

Implementation of circular economy systems for sustainable water management in the Mining Industry

Elmer Alexis Díaz Quiroz, Bachelor of Engineering ¹; Juan Miguel Ramírez Núñez, Bachelor of Engineering²
Iselli Josylin Nohely Murga Gonzalez, Master of Science ³
^{1,2,3}Private University of the North, Peru, N00286415@upn.pe, N00277718@upn.pe, iselli.murga@upn.edu.pe

Abstract– The circular water economy in the mining sector seeks to maximize the efficient use of this resource by integrating sustainable practices into the various production processes. Among the most notable strategies are water recycling and reuse, advanced tailings dewatering, and wastewater treatment, all aimed at reducing environmental impact and promoting responsible water management.

The objective of this research is to analyze the main strategies and methodologies associated with the circular water economy in mining. To this end, a systematic review of scientific literature was conducted, including academic articles, technical reports, theses, and government documents. These studies show that efficient water management requires coordination across multiple levels and the implementation of technologies tailored to the context.

Three cases were analyzed in which wastewater treatment and reuse systems were integrated, demonstrating the technical feasibility and positive impact of these technologies in different mining environments. The results indicate that, although solutions must be adapted to geographical and operational specificities, the circular water economy represents an effective alternative for improving sustainability in mining.

Keywords--Circular economy, mining, water resources, wastewater, clean technologies.

Implementación de sistemas de economía circular para la gestión sustentable del agua en la Industria Minera

Elmer Alexis Díaz Quiroz, Bachiller en Ingeniería¹; Juan Miguel Ramírez Núñez, Bachiller en Ingeniería²; Iselli Josylin Nohely Murga Gonzalez, Master en Ciencias³

^{1,3}Private University of the North, Peru, N00286415@upn.pe, N00277718@upn.pe, iselli.murga@upn.edu.pe

Resumen—*La economía circular del agua en el sector minero busca maximizar la eficiencia en el uso de este recurso, integrando prácticas sostenibles en los distintos procesos de producción. Entre las estrategias más destacadas se encuentran el reciclaje y la reutilización del agua, la deshidratación avanzada de relaves, y el tratamiento de aguas residuales, todas orientadas a reducir el impacto ambiental y promover una gestión hídrica responsable.*

El objetivo de esta investigación es analizar las principales estrategias y metodologías asociadas a la economía circular del agua en la actividad minera. Para ello, se realizó una revisión sistemática de literatura científica, incluyendo artículos académicos, informes técnicos, tesis y documentos gubernamentales. Estos estudios evidencian que una gestión eficiente del agua requiere una coordinación entre múltiples niveles y la implementación de tecnologías adaptadas al contexto.

Se analizaron tres casos en los que se integraron sistemas de tratamiento y reutilización de aguas residuales, logrando demostrar la viabilidad técnica y el impacto positivo de estas tecnologías en diferentes entornos mineros. Los resultados indican que, aunque las soluciones deben adaptarse a las particularidades geográficas y operativas, la economía circular del agua representa una alternativa eficaz para mejorar la sostenibilidad en la minería.

Palabras claves—*Economía circular, minería, recursos hídricos, aguas residuales, tecnologías limpias.*

I. INTRODUCCIÓN

A. Realidad Problemática

La presente investigación se centra en el crecimiento sostenido de las actividades mineras, las cuales generan una elevada demanda del recurso hídrico, planteando importantes desafíos en términos de gestión integral y sostenibilidad ambiental. Esta situación ha generado desequilibrios significativos en los ecosistemas por introducir gran cantidad de carga contaminante o consumiendo desmesuradamente este recurso natural, afectando negativamente el desarrollo de la producción minera industrial. Esta presión sobre los recursos naturales compromete su disponibilidad a largo plazo, sin embargo, se han identificado soluciones técnicas efectivas orientadas a optimizar la gestión y reutilización del recurso hídrico mediante la implementación de sistemas de circuito cerrado que permiten recircular el agua dentro de los procesos mineros que presentan alta demanda de este insumo, estas tecnologías no solo reducen la extracción de agua fresca, sino que también fortalecen la sostenibilidad operativa al minimizar el impacto ambiental asociado a la actividad extractiva [1].

En este escenario, la economía circular se presenta como un enfoque estratégico que busca regenerar los sistemas naturales minimizando tanto la extracción de materias primas vírgenes como la generación de residuos. Específicamente, la economía circular del agua surge como una solución innovadora para mitigar los impactos ambientales del sector minero al promover el uso continuo del recurso a través de tecnologías que facilitan su mantenimiento, reutilización, reparación, restauración, reciclaje y prefabricación. Este enfoque requiere un diseño técnico orientado al ciclo de vida del agua en los procesos industriales, impulsando el desarrollo de soluciones sostenibles desde la ingeniería y la innovación tecnológica [2].

Según lo expuesto por la referencia [3][4], la economía circular en el ámbito minero representa un cambio estructural respecto al modelo económico lineal tradicional, el cual se basa en la lógica de extraer, utilizar y desechar recursos, esta nueva perspectiva propone una transición hacia sistemas más sostenibles en los que se maximiza la eficiencia en el uso de los insumos y se minimiza la generación de residuos a través de la implementación de estrategias que priorizan la reutilización de materiales, el reciclaje interno, la valorización de subproductos y la recuperación de recursos dentro de los mismos procesos productivos, estas acciones permiten cerrar los ciclos de materia y energía, alineándose con los principios de eficiencia operativa.

Este enfoque no solo contribuye a reducir la huella ambiental del sector minero, sino que también se traduce en beneficios económicos tangibles: disminución de costos operativos, optimización del consumo de recursos naturales, mayor resiliencia frente a la escasez hídrica y mejora en la percepción socioambiental de la actividad extractiva [5].

La Tabla I presenta un resumen detallado de las definiciones y enfoques conceptuales de la economía circular, recopilados por diversos autores relevantes en el campo. Estas descripciones se seleccionaron como parte de la revisión sistemática realizada para esta investigación y reflejan distintas perspectivas teóricas y metodológicas que enriquecen el análisis de la aplicación de los principios circulares en la gestión de recursos, especialmente en contextos industriales como la minería.

