluyen su operación en las minas, por ello trabajaron un tratamiento de este residuo pasivo, que consiste en tanques de reactivos que no son amplios, donde se incluye material de permeabilidad, para tener una alta superficie reactiva evitando la obstrucción de los sistemas de tratamientos, porque funciona como filtros reactivos que tienen una vida media de 4 a 5 años, para que luego se reemplacen los filtros como una media de mantenimiento, todo el sistema funciona con gravedad y solo es preciso realizar el monitoreo, existen dos alternativas en función del nivel de concentración del PH ácido, la primera es aplicar DAS con calcita donde el PH ácido llega hasta 6,5, la segunda opción es aplicar DAS con

magnesia cáustica cuando el PH ácido es hasta 8,5 o 10. Con el tiempo de uso los filtros llegan a perder la permeabilidad el material alcalino o magnesio y se deben hacer la reposición, Este sistema de tratamiento DAS se implementó en diferentes proyectos en Estados Unidos, España, Perú, entre otros (Edafotec, 2020).

Dentro de la minería para poder aplicar la economía circular algunas oportunidades y retos sectoriales que plantea la ALC – América Latina y el Caribe son:

“Oportunidades (i) Hacer frente a los riesgos ambientales y sociales que plantean las actividades mineras y valorizar los residuos de extracción. (ii) Incremento en la demanda de las principales materias primas utilizadas en tecnologías con bajas emisiones de carbono. (iii) Desarrollo de nuevas tecnologías y automatización de las actividades mineras. [...] Los retos (i) Importantes repercusiones ambientales y sociales derivadas de las actividades mineras. (ii) Alta dependencia de las economías nacionales en los sectores extractivos y la exportación de recursos. (iii) Rápido desarrollo de modelos de negocio para empresas de minería urbana que compiten con empresas mineras tradicionales” (Schröder et al. 2020, p. 49).

Estos retos y oportunidades de la actividad minera son algunos de los muchos problemas identificados, pero haciendo un análisis detenidamente, en cada uno de ellos está involucrado el consumo del agua, que puede ser desde un enfoque medio ambiental, social, productivo y hasta económico, por eso es importante dar la debida atención a estos factores, estos problemas que se consideran retos respecto al uso del agua en la minería de Cobre en Chile son los mismo que tiene la minería en Bolivia, porque tienen relación directa con la actividad minera sin importar el tipo de mineral explotado.

(Dörner, 2020) en el video publicado en YouTube, titulado Charla Online | Economía Circular, explica los términos de economía circular, destaca que se denomina también minería circular, porque el modelo de minería verde está compuesto por cinco elementos: (I) mejorar las condiciones laborales, (II) minimizar impactos ambientales, (III) minimizar la huella

del carbono, (IV) uso eficiente de recursos hídricos y (V) minería circular.

El DAM se caracteriza principalmente por presentar valores de pH ácidos que varían de acuerdo al mineral que se extrae, este puede ser desde 1, como es el caso de San José en Oruro, y el PH más frecuentemente es 3, que reportan el mayor número de centros mineros, [...] adicionalmente, contiene elevadas concentraciones de iones sulfato y iones metálicos considerados tóxicos, como hierro, arsénico, zinc, plomo y cadmio, también su composición en iones varía según el yacimiento del que procede el DAM (Madrid et al., 2018).

Rescatando los elementos del modelo de minería verde, este trabajo de investigación detalla a continuación la realidad de los países latinoamericanos de Bolivia y Chile respecto al uso eficiente del agua del residuo que genera la actividad minera llamadas aguas ácidas, que es el principal problema y actor contaminante del agua a través del uso de químicos para la separación del mineral de la roca, el DAM Drenaje ácido en mina.

### **1. La realidad en Bolivia respecto a la reutilización de las aguas ácidas en la minería**

La KfW Banco ha financiado soluciones circulares para el manejo de las aguas residuales para diferentes países en desarrollo como ser Bolivia, Nicaragua y Perú o desarrollo de proyectos en eliminación de las aguas residuales y reciclaje de lodos. Sin embargo, no se evidenció resultados o avances de algún trabajo de planta de tratamiento con este financiamiento, para el caso de Bolivia. Si se identificaron algunos proyectos en los otros países, como ser, en Nicaragua, las plantas de tratamiento de aguas residuales financiadas por KfW desarrollaron una nueva solución para eliminar los lodos residuales, usando instalaciones solares para secado de los lodos en la planta, y estos ya que tienen altos componentes de nitratos y fosfatos, que pueden ser aprovechados como abono o enmienda para mejorar la calidad de los suelos. También existe el financiamiento de proyecto similares como ser; del Banco Mundial para los países Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Perú, que consiste en Préstamos tradicionales, subsidios,

financiamiento basado en resultados para desarrollar proyectos en Gestión de residuos y reciclaje; tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos. Otra entidad financiadora es, Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para los países Belice, Bolivia, Brasil, Chile, Surinam, Uruguay, que consiste en, préstamos tradicionales, subsidios, garantías, para desarrollar proyecto de Gestión de residuos y reciclaje; tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos (Schröder; Albaladejo; Ribas; MacEwen y Tilkänen, 2020).

