

Remediation of Environmental Liabilities from Mining Activities. A Systematic Review from 2012-2022

María Gregoria, Escobar Datica, Bachiller¹, Liliana, Castro Obeso, Magister¹, Ronald Antonio, Alvarado Obeso, Magister¹, Marlon Walter, Valderrama-Puscan, Doctor¹, Grant Ilich Llaque-Fernandez, Magister¹, Flor Alicia Calvanapón-Alva¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN). Perú, N00258453@upn.pe, liliana.castro@upn.pe, ronald.alvarado@upn.edu.pe, marlon.valderrama@upn.edu.pe, grant.llaque@upn.edu.pe, flor.calvanapon@upn.pe

Abstract- The purpose of this systematic literature review is to analyze the most used remediation methods to remediate mining environmental liabilities developed by some mining companies as a contribution to sustainable mining. Therefore, five (5) selection criteria were considered, such as: a) Spanish language, b) documents containing the IMRD research format, c) 11 years old (2012-2022), d) reliable research sources such as virtual libraries, university repositories, search engines, databases, among others, e) inclusion and exclusion variables. For which 38 research articles were selected, of which 11 are scientific articles, 02 review articles, 19 undergraduate theses and 06 graduate or master's theses, making use of inclusion and exclusion variables to facilitate the search for information. This analysis of the documents obtained served to solve the objective and research problem of this SR, in which the different physical, chemical and biological remediation methods used to remediate environmental liabilities resulting from mining activities were presented, as a contribution to the mitigation of negative impacts on the environment.

Keywords- Remediation of mining environmental liabilities, Environmental remediation methods, Mining liabilities, Acid water drainage.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Remediación de Pasivos Ambientales Producto de la Actividad Minera. una Revisión Sistemática entre el 2012-2022

María Gregoria, Escobar Datica, Bachiller¹, Liliana, Castro Obeso, Magister¹, Ronald Antonio, Alvarado Obeso, Magister¹, Marlon Walter, Valderrama-Puscan, Doctor¹, Grant Ilich Llaque-Fernandez, Magister¹, Flor Alicia Calvanapón-Alva¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN). Perú, N00258453@upn.pe, liliana.castro@upn.pe, ronald.alvarado@upn.edu.pe, marlon.valderrama@upn.edu.pe, grant.llaque@upn.edu.pe, flor.calvanapon@upn.pe

Resumen— *La presente revisión sistemática de literatura tiene como finalidades analizar los métodos de remediación más usados para remediar pasivos ambientales mineros que vienen desarrollando algunas empresas mineras como aporte a la minería sostenible. Por ello se consideraron cinco (5) criterios de selección, tales como: a) idioma español, b) documentos que contengan el formato de investigación IMRD, c) 11 años de antigüedad (2012-2022), d) fuentes de investigación confiables como bibliotecas virtuales, repositorio de universidades, buscadores, base de datos, entre otros, e) variables de inclusión y exclusión. Para lo cual se seleccionaron 38 artículos de investigación, de los cuales 11 son artículos científicos, 02 artículos de revisión, 19 Tesis de Grado y 06 Tesis de Posgrado o maestría, haciendo uso de variables de inclusión y exclusión para facilitar la búsqueda de información. Dicho análisis de los documentos obtenidos sirvió para dar solución al objetivo y problemática de investigación de la presente RS, en la que se dio a conocer los diferentes métodos de remediación físicos, químicos y biológicos, empleados para remediar pasivos ambientales producto de la actividad minera, como aporte a la mitigación de impactos negativos en el medio ambiente.*

Palabras Clave— *Remediación de pasivos ambientales mineros, Métodos de remediación ambiental, Pasivos mineros, Drenaje de aguas ácidas.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el ser humano, los animales, la flora y el medio ambiente se enfrentan una problemática en cuanto a los impactos ambientales negativos que los vienen afectando, producto de los pasivos ambientales mineros no remediados causados por la industria extractiva de minerales. Esto ocurre tanto por la minería formal como por la informal, luego que finalizan sus operaciones de explotación de minerales, abandonan o venden la concesión minera, dejando así la responsabilidad de cierre de pasivos ambientales en abandono o a un tercero como lo es el Estado. Dentro de este orden de ideas, en un estudio realizado da a conocer que en el Perú se estiman 8,794 pasivos ambientales abandonados o huérfanos que no ha tenido rehabilitación inmediata [1].

Un pasivo ambiental es el daño que causa la actividad minera a la propiedad, el ecosistema y el medio ambiente que lo rodea, incluso después del cese de operaciones [2].

Por consiguiente, se le llama pasivo ambiental a un pequeño conjunto de componentes producto de la operación minera, en algunos casos son efluentes o drenajes de aguas ácidas, emisiones, depósitos o relaves mineros, instalaciones, los cuales causan efectos negativos a la población y medio ambiente, bien sea porque han sido abandonados o porque este inactivo.