TABLA I
DESCRIPCION DE ECONOMIA CIRCULAR

Economía Circular y gestión del Agua	Estrategias de economía circular
Según Fernandes y Marques [6], la economía circular aplicada al agua se orienta a la integración de soluciones tecnológicas que favorezcan el reúso, la recuperación y la reducción de consumo hídrico, en respuesta a la creciente escasez global. Esta visión estratégica permite cerrar ciclos de agua dentro de sectores intensivos, como la minería, a través de prácticas sostenibles y tecnologías de purificación avanzadas, lo que promueve un uso responsable y resiliente del recurso.	Michaux et al. [7] enfatizan que una estrategia circular en minería requiere la incorporación de circuitos internos de recirculación de agua dentro de las plantas de flotación. Esto se logra mediante tecnologías que permiten reutilizar el agua de proceso, disminuyendo tanto el volumen de extracción como el de efluentes. Esta estrategia reduce costos operativos y fortalece la sustentabilidad del proceso extractivo al minimizar impactos ecológicos directos.
Sostenibilidad y responsabilidad corporative	Impacto de la industria minera
Rodríguez et al. [8], proponen una metodología basada en la huella hídrica para evaluar el compromiso de las empresas mineras con la sostenibilidad. Esta herramienta facilita decisiones corporativas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, permitiendo cuantificar el impacto del agua en cada fase del proceso productivo y fomentando una cultura organizacional orientada a la transparencia, eficiencia y regeneración de recursos.	Arenas et al. [9], destacan que las operaciones mineras a gran escala pueden alterar significativamente el balance hídrico regional, incrementando presiones sobre ecosistemas locales. El estudio argumenta que la implementación de prácticas circulares y la gestión integrada del recurso permiten mitigar estos efectos, transformando la minería en una actividad menos intensiva en recursos y más adaptada a condiciones de estrés hídrico.

En este contexto, los sectores industriales con alta demanda de recursos hídricos, como el minero enfrentan retos estructurales adicionales que ralentizan el cambio hacia una economía circular. Uno de los principales desafíos es la persistente brecha entre el compromiso ambiental expresado y la ejecución concreta de estrategias sostenibles. Esta distancia se refleja en la limitada capacidad de articulación entre las políticas públicas y las iniciativas privadas, así como en la falta de mecanismos efectivos para fomentar la innovación en el uso eficiente del agua. A ello se suma la inercia de operar bajo esquemas productivos lineales, con escasa integración de tecnologías que promuevan el reúso, reciclaje o tratamiento del recurso hídrico dentro del proceso industrial [10].

Uno de los impactos más críticos de la actividad minera es la contaminación del agua, causada por la liberación de metales pesados, ácidos y sólidos en suspensión, los cuales deterioran gravemente la calidad de los cuerpos de agua cercanos a las zonas de explotación [10]. Esta situación se ve agravada por el uso ineficiente del agua en los procesos extractivos y una gestión deficiente de los relaves, que suelen contener sustancias químicas altamente tóxicas como el cianuro y el arsénico [11]. Bajo la perspectiva del autor en la referencia [11], la presencia de estos compuestos no solo afecta a los ecosistemas acuáticos, sino que compromete la

disponibilidad de agua limpia, exacerbando tanto la crisis hídrica como los conflictos socioambientales en las comunidades aledañas.

Ante el crecimiento sostenido de la demanda global de metales, la industria minera se posiciona como un sector estratégico para el desarrollo económico y tecnológico de mediano y largo plazo. Este contexto requiere una transformación profunda basada en la adopción de tecnologías disruptivas que optimicen el uso de recursos naturales y reduzcan los impactos ambientales. La digitalización, automatización y aplicación de soluciones inteligentes emergen como herramientas fundamentales para acelerar la transición hacia modelos circulares, mejorando no solo la eficiencia operativa, sino también la sostenibilidad integral del sector extractivo [12].

En el ámbito de la gestión hídrica, la economía circular se concibe como un modelo orientado al reaprovechamiento continuo del recurso, promoviendo su uso eficiente y sostenible a lo largo de todo el ciclo hidrológico. En este contexto, la International Water Association (IWA) ha propuesto un enfoque integral basado en el principio de las 5Rs: reducir, reutilizar, reciclar, restaurar y recuperar. Este marco metodológico busca optimizar la administración del agua mediante acciones específicas: la reducción se refiere a minimizar las pérdidas de agua en su estado natural o puro; la reutilización implica emplear el recurso con un mínimo tratamiento en procesos internos, siempre que las condiciones técnicas y sanitarias lo permitan; el reciclaje consiste en tratar y reincorporar el agua y las aguas residuales, disminuyendo así la demanda de agua potable; la restauración apunta a devolver el recurso al ecosistema en condiciones ambientales adecuadas; y la recuperación hace referencia a la extracción de recursos valiosos contenidos en las aguas residuales, como nutrientes o energía, contribuyendo a un ciclo más cerrado y eficiente [13].

En el sector minero, la aplicación de estos principios resulta crucial para mitigar los impactos ambientales y sociales derivados de sus operaciones, especialmente en relación con la contaminación hídrica [14]. La adopción de medidas preventivas y correctivas, como el monitoreo continuo de los procesos, el tratamiento adecuado de residuos peligrosos y la implementación de tecnologías limpias, es indispensable para avanzar hacia una gestión sostenible del recurso. Además, la incorporación de la Responsabilidad Social Corporativa (RSC) desde una perspectiva circular refuerza este compromiso, al integrar prácticas que equilibran el crecimiento económico con la protección ambiental y el bienestar de las comunidades. A través de políticas de RSC orientadas a la economía circular, las empresas mineras pueden reducir significativamente su huella ambiental y optimizar el uso de los recursos naturales, contribuyendo así a un modelo de desarrollo más sostenible y resiliente [14].

La Tabla II presenta los beneficios que se derivan de aplicar los principios del *enfoque circular del agua en la industria minera*, destacando las ventajas que tiene implementar estas prácticas.