Algunas técnicas que son aplicadas en Bolivia respecto a la reutilización del agua en la minería son:

El uso de coberturas de efecto de barrera capilar, de cobertura multicapa del tipo SDR (*Stockage y Relargage*) de almacenamiento y descarga ayuda a acumular el agua de lluvia (y/o nieve) caída durante la estación húmeda, debajo de la capa fina se debe colocar una capa gruesa (Zamora y Hinojosa, 2019). En las actividades mineras y petroleras el reúso de aguas se da principalmente en el enfriamiento de maquinaria de extracción o perforación, como también, en el lavado y separación de minerales (Estefanía et al., 2013).

También desarrolló una técnica de reutilización de aguas ácidas el proyecto minero ROYAL en el departamento de Potosí, en su documento de resumen ejecutivo anexo para la aprobación del Nivel de Categorización Ambiental, explica el diseño de un circuito cerrado, propuesto y diseñado por la empresa Consultores ROMAN, que está conformado por diez plantas para el tratamiento de concentrados de minerales de naturaleza polimetálica de Zinc, Plomo y Plata; cada una con una capacidad de procesamiento de 300 toneladas/día [...] Además de un sistema de Manejo del agua y los residuos minero metalúrgicos, que consiste en la construcción de una Presa de Colas, Presa de Aguas, sistema de conducción de colas y aguas a través de tuberías de HDPE, bombas, cámaras y estanques. Sistema que garantizara tanto el aprovisionamiento de agua en las plantas de concentración, como el adecuado manejo de los residuos metalúrgicos (ROMAN Consultora, 2020).

Otro método es la recuperación de iones metálicos a través de un proceso dividido en dos etapas: primera etapa la neutralización de agua ácida con cal y 2da segunda etapa la precipitación de los iones metálicos en forma de hidróxidos, seguido del espesamiento o deshidratación del lodo formado, los cuales se sugiere como alternativa de recuperación del valor económico potencial al DAM, de metales compuestos de hierro y zinc. El hierro recuperado se puede usar como pigmento en la fabricación de pinturas y cerámicas, el zinc, recuperado se puede usar como pigmento en pintura, como relleno en llantas de goma y como pomada antiséptica en medicina, además de suplemento alimenticio en productos lácteos (Madrid et al. 2018).

Respecto a la normativa boliviana, en primera instancia tenemos la Ley del Medio Ambiente N° 1333, a esta ley le precede el Código de Minería, Ley de Minería y Metalurgia, Ley No. 755 Gestión Integral de Residuos (2015).

El artículo 70° de la Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333, 1992) en el capítulo XI de los recursos minerales, establece que el Estado otorga poder para realizar la explotación de los recursos minerales, enfatizando el aprovechamiento que debe desarrollarse de las materias primas, materiales de desecho, así como una buena gestión y manejo de las colas, relaves y desmontes, energía.

El artículo 45° del (Código de minería, 1997) en el capítulo IV, establece su específica responsabilidad y obligación de cuidar el medio ambiente, para que no causen daño a sus concesiones, áreas colindantes como ser terrenos y superficies.

Los artículos 111 y 112 de La Ley de Minería y Metalurgia (Ley Nro 535, 2014), establece el poder de aprovechamiento el agua a los proyectos mineros previa valoración y autorización que realiza el ministerio de medio ambiente, el uso del agua puede realizar en el área minera, como ser interior mina o en superficie, esta autorización es realizada por la autoridad competente en el sector de agua. Sin embargo, existe una condición fuerte

que el uso del agua en la minería no debe interrumpir, perjudicar o vulnerar los derechos respecto a la provisión de agua para consumo humano, riego y medio ambiente, por ello menciona que se debe realizar la correcta gestión o manejo de los recursos hídricos superficiales de acuerdo con las normas ambientales y sectoriales vigentes.

El Artículo 112. Igualmente otorga permiso del uso del recurso del agua, especificando el caso de la actividad minera que no cuenta con recursos hídricos suficientes, esta situación puede surgir porque el proyecto se encuentra en una zona árida y el agua es escasa o insuficiente (Ley Nro 535, 2014).

La normativa y sus artículos relacionados a la actividad minera y el agua en Bolivia, son conocidos por su alta capacidad financiera para construir presas, pozos, aducciones u otras obras de captación y almacenamiento de agua; que forma parte de la política gubernamental vigente que es considerada una norma muy antigua que debe actualizarse, los códigos mineros, ley Minera de 1880 (art. 25), e incluso la Ley N° 535 del 2014 (art. 111) establecen la propiedad/derecho de uso del agua para los mineros en el área de su explotación (Roche et al., 2012).

Sin embargo, según datos oficiales de la gestión 2007, el 100% de las empresas mineras medianas cumplen con regulaciones ambientales y es el 8,7% de la minería chica, el 2,3% de las cooperativas mineras y el 6,3% de productores no metálicos los que cumplen la normativa. Estos son datos que deben ser actualizados y publicados (Villegas, 2005).