En la Ley N° 28271 los efluentes mineros son considerados pasivos ambientales mineros. En otras palabras, los drenajes de aguas ácidas o efluentes son un riesgo mayor a la población y medio ambiente, debido a el proceso de oxidación de algunos minerales (sulfuros) y que, al entrar en contacto con agua o aire, produce este fenómeno de contaminación significativo a las personas, el ecosistema, los animales, entre otros [3].

Según un estudio realizado la remediación es descrita en primer lugar, como el proceso de corrección necesario a ser aplicado en suelos afectados por diversas actividades, para que luego puedan ser usados para otro fin [4]. En segundo lugar, como las técnicas para disminuir, minimizar o modificar los agentes contaminantes que causan alteraciones en el medio ambiente [5].

Por un lado, un pasivo ambiental es el deterioro en un área que involucra la flora, fauna y medio ambiente, el cual es causado por actividades mineras irresponsables [6]. Por el otro, en el artículo 2 de la Ley N°28271 se define un pasivo ambiental minero (PAM) como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas, que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad [3].

Debido a la contaminación de áreas y zonas a lo largo de los años producto de diversas actividades de explotación, se vienen tomando medidas para enmendar los daños causados en el medio ambiente. Es por ello surgen las técnicas de remediación de pasivos ambientales, las cuales se encargan de reparar o corregir los impactos ambientales negativos en el medio ambiente, estos impactos causan contaminación en animales, personas, plantas, cosechas, ríos, suelos, entre otros; dichas técnicas de remediación pueden llevarse a cabo de manera in situ o ex situ.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Como problemática de la presente investigación, se dará a conocer ¿Cuáles son los métodos más usados para remediar las zonas con pasivos ambientales producto de la actividad minera?, a través de una revisión sistemática y análisis de artículos de investigación, artículos científicos y proyectos de investigación entre los años 2012 - 2022. El objetivo de esta investigación es conocer los métodos más empleados en la remediación de pasivos ambientales mineros. Esto ayudará a entender las diversas medidas de mitigación en cuanto al problema de contaminación, que estos pasivos ambientales mineros causan cuando no son remediados a tiempo.

El finalidad de esta revisión sistemática de literatura es analizar los métodos de remediación de pasivos ambientales que se vienen desarrollando por algunas empresas mineras como aporte a la minería sostenible, ya que la actividad minera se viene desarrollando desde hace miles de años como aporte económico y de desarrollo en un país, que en consecuencia ocasionó un fuerte impacto negativo al medio ambiente, es por ello se dará a conocer la eficiencia de los diversos métodos de remediación para la recuperación de zonas con pasivos ambientales producto de la actividad minera.

II. METODOLOGÍA

La revisión sistemática (RS) es un instrumento de investigación científica usado para resumir, evaluar y comunicar los resultados e implicaciones de vastas cantidades de investigaciones que, de no presentarse así serían inmanejables [7]. La presente revisión sistemática de literatura científica es una investigación descriptiva, que agrupa los resultados de diferentes investigaciones que responden a la problemática de investigación ¿Cuáles son los métodos de remediación más usados para remediar las zonas con pasivos ambientales producto de la actividad minera?, para ello se consideraron cinco (5) criterios de selección tales como: a) tesis o investigaciones científicas de bases de datos, buscadores, repositorios de universidades como la Universidad Cesar Vallejo y la Universidad Nacional Alcides Carrión, b) 11 años de antigüedad (2012-2022), c) idioma en español, d) documentos que contengan el formato de investigación IMRD, e) uso de variables de inclusión y exclusión para facilitar la búsqueda de información.

De este modo se consultaron fuentes de investigación confiables como bibliotecas virtuales, repositorio de universidades públicas y privadas de habla hispana, base de datos, buscadores, entre otros, fuentes que sirvieron para dar solución a la problemática de investigación de la presente RS.

Dentro de los criterios de selección en la búsqueda de información que se consideraron los siguientes: base de datos confiables, revistas científicas, tesis de universidades tanto públicas como privadas, criterio de inclusión y exclusión de las variables “Remediación de Pasivos ambientales”, período de publicación entre el 2012-2022, idioma en español.

En relación a la búsqueda de información, se realizó en las bases de datos confiables en las que se usaron los operadores booleanos “AND” y “OR” para el criterio de inclusión y exclusión de las variables “Remediación de Pasivos ambientales”, “Pasivos Ambientales Mineros”, Remediación Ambiental”, “Drenaje ácido de minas” para facilitar la búsqueda de información relacionada con la RS, considerando así solo aquellos documentos que contengan la IMRD, el periodo de publicación este entre los años 2012 – 2022 y el idioma en español.