Tabla II
ENFOQUE CIRCULAR DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA:
PRINCIPIOS E INDICADORES

Principios de Ec. Circular	Uso	Beneficios
Gestión Eficiente del Agua	Reducir el consumo de agua a través de su reciclaje y reutilización dentro del ciclo productivo.	Ahorro de recursos hídricos, reducción de costos operativos y menor dependencia de fuentes externas de agua.
Tratamiento y Recirculación de Aguas Residuales	Procesar las aguas residuales para reutilizarlas en las operaciones mineras o vertirlas de forma segura.	Disminución de la contaminación ambiental, reducción de multas regulatorias y mejor aprovechamiento del recurso.
Uso de Fuentes Alternativas de Agua	Utilizar fuentes no convencionales como agua de lluvia o desalinización para reducir la presión sobre el agua dulce.	Diversificación de fuentes hídricas, mayor resiliencia ante escasez de agua y mejora en la sostenibilidad hídrica.
Minimización de la Huella Hídrica	Disminuir la cantidad de agua utilizada en todo el proceso productivo y reducir la generación de residuos líquidos.	Mejora de la eficiencia operativa, reducción del impacto ambiental y cumplimiento de normativas más estrictas.
Monitoreo y Control de la Contaminación	Controlar y monitorear continuamente la calidad del agua utilizada y vertida, cumpliendo con normativas ambientales.	Mejora de la reputación corporativa, mayor confianza de las comunidades locales y reducción de riesgos ambientales.

La ecología industrial, en estrecha relación con la economía circular del agua, se sustenta en diversos enfoques interconectados que buscan transformar los modelos tradicionales de producción y consumo hacia sistemas más sostenibles y resilientes. Inspirada en los principios de los ecosistemas naturales, esta disciplina propone que los residuos generados en un proceso productivo puedan ser utilizados como insumos en otros, promoviendo así un uso más eficiente de los recursos y una reducción significativa del impacto ambiental [15].

En el caso específico del sector minero, se trata de una actividad caracterizada por la transferencia masiva de materiales, en la que, para obtener apenas unos kilogramos — o incluso gramos— de metal valioso, se requiere mover grandes volúmenes de material sin valor económico. En este contexto, la gestión de residuos se convierte en un eje fundamental para avanzar hacia la sostenibilidad. Reducir su generación e impacto requiere la aplicación de mejores prácticas operativas, incluidas aquellas basadas en principios de circularidad. No obstante, cualquier estrategia debe estar precedida por un análisis riguroso que asegure su viabilidad

ambiental, económica y social, considerando que toda intervención industrial conlleva efectos sobre la estabilidad ecológica, los cuales deben ser compensados de manera adecuada [16].

Desde esta perspectiva, la minería sostenible implica una gestión proactiva de los residuos, particularmente de los relaves, enfocándose en el origen de los problemas ambientales. Para ello, se promueve la integración de tecnologías de procesamiento de minerales que permitan la eliminación de compuestos nocivos como la pirita y otros sulfuros mediante técnicas como la flotación, antes de su disposición final. Este enfoque no solo permite mitigar los impactos negativos, sino que también abre oportunidades para la recuperación de recursos valiosos, fortaleciendo así los principios de la economía circular en el ámbito extractivo [17].

B. Antecedentes de la Investigación

La referencia [18] presenta una propuesta orientada a la implementación del modelo de economía circular en la explotación de complejos mineros de plomo, plata y zinc (Pb-Ag-Zn). Este enfoque integral contempla la gestión eficiente de residuos mineros generados durante la etapa de explotación, así como de residuos orgánicos y aguas residuales provenientes de los campamentos mineros. Además, incluye el aprovechamiento responsable de los suelos ubicados en el entorno de las operaciones extractivas. La aplicación de esta propuesta no solo busca reducir el consumo de agua y energía en las actividades operativas, sino también disminuir significativamente los costos asociados al cierre ambiental de los sitios de disposición final de desmontes y relaves.

Por su parte, la referencia [17] plantea como objetivo central el aprovechamiento de las aguas residuales urbanas mediante un enfoque innovador denominado "minería de alcantarillado", el cual podría representar un cambio disruptivo en la gestión del recurso hídrico dentro de entornos urbanos. Este modelo propone la implementación de unidades compactas de tratamiento que integran tecnologías avanzadas junto con sistemas de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Estas unidades permitirían no solo el tratamiento eficiente de aguas residuales para usos no potables, sino también la apertura del mercado europeo del agua a pequeñas y medianas empresas (PYME), ofreciéndoles la posibilidad de participar como proveedores de servicios y generando nuevas oportunidades de negocio para actores económicos emergentes [18].

C. Justificación

El propósito de esta investigación es destacar e implementar la metodología de economía circular del agua en el sector minero, mediante la aplicación de diversos tratamientos que permitan optimizar la gestión hídrica. Esto implica una mejora en la eficiencia del uso del agua durante las etapas de extracción y procesamiento de minerales, contribuyendo así a una explotación más sostenible de los

recursos naturales [19]. Desde una perspectiva económica, el estudio busca reducir los costos operativos asociados al consumo de agua, promoviendo prácticas como el reciclaje y la reutilización del recurso, lo cual puede generar ahorros significativos en contextos de escasez o presión regulatoria [20].

En el ámbito académico, la justificación se sustenta en la necesidad de profundizar en el conocimiento sobre la aplicación de los principios de economía circular en actividades extractivas, aportando evidencia empírica y conceptual sobre su viabilidad en entornos mineros. [21].

Finalmente, la justificación práctica de este estudio radica en la mejora continua de la operatividad dentro de las instalaciones mineras, promoviendo una gestión más eficiente y autosuficiente del recurso hídrico. Al reducir la dependencia de fuentes externas de agua, se disminuye no solo la presión sobre ecosistemas locales y comunidades cercanas, sino también los riesgos asociados a la escasez hídrica, los conflictos socioambientales y los altos costos logísticos de abastecimiento. La optimización de los procesos de recirculación y tratamiento de aguas residuales no solo mejora el desempeño ambiental de las operaciones, sino que también incrementa la eficiencia operativa al reducir el volumen de residuos líquidos y la necesidad de tratamiento externo. Esto contribuye significativamente a la reducción de la huella hídrica de la actividad minera y refuerza el cumplimiento de normativas ambientales nacionales e internacionales [22] [23][24].

II. METODOLOGÍA

A. Diseño de la investigación

En este trabajo de investigación se ha realizado una revisión sistemática bajo el método prisma. Para su elaboración, se han respetado las pautas definidas de los modelos de búsqueda para llevar a cabo adecuadamente la revisión sistemática con resultados estrictos eficientes valorando la calidad y relevancia en cada investigación. Este tipo de investigación condensa la evidencia existente en un resumen de los contenidos de la investigación.