Los riesgos ya no sólo ambientales respecto al uso del agua en la minería, sino son respecto a la vida y salud de las poblaciones, las actividades económicas de los pobladores o comunarios como agricultura y ganadería, también respecto a la soberanía nacional en el uso y aprovechamiento de los recursos naturales, enfatizando el mismo autor que son aspectos que aún ameritan ser profundizados ( Dionisio, 2011).

En Bolivia en base a la normativa mencionada y el compromiso de los ODS

Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, deberíamos estar encaminados a la minería sostenible con el medio ambiente, sin embargo, tenemos falencias como ser:

Haciendo la comparación entre Bolivia, Colombia, Chile y Perú, solo este último incluye el concepto de la remediación voluntaria en la legislación. En su Reglamento de la Ley N° 28271, entre las modalidades de remediación voluntaria se establece el reaprovechamiento de pasivos ambientales (Narrea, 2018).

Sin embargo, existe otro punto de vista diferente sobre el poder de decisión del uso del agua, una publicación reciente sobre el tema de quién tiene poder de decisión del acceso y uso del agua propone este caso coyuntural como un prototipo de licencia social, para ello es necesario desarrollar un proyecto con negociación continua entre comunidad local y empresa, que se puede llamar a esta etapa la socialización, donde se forma parte los *stakeholders* o también llamadas partes interesadas, para lograr una resolución constructiva de los conflictos (Boutilier y Thomson, 2019).

Este punto de la socialización es un requisito para obtener la licencia de funcionamiento, sin embargo, existe dudas de la forma real de actuar, dentro de los parámetros normativos, como legales de ambas partes, algunos casos reales de empresas mineras que operan en Bolivia respecto a su gestión del agua son:

La empresa Minera San Cristobal, la empresa ha tomado bajo su responsabilidad tareas del Municipio de Colcha K, para abordar las preocupaciones de gestión del agua de la comunidad (Elizalde y Córdoba, 2015). Las estrategias propuestas por la COMIBOL conducida por su Dirección dedicada al área, los indicios de su efectividad son pocos respecto a la construcción del dique de colas *Willa Kholu*, que se dio por la emergencia ante la contaminación, provocada en gran medida por la actividad minera de Huanuni, establecido por Decreto Supremo 335 de 2009, pero recién comenzó a ejecutarse en 2016 pero no está en funcionamiento (Periódico La Patria, 2019).

## **2. Avances y aportes del país de Chile respecto a la reutilización de aguas ácidas de empresas mineras**

El país de Chile respecto al sector minero ocupa un lugar destacado en la minería cuprífera de la que se analizó la demanda del consumo de agua y energía en base a una proyección que tiene para el 2029 aproximando un incremento de consumo de agua del 55 % respecto a la información del 2018 (Montes y Cantallopts, 2018).

El cobre es uno de los metales que tiene las mayores reservas del mundo, de acuerdo a sus datos estadísticos, el 2017, produjo 5,5 millones de toneladas de cobre, que representaron aproximadamente un tercio de la producción total mundial y espera producir 7.1 millones de toneladas en 2029 (Concha A., Amaya, y Marcelo, 2020). Estos datos cuantitativos basados en información histórica y que en la actualidad trabajaron mejor la recopilación de datos, les ayuda a tener proponerse una meta tan clara, como el incremento de su productividad la cual afecta directamente en el consumo del agua, al ser una región que tiene escasez de agua es una causa de motivación y necesidad para implementar el enfoque de economía circular en la minería respecto a consumo del agua.

En el caso particular de Chile trabajando que liderado por la Universidad de Concepción, recabaron información actual respecto a la minería y el agua, el equipo responsable de realizar este trabajo fue un comité quienes a través del CRHIAM - Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería fundado el 2014 en el marco del quinto concurso del Fondo de FONDAP - Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias, que se encuentra asociado con las Universidad de Concepción en asociación con la Universidad de La Frontera y la Universidad del Desarrollo, este centro se enfoca en la sostenibilidad hídrica en las áreas de agricultura y minería, está realizando un trabajo constante a través de capacitación, desde talleres hasta cursos en nivel superior, información documental, incentivo a investigaciones, incorporación de investigadores en el área, entre otras actividades para la población en general, efectuaron este trabajo, plasmando la información en un documento amplio que

detalla la situación actual hídrica en Chile (CRHIAM , s.f.).

En el informe Minería, Energía y Agua - Situación Actual, explica dos procesos que aplican para tratar los minerales de cobre, la primera es la Hidrometalurgia para los óxidos y la segunda es la Concentración para los sulfuros, sin embargo, también menciona que tienen algunos problemas que son un reto para ser tratados adecuadamente ya que depende de eso, como ser los daños de la tierra por la cantidad de producción de relaves que son desechos generados en las piscinas de flotación para la separación del mineral, como especifica el caso de Cholla:

“Cholla éxito de producción y para así cumplir con el 7.1 millones de toneladas en 2029 si se materializan todos los planes de expansión [...] los relaves actualmente son 1,4 millones toneladas por día y considerando el aumento de la producción este asciende a 1,6 millones toneladas por día en 2029, [...] la disminución de las leyes de cobre que está directamente relacionada con el aumento del procesamiento de estos minerales y la cantidad de agua utilizada, otro problema es, la contaminación del agua en la industria del cobre es el Drenaje Ácido de Minas, que se originan en las etapas de degradación de sólidos, la lixiviación y cianuración en hidrometalurgia” (Concha, Amaya, y Vergara, 2020, págs. 9-19).