En conclusión, se realizó una matriz de selección de base de datos en Excel partiendo de los criterios de búsqueda mencionados líneas arriba, en la que se tomaron en cuenta parámetros de búsqueda de información como los siguientes: nombres y apellidos del autor, base de datos del estudio o repositorio de universidad, año de publicación, título y objetivo del estudio. En dicha matriz, se recopilaron 38 artículos de investigación entre revistas científicas y tesis que servirán para la evaluación y análisis de la presente revisión sistemática.

III. RESULTADOS

En relación con el cumplimiento de la problemática de investigación de la presente revisión sistemática, se realizó la búsqueda de información en repositorios de universidades, buscadores y bases de datos confiables, arrojando como resultado noventa y ocho (98) artículos de investigación entre tesis de grado, tesis de post grado, revistas científicas, entre otros, de los cuales han sido seleccionado treinta y ocho (38) documentos que cumplen con la estructura IMRD con año de publicación entre el 2012-2022. En la Tabla I se visualiza la estructura de los documentos de investigación, la misma que se detalla: dos (02) documentos del buscador EBSCO que representa un 5.26%, un (01) documento del buscador Dialnet que represente el 2.63%, un (01) documento del buscador Google Académico que representa el 2.63%, tres (03) documentos del buscador ProQuest que representa el 7.89%, dos (02) documentos del Repositorio Pontificia Universidad la Católica del Perú que representa el 5.26%, cinco (05) documentos del Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo que representa el 13.15%, un (01) documento del Repositorio Institucional Universidad De San Martín De Porres que representa el 2.63%, cinco (05) documentos del Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión que representa el 13.15%, dos (02) documentos del Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería que representa el 5.26%, un (01) documento del Repositorio Institucional Universidad Nacional del Altiplano que representa el 2.63%, un (01) documento del Repositorio Institucional Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann que representa el 2.63%, tres (03) documentos del Repositorio Institucional Universidad Nacional Mayor de San Marcos que representa el 7.89%, cuatro (04) documentos del repositorio institucional Universidad Privada del Norte que representa el 10.52%, dos (02) documento

del buscador Redalyc que representa el 5.26%, un (01) documento del Repositorio UM de la Universidad do Minho que representa el 2.63%, dos (02) documento del buscador Scielo que representa el 5.26% y un (01) documento del Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de México que representa el 2.63% tal como se muestra en la Fig. 1.

De acuerdo con los documentos de investigación mencionados en el párrafo anterior, han sido agrupados en diferentes categorías, tales como: once (11) Artículos Científicos que representan el 29% de los documentos seleccionados, dos (02) Artículos de Revisión que representan el 5% de los documentos seleccionados, diecinueve (19) Tesis de Grado que representan el 50% de los documentos seleccionados y seis (06) Tesis de Posgrado o maestría que representa el 16% de los documentos seleccionados como se muestra en la Fig. 2.

Dentro de este orden de ideas, los documentos antes referidos tuvieron un filtro con respecto al tiempo ya que se tomaron investigaciones publicadas en el periodo de tiempo entre el 2012 – 2022, que se comprenden de la siguiente manera: un (01) documento del año 2012 que representa el 3% de la documentación seleccionada, un (01) documento del año 2013 que representa el 3% de la documentación seleccionada, un (01) documento del año 2014 que representa el 3% de la documentación seleccionada, cuatro (04) documentos del año 2015 que representa el 11% de la documentación seleccionada, un (01) documento del año 2016 que representa el 3% de la documentación seleccionada, tres (03) documentos del año 2017 que representa el 8% de la documentación seleccionada, seis (06) documento del año 2018 que representa el 16% de la documentación seleccionada, cinco (05) documentos del año 2019 que representa el 13% de la documentación seleccionada, cuatro (04) documentos del año 2020 que representa el 11% de la documentación seleccionada, dos (02) documentos del año 2021 que representa el 5% de la documentación seleccionada y diez (10) documentos del año 2022 que representa el 26% de la documentación seleccionada como se muestra en la Fig. 3.

De acuerdo con la información analizada y procesada, se tiene como resultado que los artículos científicos y las tesis relacionadas con la Remediación de Pasivos Ambientales producto de la actividad minera se intensifican a partir del año 2018 como se muestra en la Tabla II, esto se debe a que el crecimiento de la empresa minera responsable y la preocupación por el medio ambiente está aumentando cada vez más. Cabe resaltar que los pasivos ambientales mineros más predominantes en la industria son los efluentes, los drenajes de aguas acidas y los relaves metalúrgicos, siendo así una de las principales causas de la contaminación en el ambiente y daño a la población. Por ello se dan a conocer algunos de los métodos in situ, ex situ y off site implementados en la remediación de estos pasivos, tales como: método de oxidación química in situ, biorremediación, remediación por bombeo y

tratamiento, método fisicoquímico por extracción de vapores y los reactores bioquímicos. Eg en la Concesión Minera Cerro El Toro, distrito Huamachuco se ha ejecutado el método de reaprovechamiento de relaves metalúrgicos a través de técnicas de flotación y concentración gravimétrica para descontaminar el relave minero.