B. Criterios de elegibilidad

La búsqueda se limitó a publicaciones en inglés y español, comprendidas entre los años 2017 y 2024, a fin de garantizar la actualidad y relevancia de los hallazgos.

Asimismo, se consideraron informes técnicos y estudios de caso que describieran con detalle estrategias implementadas en contextos reales de la industria minera, tales como la gestión y disposición de relaves, la remediación de aguas contaminadas y la optimización del uso del agua en procesos extractivos y de procesamiento. Estas fuentes complementaron la base teórica con evidencia práctica aplicable al desarrollo del modelo propuesto. A continuación, se explica el procedimiento de fabricación en sus diferentes etapas tal como lo muestra la Fig. 1.

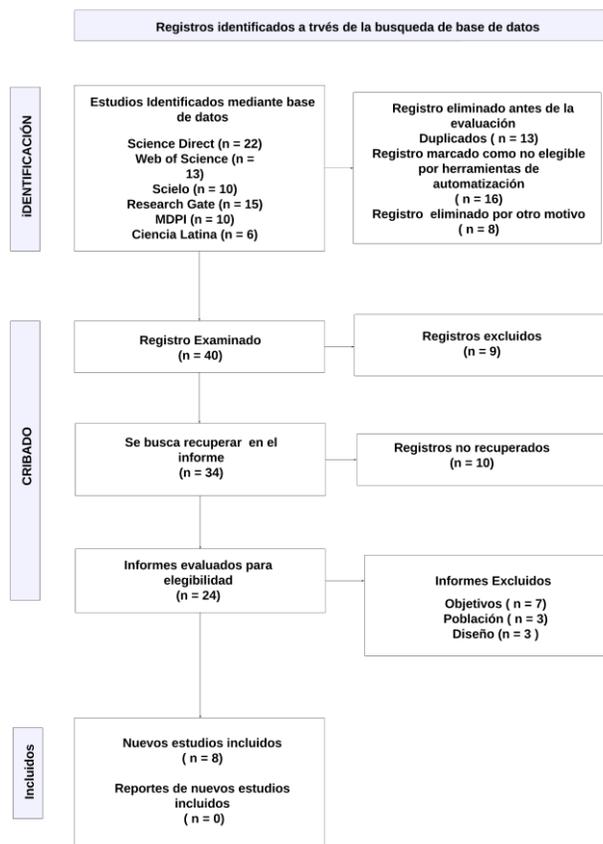


Fig. 1 Flujograma de Búsqueda.

En cuanto a los criterios de exclusión, se descartaron aquellos artículos que no estuvieran disponibles en texto completo, los que no abordaran de forma directa la economía circular en relación con la gestión del agua, así como aquellos que carecieran de datos empíricos, evaluaciones de eficacia o metodologías replicables. También se excluyeron estudios que no tuvieran vínculo explícito con la actividad minera o que no aportaran elementos técnicos o analíticos relevantes para el campo de aplicación.

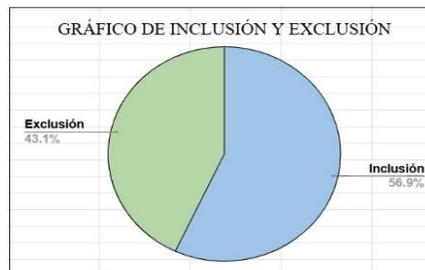


Fig. 2 Investigaciones incluidas y removidas para el desarrollo del artículo.

Así también, se alcanzó información en la base de datos Science Direct y Web of Science (WoS), Scielo, Research Gate, MDPI y Ciencia Latina en donde se realizó una serie de búsquedas avanzadas con las palabras claves, acompañados de operadores booleanos.

La combinación de palabras clave que arrojó mejores resultados en ambos buscadores fue la siguiente cadena: "circular economy" OR "water" OR "mining" OR "industrial activity" AND "Clean technology" AND "efficiency".

Los artículos seleccionados pasaron por una revisión a texto completo para confirmar su pertinencia y calidad. Los datos relevantes de cada estudio se extrajeron y se sintetizaron, prestando especial atención a las metodologías utilizadas, los resultados obtenidos y las recomendaciones propuestas.

III. RESULTADOS

Según la referencia [14], la gestión de los residuos mineros en muchos contextos aún responde a un modelo económico lineal, basado en la lógica de extracción, uso y descarte. Frente a esta realidad, la valorización de dichos residuos como fuentes secundarias de materias primas se perfila como una estrategia clave para afrontar la creciente escasez de recursos minerales y avanzar hacia una economía más sostenible.

En esta línea, el estudio desarrollado en Canadá [12] analiza la implementación del enfoque de economía circular del agua en operaciones mineras, mediante tecnologías de circuito cerrado orientadas a la reutilización del recurso hídrico.

En este sector, caracterizado por un uso intensivo de agua y la generación constante de efluentes, esta propuesta busca mitigar los impactos ambientales mediante el tratamiento y recirculación de aguas residuales generadas en los procesos extractivos. Particularmente, se evalúa la viabilidad de implementar una economía circular del agua por el concepto de "minería de aguas residuales", enfoque innovador que cobra cierta relevancia en la escasez hídrica y bajo los efectos del cambio climático. Este modelo busca revalorizar los residuos líquidos, tradicionalmente desechados, como insumos útiles para usos no potables, tales como para el riego urbano [12].

Para este contexto, el enfoque de economía circular se encuentra orientado a minimizar el uso del agua fresca mediante reutilización de aguas tratadas, tanto al interior de las propias operaciones mineras como en aplicación no potables, como el riego. Esta estrategia busca contribuir significativamente en reducir la dependencia de fuentes externas de agua. Su implementación resulta pertinentes en regiones caracterizadas por una alta escasez hídrica, donde aquellos límites al acceso de agua potable son particularmente severas [12].

La tecnología del circuito cerrado implementa planas de tratamiento modulares que son capaces de remover metales pesados y otros contaminantes, generando agua adecuada para aplicaciones industriales. El sistema piloto, se encuentra compuesto por dos subsistemas principales: unidad de tratamiento e infraestructura de tecnologías de información y comunicación (TIC), que permite el monitoreo remoto de las operaciones, contribuyendo a la reducción de costos

operativos. Los resultados del proyecto piloto confirma la viabilidad técnica de la minería de aguas residuales, demostrando así la capacidad de generar agua no potable que puede ser destinada al uso urbano. Esta iniciativa se enfoca con los principios de economía circular, de manera que promueve mejoras ambientales en los entornos urbanos [12].