Los problemas que no tienen relación a los anteriores, pero si afecta a su producción son: La fluctuación del precio del cobre, la energía para realizar sus operaciones aduaneras que tribuyen a ser un conflicto político técnico y ven como alternativa las energías renovables. Sin embargo, al referirse a mayor producción de relaves significa que la piscina de flotación deberá tener mayores dimensiones lo cual significa un incremento en el volumen del agua que tendrá que almacenar.

Las fuentes de agua a las que recurre el país de Chile para la actividad minera son el agua continental, el agua de origen oceánico y las aguas recuperadas y recirculadas al proceso minero. La primera considera todos los cuerpos de agua permanentes que se encuentran en el interior, alejados de las zonas costeras. Estas aguas son aguas superficiales como lluvia, ríos, lagos y sistemas salinos del interior y aguas subterráneas provenientes de acuíferos

alimentados principalmente por glaciares. Las aguas de origen oceánico vienen del mar y tienen un alto contenido salobre. Por su parte, las aguas recirculadas corresponden a todos aquellos flujos que son reinyectados al sistema, estos pueden ser previamente tratados o no. El agua total es aquella necesaria para mantener a régimen el proceso productivo y corresponde al total de entrada de aguas, la cual puede provenir de distintas fuentes, 39% de aguas subterráneas, 38.6% de aguas superficiales, 15.2% de agua de mar y 6.7 de otras (Concha, Amaya, y Marcelo, 2020).

Haciendo el enfoque respecto al problema del agua se enfoca en las variables de temperatura y precipitación para determinar la disponibilidad del agua, categorizando las zonas en cinco macro regiones, esto porque Chile debido a su zona geográfica tiene más escasez de agua, también afirma que el agua de mar por su composición salina no cumple con las características para los procesos de flotación, que en la minería marina el agua que usan es mínimo su consumo pero esta no puede ser reutilizada [...] en relación a la minería subterránea a cielo abierto o cerrado donde la demanda del agua oscila por el 13.61 m<sup>3</sup>/s, donde el proceso de flotación requiere un contenido de agua de alrededor del 70% (Concha, Amaya, y Marcelo, 2020).

En Chile están aplicando medidas para reducir el consumo del agua para la minería de acuerdo a sus fuentes de abastecimiento mencionadas anteriormente, sin embargo, se rescata aquellas que podrían replicarse y que no tienen como fuente de abastecimiento el agua de mar, debido que la hidrometalurgia consume una menor cantidad de agua, la que no es recuperada después de su uso, al contrario de la minería subterránea (Concha, Amaya, y Marcelo, 2020).

En 2019, el Gobierno chileno acordó una nueva norma respecto al tratamiento de relaves, que consiste en aquellas empresas que solicitan permisos para nuevos proyectos de minería, deberán tratar algunos de los 170 depósitos de relaves abandonados en el país, esta es considerada como una medida compensatoria (Harris, 2019).

Oblasser (2021) Gerente de sustentabilidad Fundación Chile en el video publicado en YouTube titulado Minería 360 | Capítulo 12: La economía circular en la minería. Los empresarios mineros estaban expuestos a la escases del agua por sequias y conflictos sociales, ahora ya se abastecen mejor y reducen el consumo de agua continental, la economía circular tiene relación con la sostenibilidad en toda la cadena de valor, que ayuda a proporcionar mejores estimaciones con la implementación de economía circular en las compañías mineras, diseñando propuestas y estableciendo metas, un avance destacable es que cuentan con resultados y proyecciones de residuos de relaves que ayuda a realizar el reciclado de metales, como ser el cobre que es 100% reciclable (CNN Chile, 2021).

Respecto a la normativa o estructura de las entidades estatales para impulsar la implementación de economía circular, el país de Chile realizó reestructuración del Ministerio del Medio Ambiente, como se puede apreciar en su página oficial, creando el área de Economía Circular que cumple funciones en relación a la transición al modelo de Economía Circular en todo tipo de actividad de producción, también como menciona Rojas (2022) ministra de medio ambiente en Chile, anhela empezar a implementar la ley marco de cambio climático que próximamente será aprobada y promulgada, es así que en el ámbito del agua se compromete en trabajar respecto a la gestión de cuencas en base a mesas de análisis, [...] con la nueva Constitución será una Carta Magna muy centrada en el cuidado del medioambiente (González, 2022).

### **3. ¿Qué dificultades existen para implementar la EC - economía circular en la minería para reutilizar el DAM – drenaje ácido en mina?**

La implementación de la economía circular está actualmente avanzando en diferentes ámbitos en la manufactura, sin embargo, en la minería aún se está realizando propuesta por el alto nivel de contaminación.