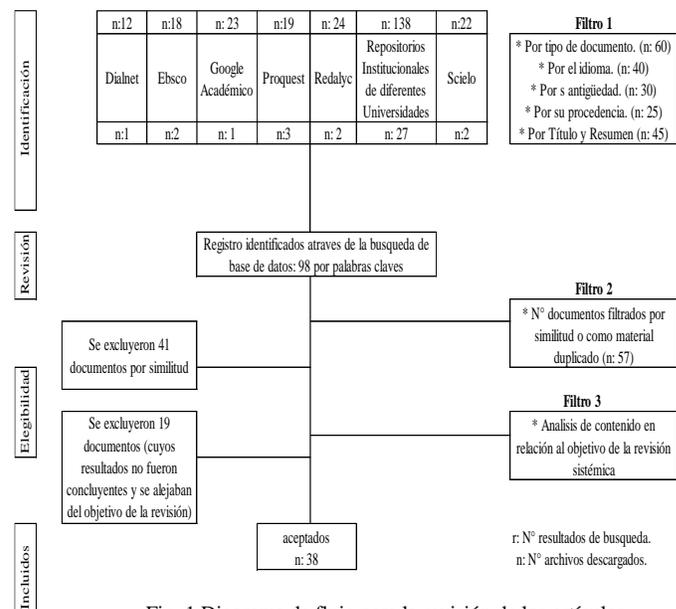


Fig. 1 Diagrama de flujo para la revisión de los artículos

TABLA I
 MATRIZ DE REGISTRO DE ARTÍCULOS

N°	Base de datos	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
[4]	EBSCO	Silvana Flores, Pablo Núñez, Edison Zegarra, Nora Flores, Janet Flores	2019	Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de Cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible
[8]	EBSCO	Lina Marleny, López-Sánchez, Mary Luz, López-Sánchez, Graciela, Medina-Salazar	2017	La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica
[6]	Dialnet	Noel, Bruguera-Amarán, Damaris, Gallardo-Martínez & José Antonio, Díaz-Duque	2020	Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba
[9]	Google Académico	Alicia, Kirschbaum, Jessica, Murray, Marcelo, Arnos Sio, Romina, Tond & Lucia, Cacciabue	2012	Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales
[10]	PROQUEST	César Augusto, García Ubaque, Maria Camila, García-Vaca & Carlos Fernando, Agudelo-Rodríguez	2014	Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.

N°	Base de datos	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
[11]	PROQUEST	Karina, Jensen & Mariana, Birche,	2018	La recuperación de pasivos ambientales desde el proyecto de paisaje: el parador ecológico
[12]	PROQUEST	Yaneth, Vásquez & Maria Camila, Escobar	2020	Reactores Bioquímicos Pasivos: Una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos de mina
[13]	Repositorio Universidad Autónoma de México	Eric Alexis, Guadarrama-Medina	2022	Casos de estudio de métodos de remediación: Bioventeo, oxidación química y remediación electrocinética
[14]	Repositorio Pontificia Universidad la Católica del Perú	Amelia, Corzo-Remigio	2015	Impacto de los pasivos ambientales mineros en el recurso hídrico de la microcuenca quebrada Párac, distrito de san mateo de Huanchor, Lima
[15]	Repositorio Pontificia Universidad la Católica del Perú	Mario Fernando, Cedrón-Lassús	2013	Elaboración de criterios para la transformación de pasivos mineros en activos socio - ambientales sostenibles
[16]	Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo	Wendy Kristell, Alarcón-Salvador & Analí Diana Cristal, Mashuán-Bactación	2018	Evaluación de Juncus Arcticus e incorporación de enmienda orgánica para la remediación de suelos contaminados con metales pesados de Huamachuco
[17]	Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo	Evelyn Luzmila, Pérez-León	2018	Los pasivos ambientales mineros y su influencia en la salud de la comunidad campesina El Tingo, Hualgayoc, Cajamarca – 2018
[18]	Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo	Gian Darly, Rubiños-Pérez	2021	Rehabilitación Ambiental De Los Pasivos Ambientales Mineros De La Ex. Unidad Minera San Genaro – Castrovirreyna, Huancavelica 2020
[19]	Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo	Angelita Elizabeth De Los Milagros, Alcázar-Barrera,	2022	Tecnologías de Remediación Para Mitigar los Potenciales Impactos Ambientales Generados por Drenaje Ácido de Minas: Revisión Sistemática
[20]	Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo	Julián, Quispe Yucra	2022	Estado Actual de los Pasivos Ambientales de la Actividad Industrial Minera en el Perú, Revisión Sistemática - 2022