El sistema incorpora un componente de automatización que ayuda con el monitoreo en tiempo real de calidad del agua tratada, de esta forma asegura el cumplimiento del estándar requerido para su reutilización. La modularidad de estas plantas facilita su implementación en las operaciones mineras de diversas escalas, brindando una flexibilidad para adaptar el sistema a la condición particular de cada proyecto. El estudio concluye que mediante la adopción de tecnologías de circuito cerrado simboliza una alternativa factible, siendo eficaz para fomentar una gestión sostenible del agua en el ámbito minero [12]. Los resultados que obtuvieron en la planta piloto evidencian que, si fue posible reutilizar hasta un 85% del agua residual generada, por lo cual se traduce a una reducción significativa del consumo de agua fresca. El presente enfoque, además de sus implicancias ambientales positivas, conlleva beneficios económicos al disminuir los costos operativos [12].

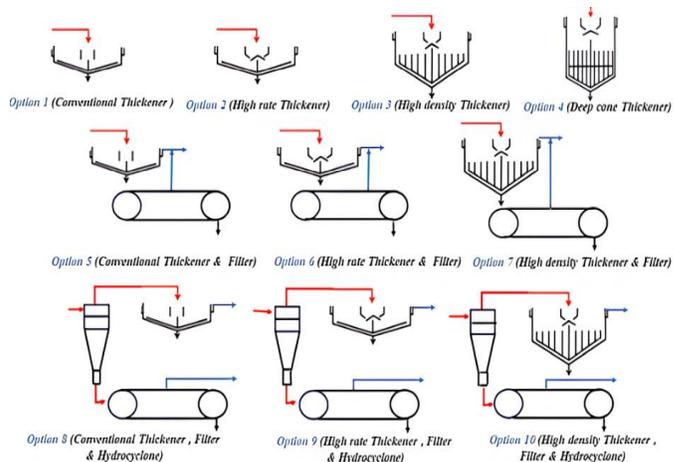


Fig. 3 Ejemplos de circuitos cerrados de agua incorporados en mecánicas de recirculación.

La Fig. 3 evidencia los diversos esquemas de circuitos cerrados de deshidratación que integran dispositivos mecánicos, tales como el decantes centrífuge y conventional thickener, diseñados para mejorar la eficiencia en lo que respecta la separación sólido-líquido en los procesos mineros y de tratamiento de aguas. Estos equipos permiten una mayor compactación de los lodos y una considerable reducción de su volumen, lo que atribuye a una optimización en el uso de recursos, al tiempo que se reduce el consumo energético y costos operativos [12].

La Fig. 4 ilustra cómo el alto consumo en agua en la industria minera constituye un aspecto crítico en los procesos operativos, dada la función en las múltiples etapas de la extracción y procesamiento de metales y minerales. La figura

proporciona una visión integral del flujo típico de los procesos involucrado en el tratamiento de minerales, destacando mediante los recuadros azules, aquellas etapas con un consumo intensivo de agua, lo que facilita identificar los puntos clave para intervenciones orientadas a la eficiencia hídrica [12].

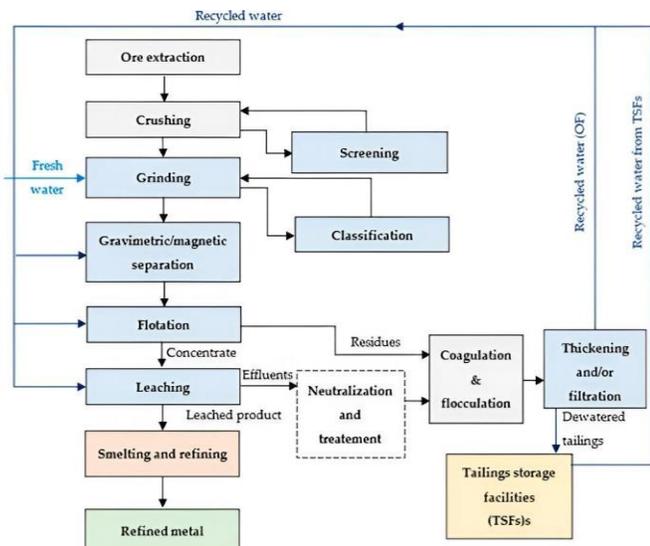


Fig. 4 Ejemplos de circuitos cerrados de agua incorporados en mecánicas de recirculación.

La investigación desarrollada en Atenas, Grecia [24], se centra en la aplicación del concepto de economía circular del agua mediante una estrategia invocadora denominada “minería de alcantarillado de aguas residuales”. Enfoque que adquiere particular relevancia en los contextos urbanos donde la escasez hídrica y los efectos del cambio climático aumentan la presión sobre los recursos disponibles. Retomando los planteamientos de la referencia [24], la economía circular propone transformar los residuos en insumos que sean valiosos; sin embargo, en el ámbito minero, las aguas residuales suelen ser descartadas rápidamente sin aprovechamiento alguno, lo que lo categoriza como desecho. Esta situación plantea la necesidad urgente de implementar procesos que permitan el tratamiento y reutilización en aplicaciones que sean no potables.

La propuesta resulta especialmente efectiva en contextos donde la geografía limita la instalación de las plantas de tratamiento convencionales, de manera que ofrece una alternativa viable y descentralizada. Asimismo, representa una oportunidad para que las pequeñas y medianas empresas (PYME), se incorporen en el mercado del agua, lo cual podría generar beneficios ambientales y socioeconómicos. El sistema piloto se implementa a un nivel local, en proximidad a la fuente de aguas residuales de origen minero, y ha sido diseñado bajo un enfoque modular y compacto, lo que permite su instalación en los entornos urbanos con espacio reducido. El sistema integra dos subsistemas principales: una unidad y comunicación (TIC), que pueda posibilitar el control

y monitoreo remoto de las operaciones. Características operativas que se encuentran orientadas a optimizar el funcionamiento del sistema, minimizando los costos asociados a su operación [24].