Las dificultades para aplicar la economía circular como mayor

barrera es romper hábitos arraigados en todos los que componen la cadena de suministro, como ser los fabricantes, los consumidores y usuarios, la otra parte difícil es convencer a los decisores políticos (y al público) que los recursos naturales no renovables deben minimizarse el consumo de recursos vírgenes y la reutilización puede ayudar a la economía a través del desacoplamiento de los modos de producción y consumo para reducir los niveles mundiales de desigualdad social (Fischer-Kowalski y Swilling, 2011).

Según (Cansi y Cruz, 2020) para abordar la reutilización del agua con el enfoque de economía circular se debe investigar las oportunidades y riesgos, ya que es una herramienta clave para aumentar la fiabilidad del suministro de agua frente a innumerables incertidumbres, así como demostrando su eficacia en la gestión del recurso aplicando una mentalidad holística y sistémica.



porque es imprescindible para la actividad minera y se evidenció muchos desastres de contaminación de ríos, cuencas, suelos por el mal manejo, así como los escasos del agua para el consumo. Con esos antecedentes se esperaba obtener información de datos históricos del consumo de agua, sin embargo, solo se obtuvo información muy general y antigua, publicado en una cartilla digital del ministerio de medio ambiente y agua de Bolivia, donde solo cita los procesos de la actividad minera que requieren de altos niveles de agua. Se investigó páginas web, búsqueda de informes anuales, noticias o similares que proporcione datos mas cuantitativos, pero no se pudo obtener esta información como se esperaba.

Se recurrió a información internacional relacionada al ODS 6 porque Bolivia es miembro de la ONU y parte de la agenda 2030, al visitar plataformas oficiales se evidenció la inexistencia de datos. Al realizar esta revisión fue interesante ver como otros países si cuantificaban sus metas con datos de diferentes gestiones y se podía observar si hubo incremento o no, pero en este caso no se pudo ver ninguna conducta por falta de información.

Bolivia nos cuenta con información actualizada del ODS 6 que está conformado por indicadores para reducir el consumo del agua, el no proporcionar información actual y real es una limitante para optar a buenos financiamientos de entidades extranjeras no gubernamentales que trabajan para colaborar a los países en desarrollo ayudando a cumplir con los indicadores de los ODS de la agenda 2030. Esta información del estado de los indicadores se puede apreciar en el Tablero de control países de América Latina y el Caribe ODS (COPS, 2020). También, en el reporte publicado en junio 2021 de la ONU denominado Informe Nacional Voluntario 2021, donde el ODS 6, agua limpia y saneamiento planeta la meta 6.3, donde únicamente reflejan datos de la calidad hídrica que es una medición anual del porcentaje de masas de agua de buena calidad, esto es una medición de masas de agua en cuencas, ríos en 21 puntos de monitoreo a nivel nacional y los más recientes datos que expone son del 2019 (ONU, 2021). Esta es otra evidencia de la inexistencia de datos actualizados.

No se encontró información de medición de aguas residuales generadas por la actividad minera, tampoco existen indicios que en Bolivia se realiza monitoreos y medición del consumo del agua. Esto dificulta a reflejar resultados o avances, tampoco podremos establecer metas o indicadores que nos ayuden a conocer la evolución en economía circular.

A falta de información nacional e internacional, se optó a buscar casos de estudio o empresas mineras en Bolivia, como investigaciones que apliquen la reutilización de aguas residuales, en este punto se encontraron mas trabajos enfocados en la reutilización de lodos, muchos en el departamento de Oruro o trabajos de investigación de la universidad estatal de Oruro UTOP, respecto al consumo del agua o reutilización de este recurso como residuo en Bolivia hay carencia de esta información. Se identificó un proyecto de un complejo minero en Potosí Bolivia, el proyecto ROYAL el diseño de este proyecto contempla en realiza la reutilización del agua ácida, está en la etapa de construcción no se encuentra en ejecución, sin embargo, al visitar dicho proyecto mencionaron una preocupación respecto a la gestión del agua que esta debía ser conciliada por muchas partes involucradas externos al proyecto, como ser entidades estatales y comunarios de la zona.

Indagando respecto a la normativa minera en relación a la gestión del agua, se encontró cierta ambigüedad pese a las actualizaciones normativas realizadas, el problema radica en que otorga cierta responsabilidad del uso de agua, sin embargo, no contempla la reutilización del agua ácida, quién y cómo gestionarla. Aquí podría una institución estatal o de investigación en primera instancia indagar respecto a la existencia de aguas residuales en abandono, métodos y herramientas para la reutilización así poder estructurar una normativa para su gestión.

Investigando instituciones estatales que intervienen en la actividad minera para identificar cuáles se encargan o tienen como objetivo el medir el consumo del agua y su tratamiento, se encontraron instituciones como ser; AJAM Autoridad Jurisdiccional Administrativa Minera encargada de administrar, registrar, controlar y fiscalizar la actividad minera, también

se re estructuró el organigrama del ministerio de minería y metalurgia en Bolivia por resolución ministerial n°213/2022 de fecha 15 /08 /2022, en este resalta la incorporación de áreas de Servicios, Investigación y Control que son: Centro de investigaciones metalúrgicas mineras CEIMM, Servicio geológico minero SERGEOMIN, Servicio Nacional de Registro y Control de Minerales y Metales SENARECOM, se esperaba obtener información respecto al consumo del agua en la minería, probablemente similares a los centros de investigación de Chile que realizan actividades recopilación de datos e información, monitoreos o apoyo como asesoramiento. Sin embargo, se identificó que el CEIMM con sede en el departamento de Oruro cuenta con cuatro unidades de investigación; Unidad de Geología, Unidad Minera, Unidad de metalurgia y Unidad Química, estas unidades ninguna contempla el consumo del agua o la gestión de residuos de este recurso en la actividad minera.