N°	Base de datos	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
[21]	Repositorio Institucional Universidad De San Martín De Porres	Karol Stephany, Góngora- Higa	2015	La importancia de la definición de las actividades de remediación de pasivos ambientales mineros
[22]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión	Nora Judith, Mauricio-Chávez	2022	Remediación ambiental de las zonas alteradas por la minería colonial, mediante el aprovechamiento de sus relaves en el distrito de Vicco y alrededores
[23]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión	Wendy Beatriz, Lozano-Santiago	2019	Evaluación de los parámetros físicos y químicos de los recursos hídricos en el Distrito de Goyllarisquizga influenciado por los pasivos ambientales de carbón Provincia Daniel Alcides Carrión – Pasco - 2018
[24]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión	Sandro Aníbal, García Alania	2018	Remediación de los pasivos ambientales mineros generados por la ex unidad minera Lichicocha activos mineros SAC con fines de disminuir los lixiviados a la subcuenca del río Santa Eulalia y cuenca del río Rímac
[25]	Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú	Gabriel Marcelino, Paucar-Conde	2015	Diseño y estabilidad de botaderos de desmonte para la remediación de pasivos ambientales de la mina recuperada - Huancavelica
[26]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión	Cinthia Elizabeth, Escandón-Elguera	2019	Identificación de pasivos ambientales mineros en la provincia de Pasco, sus efectos y realidad actual 2018
[27]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión	Anamile Saly, Saciga-Flores	2022	Remediación de pasivos ambientales coloniales en terrenos de la comunidad campesina San Antonio de Rancas – Distrito de Simón Bolívar – Pasco
[28]	Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería	Ricardo, Huaranca-Apolinario	2021	Optimización de planes de cierre de pasivos ambientales mineros
[29]	Repositorio Institucional Universidad Nacional de Ingeniería	Medardo, Negrón-Ballarte	2015	Reaprovechamiento y remediación ambiental de los pasivos ambientales mineros "Acari", una aplicación de la Ley 28271

N°	Base de datos	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
[30]	Repositorio Institucional Universidad Nacional del Altiplano	Wilson David Ticona Pari	2018	Recuperación de suelos de las riberas de la laguna choquene generados por la contaminación de pasivos ambientales mineros en el Proyecto Minero Sillustani - Minsur S.A.
[31]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann	Gisela July, Maraza-Choque	2022	Aislamiento y purificación de microorganismos biodegradadores de cianuro obtenidos de un pasivo ambiental minero ubicado en el distrito de Palca, Tacna
[32]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Silvana Luzmila, Flores-Chávez	2019	Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible
[33]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Walter Javier, Díaz-Cartagena	2016	Contaminación del ecosistema en San Mateo de Huanchor por los pasivos ambientales mineros metalúrgicos y su impacto en la salud de los pobladores
[34]	Repositorio Institucional Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Antori, Alegre-Quijano	2022	Remediación de un efluente minero mediante bioadsorción con <i>Serratia marcescens</i> M8a-2T
[35]	Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte	Rosa Maryorit, Farge Crespín	2019	Métodos de mitigación sobre los efectos de los pasivos ambientales en zonas mineras
[36]	Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte	Orlando Aderli, Rodríguez Jara	2020	Técnicas de remediación de suelos contaminados por metales pesados en la industria minera
[37]	Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte	Anderson, Bardales-Shuña & Evaristo, Vilcazan-Mamani	2020	Sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú
[38]	Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte	Azcona Hidalgo, Hernan Alfredo	2022	Estudio comparativo de métodos de remediación de pasivos ambientales mineros en el Perú
[39]	REDALYC	Norma, Pérez, Alex, Schwarz, Homero, Urrutia	2017	Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas

N°	Base de datos	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
[40]	RepositorioUM (Repositorio Institucional de la Universidad do Minho)	Maria, Santiesteban, José Antonio, Grande, Maria Luisa, de la Torre, Teresa, Valentin, Fernando, Barrio-Parra, Miguel, Izquierdo, Maria José, González	2017	Estudio hidroquímico de los embalses afectados por procesos de drenaje ácido de mina en la faja pirítica ibérica
[41]	SCIELO	Johanna, Rojas-Conejo, Francisco, Picado-Pavón, Andrea, Suárez-Serrano, Cornelis, AM-Van Gestel, Christian, Golcher-Benavides & Guillermo, Durán-Sanabria	2022	Pasivo ambiental minero: una fuente potencial de contaminación por metales para los ecosistemas de agua dulce en Costa Rica
[42]	SCIELO	Gerardo, Zamora-Echenique, Julio, Lanza-Ferrufino, Julio, Arranz-González	2018	Metodología para la identificación y evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros con fines de priorización para su remediación
[43]	REDALYC	Walter, Pardavé-Livia, Brayan Steven, Serrano-Uribe & Camilo Hernando, Castillo-Martínez	2022	Tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero

Fuente: Elaboración propia

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS

Tipo de doc.	F	%	Año	F	%	Revista de publicación del artículo	F	%
Artículo científico	11	29%	2012	1	3%	Revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM	1	3%
Artículo de revisión	2	5%	2013	1	3%	Revista Entramados	1	3%
Tesis de grado	19	50%	2014	1	3%	Revista Avances	1	3%
Tesis de postgrado	6	16%	2015	4	11%	Revista Mexicana de Ciencias Geológicas	1	3%
			2016	1	3%	Revista Tecnura	1	3%

Tipo de doc.	F	%	Año	F	%	Revista de publicación del artículo	F	%
			2017	3	8%	Revista Geografiando	1	3%
			2018	6	16%	Revista Colombiana Biotecnol	1	3%
			2019	5	13%	Revista Tecnología y Ciencias del Agua	1	3%
			2020	4	11%	Revista Geog. Amer. Central	1	3%
			2021	2	5%	Revista de Medio Ambiente y Minería	1	3%
			2022	10	26%	Revista Politécnica	1	3%
						Repositorios Institucionales de Universidades	27	71%
Total	38	100%	Total	38	100%	Total	38	100%

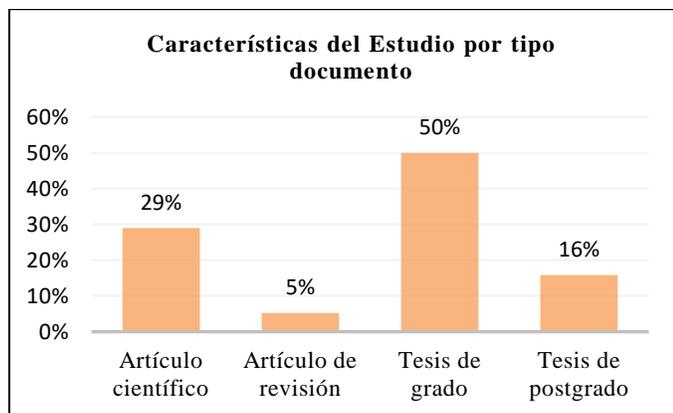


Fig. 2 Características del estudio por tipo de documento y porcentaje



Fig. 3 Características del estudio por porcentaje y año de publicación

TABLA III
ANÁLISIS GLOBAL DE ESTUDIOS

Categorías	Aportes
Métodos de remediación de pasivos ambientales mineros	El Método de remediación de tratamiento integral-MRTI-SLFCH, para el tratamiento integral de detoxificación de contaminantes en relaves metalúrgicos, involucrando el desarrollo de metodologías de las técnicas de flotación y de la concentración gravimétrica que se caracterizan por ser agentes remediares [4].
	El Método mediante los reactores bioquímicos pasivos involucra reacciones químicas y precipitación de metales, minimizando el impacto de los vertimientos ácidos sobre suelos y cuerpos de aguas. Los reactores bioquímicos pasivos son columnas empacadas con una mezcla reactiva conformada por materiales orgánicos, inorgánicos y un inóculo microbiano. Esta mezcla es usada para corregir el drenaje ácido minero por medio de procesos fisicoquímicos como la adsorción, precipitación de los metales y de la reducción del sulfato a sulfuro, mientras se incrementa el pH y la alcalinidad [12].
	Si bien existen distintos métodos de remediación para remover contaminantes como metales pesados e hidrocarburos del suelo y el agua subterránea, los mismos que demuestran los resultados positivos al aplicar el biovente, la oxidación química o la electroremediación [13].
	El objetivo principal de las técnicas de encapsulamiento es limitar la percolación del oxígeno y del agua como método de prevención del proceso generador de drenaje ácido, en consecuencia, “se limita la movilización de elementos contaminantes. Estas barreras se construyen con materiales artificiales, y cubren o encapsulan el pasivo ambiental minero [24].
	El método de impermeabilización consiste en el empleo de capas impermeabilizantes que suponen un encapsulamiento funcional, con el objetivo de limitar la circulación de gases (oxígeno) y evitar la infiltración de agua; este método implica el empleo de geosintéticos [38].

Nota: Información obtenida de los documentos de estudio en el que se han tomado aspectos de manera global por el autor en base a la pregunta de investigación. Elaboración propia

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La búsqueda de información de la revisión de literatura científica se realizó en el periodo 2012 – 2022, encontrándose como resultado 38 artículos de investigación para analizar, sin embargo, una de las limitantes en la búsqueda fue el periodo establecido para la presente investigación.