El estudio realizado en Grecia [24], concluye que la minería de alcantarillado de aguas residuales constituye en una estrategia prometedora para dar paso hacia una economía circular del agua en los entornos urbanos. La implementación de esta tecnología permite al mundo reducir la dependencia de fuentes convencionales de agua potable para usos no esenciales, de la misma forma, atribuye a la mejora del entorno urbano. La aplicación piloto desarrollada en la ciudad de Atenas demuestra la viabilidad técnica y operativa del sistema, generando agua no potable, siendo utilizada de manera exitosa para el riego. Estos resultados muestran que la minería de aguas residuales no lo representa una alternativa frente al limitado acceso hídrico, sino que aporta beneficios ambientales en los términos de calidad del clima. La unidad del tratamiento empleada en el piloto, con una capacidad de procesamiento de 10 m³/día, presentando un desempeño eficiente y estable, logrando reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO5) a valores inferiores a 2 mg/L y la demanda química de oxígeno (DQO) en promedio de 23 mg/L, alcanzando la eficiente eliminación de los contaminantes cercanos a un 95% [24].

De forma adicional, el sistema de minería de alcantarillado de aguas residuales logra eliminar de manera completa el nitrógeno amoniacal, alcanzando concentraciones de 0 mg/L, y mantuvo los sólidos suspendidos totales (SST) por debajo del límite de detección, evidenciando una alta calidad del efluente tratado. Asimismo, el sistema muestra una notable capacidad de eliminación microbiológica, dado que no se detectaron coliformes totales ni *Escherichia coli* (E.coli) en el efluente posterior al proceso de ósmosis inverso [24]. Este proceso también resulta altamente superior al 90%, lo que refuerza su idoneidad para las aplicaciones urbanas no potables, como el riego [24].

En cuanto a los costos operativos, las estimaciones realizadas indican el valor de 0,86 €/m³ para el esquema de tratamiento basado en bioreactor de membrana (MBR) con desinfección por luz ultravioleta (UV), y de 1,07 €/m³ para el esquema combinado MBR-UV con ósmosis inversa (RO). Valores competitivos en comparaciones con tecnologías convencionales, lo que sugiere la viabilidad económica del Sistema en aplicaciones descentralizadas. Además que, la unidad piloto alcanzó una producción máxima estimada de agua reciclada de 450 L/día [24].

Los resultados obtenidos no solo cumplen con los estándares legales establecidos en Grecia para el uso de agua en riego urbano, como también, evidencia el potencial del sistema para disminuir la demanda de agua potable en las actividades de mantenimiento urbano. De este modo, la implementación de esta tecnología constituye de manera

significativa a la sostenibilidad y a la resiliencia hídrica afectadas por la escasez de agua [24].

El estudio llevado a cabo en Bolivia [16] aborda la implementación de estrategias de economía circular del agua en una operación minera que se encuentra dedicada a la producción de concentrados de plata, plomo y zinc. En respuesta a los desafíos ambientales y económicos asociados a la gestión del recurso hídrico en el sector minero, la investigación propone el conjunto de técnicas innovadoras orientadas a poder optimizar el uso y reutilización del agua, reduciendo el costo operativo y de cierre ambiental, mitigando impactos ecológicos derivados por las actividades extractivas.

Una de las estrategias clave de economía circular planteadas dentro del estudio es la reutilización de las aguas residuales que fueron generadas por el campamento minero. Para ello, se propone la implementación de un sistema de tratamiento basado en un reactor secuencial por lotes (SBR), el cual demuestra ser altamente eficiente en la eliminación de los contaminantes, como fósforo y nitrógeno, presentes en las aguas residuales, esta tecnología permite no solo reducir la carga contaminante, sino que también recupera el recurso hídrico para su reutilización en actividades no potables dentro de la operación o ejecución minera [16].

Las aguas tratadas mediante el sistema SBR son reutilizadas en dos aplicaciones estratégicas dentro de la operación minera, en primer lugar, se emplean el proceso de flotación de minerales, técnica fundamental para la separación de los minerales valiosos de la ganga; en segundo lugar, se destinan al riego de invernaderos donde se cultivan diversas especies autóctonas utilizadas en los programas de rehabilitación de áreas degradadas por la actividad minera [16].

La Tabla III compara los resultados del proceso de flotación utilizando agua potable, agua de recirculación y agua residual urbana tratada con reactor SBR. Se analizan el contenido y distribución del zinc en los productos: concentrado, relave y cabeza calculada. Datos que muestran que el agua de recirculación ofrece un mayor rendimiento en la recuperación de zinc, mientras que el agua residual tratada presenta un comportamiento similar al del agua potable, confirmando su viabilidad como un recurso alternativo.

En términos generales, el objetivo que tuvieron dentro del proceso de flotación es poder maximizar la recuperación de zinc en el concentrado, obteniendo así un alto porcentaje de metal, del mismo modo, se reduce la pérdida en el relave [16].

Para este contexto, se logra evidenciar que el uso del agua de recirculación puede ofrecer un mejor desempeño en los términos de eficiencia del proceso, alcanzando la recuperación de un 93.94% de zinc, con una concentración del 44.41% en el concentrado. El resultado se traduce como una baja en la pérdida de mineral, debido que el relave continúe únicamente un 1.88% de zinc, de la forma que supera el rendimiento a los otros tipos de agua que fueron evaluados [16].

Los resultados expuestos en la Tabla III confirman que el uso del agua residual urbana en la flotación de menas de zinc es viable.

TABLA III
RESULTADOS DEL PROCESO DE FLOTACIÓN UTILIZANDO AGUA POTABLE, AGUA DE RECIRCULACIÓN Y AGUA RESIDUAL URBANA

Flotación de Agua Potable			
Producto Concentrado	% PESO	% CONTENIDO Zn	DIST. Zn
Concentrado	20.4	44.46	85.65
Relave	2.8	37.31	9.86
Cab.	76.8	0.62	4.49
Calculada	100	10.59	100
Flotación de Agua de Recirculación			
Producto Concentrado	% PESO	% CONTENIDO Zn	DIST. Zn
Concentrado	21.25	44.41	93.94
Relave	2.53	7.64	1.88
Cab.	76.22	0.59	4.19
Calculada	100	10.59	100
Flotación de Agua Residual Urbana Tratada (SBR)			
Producto Concentrado	% PESO	% CONTENIDO Zn	DIST. Zn
Concentrado	20.2	46.39	88.49
Relave	2.4	27.44	6.22
Cab.	77.4	0.72	5.29
Calculada	100	10.59	100

Otra propuesta de economía circular realizada en Bolivia [16], es la generación del suelo vegetal (tp soil) para su aplicación en áreas intervendidas por la actividad minera en cielo abierto, así como en las zonas de edsmontes y relaves. El suelo, se obtiene a partir de la valorización de dos residuos principales: lodos ricos en nutrientes que fueron generados por el tratamiento que se les dio a las aguas residuales bajo el sistema de SBR, y los residuos orgánicos que fueron provenientes del campamento minero; la combinación de estos materiales facilita y permite la producción de compost de calidad, apto para el uso en actividad de revegetación de especie autóctona, de forma que atribuye a la rehabilitación ecológica de las áreas dañadas.