Todo esto refleja que, lo que no se mide no se controla, en Bolivia no se mide el consumo del agua en la minería que a grandes rasgos se percibe son altos volúmenes no cuantificados, no se realiza una reutilización de aguas ácidas, no hay normativa que regule esto, como una alternativa para evitar desastres ambientales, también existe abandono de aguas ácidas cuando concluye o fenece un proyecto minero, estas no tienen ningún tratamiento, recolección o gestión, no hay una norma posterior para remediar la gestión del agua residual que es de alto interés para las tres partes que son; el Estado, empresa mineras, comunarios.

### **Conclusiones**

Las conclusiones que se llegaron con el presente trabajo de investigación, donde se revisó y analizó información con relación a la importancia de la economía circular y la reutilización del agua residual en las actividades mineras, son:

Desde el enfoque medio ambiental, la implementación de economía circular es una necesidad actual que puede proyectarse a futuro como una estrategia competitiva en la actividad minera, por ello, sino empezamos a

actuar en Bolivia, el país vecino Chile que también es un competidor directo en exportación de minerales puede tomar una gran ventaja al implementar la economía circular en la minería, reduciendo sus costos de producción, aplicando una minería verde, esto le puede ayudar a desarrollar buenas alianzas estrategias con empresas internacionales que también están con la mirada en implementar economía circular.

Desde el enfoque del consumo del agua, en Bolivia no sufrimos un nivel de escases de agua como el país vecino Chile, pero haciendo un análisis de costo beneficio el consumo de agua potable es mayor que la reutilización del mismo residuo de agua que se genera por los procesos en la minería, esto afecta al costo final de producción.

Como resultados se identifica que existen muchas causas que generan dificultades en poder iniciar la implementación de la Economía Circular en el Estado Plurinacional de Bolivia, como se puede observar en la Figura 3. La normativa como estudios de investigación para recoger información cuantitativa de la disponibilidad del agua para la actividad minera carecen de información actualizada, ambas pueden ser las causas más importantes e influyentes para posponer la implementación de la economía circular, porque es necesario conocer la realidad actual respecto al consumo del agua en la actividad minera y la disposición en volúmenes de aguas residuales en estado de abandono.

Para resolver este problema es necesario que instituciones, científicas, estatales, gubernamentales, privadas que puedan subsanar las causas identificadas en las dimensiones Mediciones, Método y Medioambiente de la FIGURA 3. Es decir, primeramente, deban realizar mediciones del consumo del agua en la minería, posteriormente es importante contar con un área de economía circular o un instituto donde se centralice toda la información para proponer e impulsar la Economía Circular y que ésta en el mejor de los casos sea dependiente o trabaje juntamente con el estado boliviano.

Sin embargo, es necesario tomar en cuenta a las empresas mineras ya existentes, por la calidad de profesionales que tienen, años de experiencia

en la extracción de metales, dominio de sus procesos, ya que con ellos se podría crear instrumentos, guías como ser; hojas de rutas, manuales o instructivos, así también desarrollar sistemas de bases de datos para almacenar información histórica del manejo del DAM y el consumo del agua de las distintas empresas metalúrgicas, y que ellos irían alimentando información. Con esto se trataría de subsanar las causas identificadas de las dimensiones Mano de Obra, Material, Mediciones en la FIGURA 3.

Para tener un mayor alcance y eficiencia en la implementación de Economía Circular y por la complejidad de la actividad minera se sugiere trabajar conjuntamente como una simbiosis industrial en la que podrían converger áreas como ser: la creación de máquinas o equipos, construcción de diques y piscinas de tratamiento que faciliten la separación de residuos para la reutilización del drenaje ácido, tecnología o instrumentos de medición que ayuden a realizar un mejor.

### Referencias.

- Aduvire, O. (2019). Recuperación de subproductos con valor económico. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 4(2519–5352), 55–64. [http://www.scielo.org/bo/pdf/mamym/v4n1/v4n1\\_a06.pdf](http://www.scielo.org/bo/pdf/mamym/v4n1/v4n1_a06.pdf)
- Bartels, R., & Morrison, H. (2019). *¿Puede la minería operar bajo la economía circular? La minería y los metales pueden ser ganadores en la economía circular*. <https://gerens.pe/blog/economicircular-metales-bartels-morrison/>
- Boutilier, R., & Thomson, I. (2019). *The Story of the San Cristobal Mine*. Routledge. <https://www.routledge.com/The-Social-License-The-Story-of-the-San-Cristobal-Mine/Boutilier-Thomson/p/book/9781138579699>
- Campanini, O. (2012). El Agua para la minería. In *PETROPRESS* (Vol. 5). <https://cedib.org/wp-content/uploads/2013/01/El-agua-para-la-mineria.pdf>
- Cansi, F., & Cruz, M. (2020). “Agua nueva”: notas sobre sostenibilidad de la economía circular. *Sustainability Economic Social and Environmental*, 2, 49. <https://doi.org/10.14198/sostenibilidad2020.2.04>