El método de remediación integral denominado MRTI-SLFCH involucró el proceso de desintoxicación de los relaves metalúrgicos de cianuración haciendo uso del método de concentración gravimétrica, que se distingue por utilizar una cabeza general de relave de Cerro El Toro, que permite rescatar los metales pesados tales como: el bario con el 65% de recuperación, el cadmio con el 85% de recuperación, el mercurio con el 77% de recuperación y el plomo con el 30% de recuperación [4].

Existen diferentes métodos de remediación de pasivos ambientales mineros. En primer lugar, el método biológico

bioventeo que logra alcanzar un índice superior de eliminación si se combina con otros métodos, estos pueden ser el bioaumentación, la fitoextracción y el biosparging. Los mismos que pueden destituir los metales pesados en sedimentos infectados por drenaje ácido de mina. En segundo lugar, el método de oxidación química que se emplea en el tratamiento de agua residual por medio de las reacciones Fenton, las cuales necesitan hierro y peróxido de hidrógeno para actuar como oxidantes. En un entorno ácido y con un ligero aumento de temperatura se obtuvieron tasas de 80% de oxidación lo que favorece el uso de un residuo minero ácido. En tercer lugar, la electrorremediación que básicamente es utilizado en el proceso de recuperación del suelo contaminado por metales pesados como el plomo, el cadmio y el arsénico, este proceso se consigue por medio de electrolitos (el agua y el ácido acético), el carbón activado y el ácido cítrico [13].

De acuerdo con los hallazgos en la investigación, se cumplió con la problemática de investigación en la que se dio a conocer cuáles son los métodos de remediación de pasivos ambientales producto de la actividad minera, tales como las técnicas de flotación y de concentración gravimétrica, los reactores químicos pasivos, el bioventeo, la oxidación química y la electrorremediación.

Se realizó la búsqueda de información en diferentes bases de datos confiables, arrojando como resultado treinta y ocho (38) artículos de investigación entre tesis de grado, tesis de post grado, revistas científicas, que cumplen con la estructura IMRD y año de publicación entre el 2012-2022.

Con relación a la información analizada, se obtuvo como resultado que los artículos científicos y las tesis relacionadas con la Remediación de Pasivos Ambientales producto de la actividad minera se intensifican a partir del año 2018 con un 16 %, esto se debe a que actualmente el crecimiento de la empresa minera responsable y la preocupación por el medio ambiente está aumentando cada vez más y están comprometidos con el desarrollo sostenible.

De acuerdo con el estudio realizado el método bioventeo marcha como procedimiento de saneamiento de terrenos infectados con anticipación; mientras que la electrorremediación gasta mayor porción de reactivos, esto se debe a que las partículas no en su totalidad logran tener relación con las soluciones y arcillas empleadas. Por otro lado, el

método de la oxidación química para el tratamiento de aguas ácidas arroja como consecuencia favorable la curación de compuestos químicos (contaminantes orgánicos) [13].

En conclusión, la presente revisión sistemática es importante porque da a conocer de manera resumida los diferentes métodos de remediación más usados para remediar los pasivos ambientales mineros, para que las empresas mineras establezcan medidas de mitigación en los pasivos ambientales, evitar contaminación al medio ambiente y todo lo que lo rodea, así como el cumplimiento de la ley peruana N°28271 que regula los pasivos ambientales de la actividad minera. En esa misma línea, cuando se trate del uso de la remediación del agua por el método de oxidación química, se debe tener presente el uso correcto de la dosis del compuesto a aplicar, ya que si no se toma en cuenta la cantidad correcta puede causar una contaminación mayor a la que se tenía al inicio. Así mismo, una de las limitaciones en el presente estudio ha sido la poca información existente sobre la demostración del método de remediación el bioventeo, como medida de restauración de zonas mineras contaminadas.