Desde la perspectiva ambiental, el resultado es favorable, debido que reduce de manera significativa la cantidad del zinc presente en los residuos, lo que a su vez disminuye el riego de contaminación de los suelos adyacentes y cuerpos de agua.

El flujograma que se presenta en la Fig. 5, ilustra el diseño experimental conceptual propuesto para la producción del concentrado de zinc, plata y plomo, mediante la explotación a cielo abierto de un yacimiento de los minerales sulfurados [16].

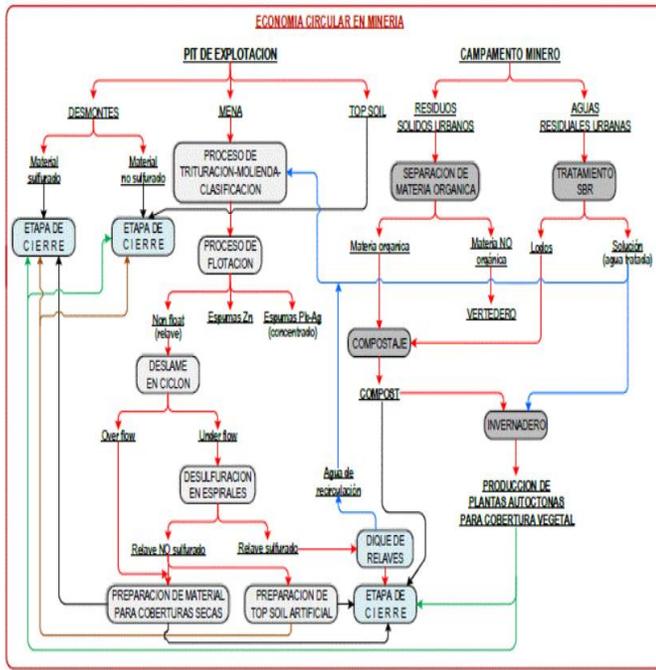


Fig. 5 Modelo de economía circular Zamora, G., & Hinojosa, O. (2019).

IV. DISCUSIONES DE RESULTADOS

Los casos analizados de Bolivia, Canadá y Grecia, evidencian la relevancia de lo que es la aplicación de la economía circular del agua como la estrategia efectiva para la gestión más eficiente de los recursos hídricos, especialmente en los sectores tradicionalmente asociados a un alto impacto ambiental. Por lo que se expresa, una tabla comparativa que sintetiza los aspectos clave de cada uno de los estudios [12] [16] [24].

La Tabla IV sintetiza los enfoques adoptados en cada país, destacando tecnologías como el circuito cerrado modular en Canadá, la minería de alcantarilla en Grecia y la reutilización de aguas residuales mediante MBR y RO en Bolivia. Los tres casos demuestran elevados niveles de reutilización, reducción significativa de contaminantes y mejoras en la eficiencia de uso del recurso [12] [16] [24].

TABLA IV
ENFOQUE CIRCULAR DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA:
PRINCIPIOS E INDICADORES

Aspecto	Caso 1 - Canadá	Caso 2 - Grecia	Caso 3 - Bolivia
Tecnología Empleada	Circuito Cerrado Modular.	Minería de Alcantarilla.	Reutilización de aguas residuales de alcantarillado con MBR y RO.
Reutilización	Un 85% del agua residual se reutiliza para riego y procesos industriales.	Capacidad de riego de 50 m ² con 10 m ³ diarios.	Se reutiliza en la flotación, reduciendo la demanda del recurso.
Contaminantes Reducidos	Eliminación de contaminantes generales y metales pesados.	Reducción de DB05 mg/L, con un DQO de 23 mg/L	Disminución de N y P, así como de DQO, DBO y SST.

La comparación evidencia que integrar sistemas de tratamiento y reutilización no solo optimiza el uso del agua, sino que también genera beneficios ambientales y económicos, al reducir costos operativos [12][16][24]. En Canadá, por ejemplo, el sistema de circuito cerrado permite reutilizar hasta el 85% del agua residual, transformándola en recurso para riego urbano e industrial, una solución especialmente relevante en regiones con escasez hídrica [12]. En Grecia, el tratamiento descentralizado ofrece costos operativos competitivos (entre 0,86 €/m³ y 1,07 €/m³), mostrando su viabilidad para pequeñas y medianas empresas [24]. Aunque en el caso canadiense no se detallan cifras exactas, se reportan disminuciones considerables en costos de tratamiento y consumo de agua fresca [12].

En conjunto, estos casos reafirman que la economía circular del agua no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que además mejora la eficiencia operativa, adaptándose exitosamente a distintos contextos mediante tecnologías que promueven un uso más racional y estratégico de los recursos hídricos [12][16][24].

V. CONCLUSIONES

En conclusión, los casos de Canadá, Bolivia y Grecia [12][16][24] demuestran que la implementación de estrategias de economía circular del agua en la industria minera no solo es viable técnica y operativamente, sino también altamente beneficiosa desde una perspectiva ambiental y económica. La adopción de sistemas de circuito cerrado, plantas de tratamiento modulares y tecnologías inteligentes ha reducido el consumo de agua dulce, mitigado los contaminantes y fortalecido la sostenibilidad hídrica.

Estos modelos han demostrado su capacidad de adaptación a diversos contextos geográficos y escalas operativas, respondiendo eficazmente a la escasez de agua y a las presiones regulatorias. En algunos casos, como el de Canadá, se ha recuperado hasta el 85% de las aguas residuales, lo que demuestra el impacto transformador de estas tecnologías en un sector que históricamente ha sido intensivo en el uso de este recurso [12].