- CNNChile. (2021). *Minería 360 | Capítulo 12: La economía circular en la minería*. <https://www.youtube.com/watch?v=3M-JBbExYTU>
- Concha, F., Alvez, A., y Vergara, M. (2020). Minería, Energía Y Agua - Situación Actual. In *Serie comunicacional, CRHIAM* (Vol. 4, Issue ISSN 0719-3009). <https://drive.google.com/file/d/1CKS82Vjl2H7CQw4GY2RRHxdcUDWSfhkg/view>
- COPS. (2020). Cods, 2020. Índice ODS 2019 para América Latina y el Caribe. Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina y el Caribe: Bogotá, Colombia. In *Índice ODS 2019 para América Latina y el Caribe*. [https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2019/2019\\_lac\\_sdg\\_index.pdf](https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2019/2019_lac_sdg_index.pdf)
- CRHIAM. (n.d.). *CRHIAM Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería*. <https://www.crhiam.cl/quienes-somos/sobre-crhiam/>
- Cuatrecasas, L., y González, J. (2017). Gestión de la Calidad y su Mejora. Herramientas. In T. (Profit E. de Grácia (Ed.), *Gestión Integral de la Calidad* (5ta ed., pp. 63–101). Liberdúplex. [www.profiteditorial.com](http://www.profiteditorial.com)
- Da-Silva, M., y Pasold, C. (2019). La reutilización del agua en el ámbito de la economía circular y sostenibilidad. *Revista Chilena de Derecho y Ciencia Política*, 10, 155–172. <https://doi.org/10.7770/rchdcp-V10N2-art2024>
- Devisscher, T. (2008). Informe temático sobre desarrollo humano en Bolivia. In *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Bolivia*. <https://www.plataformaintegraldemineria.org/sites/default/files/2018-11/Cinco siglos de acumulación de costos socioambientales La actividad minera en Bolivia.pdf>
- Edafotec. (2020). *Cierre de minas y economía circular: técnicas sustentables para el tratamiento de agua ácida de mina*. <https://www.youtube.com/watch?v=dSmBFkMbDLU>
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2014). *Ley Nro. 535 Ley de Minería y Metalurgia* (pp. 1–95). [http://www.autoridadminera.gob.bo/public/docs/ajam/juridica/normativa/LEY\\_535\\_DE\\_MINERIA\\_Y\\_METALURGIA.pdf](http://www.autoridadminera.gob.bo/public/docs/ajam/juridica/normativa/LEY_535_DE_MINERIA_Y_METALURGIA.pdf)
- Fischer, M., y Swilling, M. (2011). Desacoplar. El Uso de los Recursos Naturales y los Impactos Ambientales del Crecimiento Económico. In *Pnuma*. <http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/50244/>

- publications/Decoupling\_Summary\_Spanish.pdf
- González, C. (2022, April). Maisa Rojas, futura ministra del Medio Ambiente: “Me gustaría que la economía circular lograra permear a los otros ministerios.” *Entrevista*. <https://www.paiscircular.cl/medio-ambiente/maisa-rojas-futura-ministra-del-mma-me-gustaria-que-la-economia-circular-permee-a-los-otros-ministerios-y-no-sea-solo-una-oficina-del-ministerio/>
- Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2009). Herramientas Básicas para Seis Sigma. In R. Del Bosque (Ed.), *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma* (2da ed., pp. 138–171). Mc Graw Hill. <https://www.uv.mx/personal/ermeneses/files/2018/05/6-control-estadistico-de-la-calidad-y-seis-sigma-gutierrez-2da.pdf>
- Harris, P. (2019, March 17). Mineros de Chile ayudarán a limpiar relaves.pdf. *Mining Journal*. <https://www.mining-journal.com/sustainability/news/1359668/chile-miners-to-help-tailings-clean-up>
- Honorable Congreso Nacional. (1997). *Ley N° 1777 código de minería*. [https://www.udape.gob.bo/portales\\_html/portalsIG/atlasUdape1234567/atlas09\\_2007/documentos/Código de Minería.pdf](https://www.udape.gob.bo/portales_html/portalsIG/atlasUdape1234567/atlas09_2007/documentos/Código de Minería.pdf)
- Hurtado, A. M. (AIDIMME), & Jordá, L. (AIDIMME). (n.d.). simbiosis industrial como herramienta del paradigma de la economía circular. In *AIDIMME: Vol. 1116/MENKE* (pp. 1–22). [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/CT\\_2018/222224264.pdf#prologue.pdf%0Ahttp://ec.europa.eu/echo/civil\\_protection/civil/pdfdocs/earthquakes\\_en.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2011.06.005%0Ahttp://](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/CT_2018/222224264.pdf#prologue.pdf%0Ahttp://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/earthquakes_en.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2011.06.005%0Ahttp://)
- Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). On borrowed time. In MacMillan (Ed.), *Waste to wealth, the circular economy advantage* (1st ed., p. 263). Palgrave MacMillan. [https://books.google.com.bo/s?hl=es&lr=&id=DmKkCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Lacy+P.+%26+Rutqvist+J+\(2015\),+“Waste+to+wealth:+the+circular+economy+advantage”&ots=7XOLwI7Q79&sig=xQaEM-nsDilvWb67yBvAlfXxS\\_k#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.bo/s?hl=es&lr=&id=DmKkCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Lacy+P.+%26+Rutqvist+J+(2015),+“Waste+to+wealth:+the+circular+economy+advantage”&ots=7XOLwI7Q79&sig=xQaEM-nsDilvWb67yBvAlfXxS_k#v=onepage&q&f=false)
- Ley N° 1333. (1992). Ley N° 1333 Del Medio Ambiente. *Ley Del Medio Ambiente*, 1(1333), 129. <http://www.mmaya.gob.bo/uploads/>

- documentos/ley\_1333.pdf
- Madrid, E., Zubieta, L., Córdova, R., & Saavedra, C. (2018). *Gestión de cuencas en áreas con actividad minera: La experiencia en río Blanco y Chairó Huarinilla*. <https://www.eda.admin.ch/dam/countries/countries-content/bolivia/es/Mineria.pdf>
- Marchi, B., Zaroni, S., & Zavanella, L. (2017). Symbiosis between industrial systems, utilities and public service facilities for boosting energy and resource efficiency. *Energy Procedia. International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT, 4*, 544–550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.006>
- Mart, A., & Porcelli, A. (2018). *Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte)*. *22(2313–1861)*, 303–333. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21503/lex.v16i22.1659>
- Méndez, M. (IBNORCA). (2012). Herramientas para el seguimiento del Sistema de Gestión de Calidad. In M. (IBNORCA) Méndez (Ed.), *Diagrama Causa Efecto* (p. 106). IBNORCA, Instituto Boliviano de Normalización.
- Miranda, E., Heredia, I., Guzmán, L., & Iñiguez, P. (2013). *Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales*. <https://www.bivica.org/files/aguas-residuales-reuso.pdf>
- Montes, C., & Cantallops, J. (2018). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029*. [https://www.cochilco.cl/ListadoTemtico/proyeccion agua minería del cobre 2018-2029 - vf.pdf](https://www.cochilco.cl/ListadoTemtico/proyeccion%20agua%20mineria%20del%20cobre%202018-2029%20-%20vf.pdf)
- Narrea, O. (2018). *La minería como motor de desarrollo económico para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 8, 9, 12 y 17*. [https://www.up.edu.pe/egp/Documentos/agenda\\_2030\\_la\\_mineria\\_como\\_motor\\_de\\_desarrollo\\_economico\\_para\\_el\\_cumplimiento\\_de\\_los\\_ods\\_8\\_9\\_12\\_y\\_17.pdf](https://www.up.edu.pe/egp/Documentos/agenda_2030_la_mineria_como_motor_de_desarrollo_economico_para_el_cumplimiento_de_los_ods_8_9_12_y_17.pdf)
- Periódico La Patria. (2019, June 2). *Aguas contaminadas de la minera Huanuni siguen afectando a Machacamarca*. 1. <https://impresa.lapatria.bo/noticia/352331>
- REPSOL Global. (2022). Economía circular. In *Economía circular* (Issue 401). <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/economia-circular/>

- index.cshtml
- Roche, M., Fernandez, C., Aliaga, A., Peña, J., Salas, E., & Montaña, J. L. (2012). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia*. [https://www.bivica.org/files/balance-hidrico\\_Bolivia.pdf](https://www.bivica.org/files/balance-hidrico_Bolivia.pdf)
- ROMAN/Consultora. (2020). *Complejo metalúrgico royal resumen ejecutivo* (Issue 15126).
- Schröder, P., Albaladejo, M., Ribas, P., MacEwen, M., & Tilkanen, J. (2020). Liberando la economía circular en América Latina y el Caribe, Oportunidades para fomentar la resiliencia. In *Chatham House*. <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-01/2021-01-13-spanish-circular-economy-schroder-et-al.pdf>
- Segerson, K., Pearce, D., & Turner, K. (1991). Economics of Natural Resources and the Environment. In J. H. U. Press (Ed.), *Land Economics* (Vol. 67, Issue 2). Johns Hopkins University Press. <https://doi.org/10.2307/3146419>
- SLC - Sociedad Latinoamericana para la Calidad. (2000). *Los cinco por qué's*. <http://umc.edu.ve/pdf/calidad/Cinco Por Que.pdf>
- Viana, R. (2018). Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 617–631. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>
- Villegas, P. (2005). Los recursos naturales en Bolivia. In *Centro de comunicación e información Bolivia CEDIB*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-60984-5.00062-7>
- Zamora, G., & Hinojosa, O. (2019). Economía Circular en minería- Caso de estudio: Producción Minera de Concentrados mde Pb-Ag-Zn en Bolivia. *Revista Del Medio Ambiente Minero y Minería*, 4. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522019000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522019000100001&script=sci_arttext)