Desde una perspectiva ambiental, la economía circular del agua contribuye a reducir significativamente la huella hídrica al cerrar los ciclos hídricos y valorizar fuentes alternativas. En términos económicos, ayuda a reducir los costos operativos relacionados con el suministro y el tratamiento del agua, fortaleciendo la competitividad del sector minero. Además, la implementación de estas prácticas promueve el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular los ODS 6 y 12, consolidando las operaciones mineras como agentes de cambio hacia modelos industriales más sostenibles, resilientes y socialmente responsables.

En resumen, la integración de enfoques circulares en la gestión del agua representa una oportunidad estratégica para transformar estructuralmente la industria minera, mejorando

tanto su eficiencia operativa como su relación con el entorno ecológico y social.

VI. REFERENCIAS

- [1] J. C. Muyulema Allaica, «La ecología industrial y la economía circular. Retos actuales al desarrollo de industrias básicas en el Ecuador.» *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.* , 2018.
- [2] O. Terrazas Benito, «La minería y la responsabilidad social corporativa en Perú y Latinoamérica,» *Ciencia Latina*, vol. 5, n° 5, p. 21, 21021.
- [3] D. G. Aliaga Churrurrain, «La reutilización del agua en la minería con enfoque en economía circular,» *Fides Et Ratio*, vol. 25, n° 25, p. 35, 2023.
- [4] A. J. Subin , J. Calhoun, B. R. Otoniel , P. Mercado, N. Shinichiro, N. H. Colton, M. Sotelo y L. M. Pradeep, «Promoting a Circular Economy in Mining Practices,» *Sustainability*, p. 34, 2024.
- [5] A. Upadhyay , T. Laing , V. Kumar y M. Dora, «Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry,» *Resources Policy*, vol. 72, 2020.
- [6] E. Fernandes y R. Cunha Marques, «Review of Water Reuse from a Circular Economy Perspective,» *Water*, p. 11, 2023.
- [7] B. Michaux, J. Hannula, M. Rudolph y M. A. Reuter, «Study of process water recirculation in a flotation plant by means of process simulation,» *Minerals Engineering*, vol. 148, 2020.
- [8] J. E. Rodríguez , I. Razo y I. Lázaro, «Water footprint for mining process: A proposed method to improve water management in mining operations,» *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 8, p. 11, 2023.
- [9] K. Arenas Collao, H. Valdés González, L. Reyes-Bozo y J. L. Salazar, «The Water Management Impacts of Large-Scale Mining Operations: A Social and Environmental Perspective,» *Water*, vol. 16, p. 15, 2024.
- [10] A. Delgado, C. Amadei, C. A. Amadei y M. Makino, «Water in Circular Economy and Resilience (WICER) Framework,» *UTILITIES POLICY*, 2024.
- [11] N. El Houda Chaher , A. Nassour y M. Nelles, «The (FWE)2 nexus: Bridging food, food waste, water, energy, and ecosystems for circular systems and sustainable development,» *Trends in Food Science & Technology*, vol. 154, 2024.
- [12] L. Hamraoui, A. Bergani, M. Ettoumi, A. Aboulaich, Y. Taha, A. Khalil, C. . M. Neculita y M. Benzaazoua, «Towards a Circular Economy in the Mining Industry: Possible Solutions for Water Recovery through Advanced Mineral Tailings Dewatering,» *Minerals*, vol. 14, p. 41, 2024.
- [13] E. Shekarian, «A review of factors affecting closed-loop supply chain models,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, 2019.
- [14] P. H. M. Kinnunen y A. H. Kaksonen, «Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, 2019.
- [15] L. A. Cisternas, E. Gálvez, M. Rivas y J. Valderrama, «ECONOMÍA CIRCULAR EN PROCESOS MINEROS,» *Ril editores*, p. 18, 2021.
- [16] G. Zamora E. y O. Hinojosa C., «Economía circular en minería - caso de estudio: producción minera de,» *Revista de Medio Ambiente y Minería*, vol. 4, n° 1, p. 15, 2019.
- [17] J. P. Machado de Lima , M. C. Santos Amaral y S. C. Rezende Borges de Lima, «Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future,» *Journal of Water Process Engineering*, vol. 71, 2025.
- [18] I. Kahupi, N. Yakovleva, O. Okorie y C. Eiríkur Hull, «Implementation of Circular Economy in a Developing Economy's Mining Industry Using Institutional Theory: The Case of Namibia,» *Journal of Environmental Management*, vol. 368, 2024.
- [19] . M. M. L. Dingemans, P. W. M. H. Smeets, G. Medema, J. Frijns, K. J. Raat, . A. P. Van Wezel y B. Ruud P., «Responsible Water Reuse Needs an Interdisciplinary Approach to Balance Risks and Benefits,» *WATER*, 2020.
- [20] M. Sillanpää, «Circular economy in action: Case studies about the transition from the linear economy in the chemical, mining, textile, agriculture, and water treatment industries,» *Academic Press*, 2018.
- [21] A. Gallego Schmid, C. López Eccher , E. Muñoz, R. Salvador, N. A. Cano Londoño , M. Vetroni Barros, D. Choconta Bernal , J. M. F. Mendoza, A. Nadal y A. B. Guerrero, «Circular economy in Latin America and the Caribbean: Drivers, opportunities, barriers and strategies,» *Sustainable Production and Consumption*, vol. 51, 2024.
- [22] M. d. l. Á. Fernandez Scagliusi, «Herramientas para lograr un uso sostenible del agua en la minería: la huella hídrica y la huella de agua,» *Revista Catalana de Dret Ambiental*, vol. 7, n° 1, p. 37, 2021.
- [23] F. Cemil Özbuğday, D. Findik, K. Metin Özcan y S. Başçı, «Resource efficiency investments and firm performance: Evidence from European SMEs,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, 2020.
- [24] C. Makropoulos, E. Rozos, I. Tsoukalas , A. Plevri, G. Karakatsanis, L. Karagiannidis, E. Makri, C. Lioumis, C. Noutsopoulos, D. Mamais, C. Rippis y E. Lytras, «Sewer-mining: A water reuse option supporting circular economy, public service provision and entrepreneurship,» *Journal of Environmental Management*, vol. 216, 2021.