REFERENCIAS

- [1] Chappuis, M. *Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú. Medio Ambiente y Desarrollo* 168, Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).2019.
- [2] Riesgo, P., Rodríguez, G., Krzemieñ, A., García, S. & Fidalgo, G., Subsistencia versus deslizamientos naturales cuando se trata de responsabilidades por daños a la propiedad en minas de carbón subterráneas. *Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias Mineras*, vol. 126, pp. 104175. ISSN 13651609. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2019.104175>. 2020
- [3] Congreso de la República. Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3588-28271>. 2004
- [4] Flores, et al. Desarrollo y validación de una tecnología limpia para el tratamiento integral de neutralización de efluentes y relaves metalúrgicos basados en el empleo de agentes calcáreos. Comunidad Peruana Científica en Brasil “CCP-BR”. https://www.ccp-br.fee.unicamp.br/JP3I_website/antiores/02jp3i/papers/Paper013.pdf. 2017.
- [5] Cota, K., Núñez, J., Delgado, M., & Martínez, A. Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biotecnía*, 21(1), 37-44. <https://doi.org/10.18633/biotecnía.v21i1.811>. 2019.
- [6] Bruguera, N., Gallardo, D., & Díaz, J. A. Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba. *Avances*, 22 (3), 469-490. <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/>. 2020.
- [7] Mesa, N. F. ¿Revisión sistemática o revisión narrativa? *Ciencia y Salud virtual*, 5(1), 1-4. <https://doi.org/10.22519/21455333.372>. 2013
- [8] López, L., López, M. & Medina, G. La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado*, 13(1), 78-91. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>. 2017.
- [9] Kirschbaum, A., Murray, J., Arnosio, M., Tonda, R. & Cacciabue, L. Pasivos ambientales mineros en el Noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), pp. 248-264. 2012.
- [10] García, C., García, M., & Agudelo, C. Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. *Revista Tecnura*, 18(42), 90-102. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257032091008>. 2014.
- [11] Jensen, K., & Birche, M. La recuperación de pasivos ambientales desde el proyecto de paisaje. *Geograficando*, 14(2) <https://doi.org/10.24215/2346898Xe044>. 2018.
- [12] Vásquez, Y. & Escobar, M. Reactores bioquímicos pasivos: una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos en mina. *Revista Colombiana Biotecnológica*, (22) 1, 53-59. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.74090>. 2020.
- [13] Guadarrama, E. Casos de estudio de métodos de remediación: biovente, oxidación química y remediación electrocinética [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional Universidad Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/18169>. 2022.
- [14] Corzo, A. Impacto de los pasivos ambientales mineros en el recurso hídrico de la microcuenca quebrada Párac, distrito de san mateo de Huanchor, Lima [Tesis para optar al grado de magister, Pontificia Universidad La Católica del Perú]. Repositorio institucional de Pontificia Universidad La Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6160>. 2015.
- [15] Cedrón, M. Elaboración de criterios para la transformación de pasivos mineros en activos socio - ambientales sostenibles [Tesis para optar al grado de magister, Pontificia Universidad La Católica del Perú]. Repositorio institucional de Pontificia Universidad La Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/4654>. 2013.
- [16] Alarcón, W. & Mashúan, A. Evaluación de *Juncus Areticus* e incorporación de enmienda orgánica para la remediación de suelos contaminados con metales pesados de Huamachuco [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/36913>. 2018.
- [17] Pérez, E. . *Los pasivos ambientales mineros y su influencia en la salud de la comunidad campesina El Tingo, Hualgayoc, Cajamarca – 2018* [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/35349>. 2018.
- [18] Rubiños, G. Rehabilitación Ambiental de los pasivos ambientales mineros de la Ex. Unidad Minera San Genaro – Castrovirreyrna, Huancavelica 2020 [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/61337>. 2021.
- [19] Alcázar, A. Tecnologías de Remediación Para Mitigar los Potenciales Impactos Ambientales Generados por Drenaje Ácido de Minas: Revisión Sistemática [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/99391>. 2022.
- [20] Quispe, J. Estado Actual de los Pasivos Ambientales de la Actividad Industrial Minera en el Perú, Revisión Sistemática - 2022 [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/103674>. 2022.
- [21] Góngora, K. La importancia de la definición de las actividades de remediación de pasivos ambientales mineros [Tesis para optar al grado de magister, Universidad De San Martín De Porres]. Repositorio Institucional Universidad De San Martín De Porres. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/1787>. 2015.
- [22] Mauricio, N. Remediación ambiental de las zonas alteradas por la minería colonial, mediante el aprovechamiento de sus relaves en el distrito de Vicco y alrededores [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2901>. 2022.
- [23] Lozano, W. Evaluación de los parámetros físicos y químicos de los recursos hídricos en el Distrito de Goyllarisquizga influenciado por los pasivos ambientales de carbón Provincia Daniel Alcides Carrión – Pasco - 2018 [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2039>. 2019.
- [24] García, S. Remediación de los pasivos ambientales mineros generados por la ex unidad minera Lichicocha activos mineros SAC con fines de disminuir los lixiviados a la subcuenca del río Santa Eulalia y cuenca del río Rímac [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/815>. 2018.
- [25] Paucar, G. Diseño y estabilidad de botaderos de desmonte para la remediación de pasivos ambientales de la mina recuperada - Huancavelica [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/402>. 2015.
- [26] Escandón, C. Identificación de pasivos ambientales mineros en la provincia de Pasco, sus efectos y realidad actual 2018 [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1486>. 2019.
- [27] Saciga, A. Remediación de pasivos ambientales coloniales en terrenos de la comunidad campesina San Antonio de Rancas – Distrito de Simón Bolívar – Pasco [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2760>. 2022.
- [28] Huaranca, R. Optimización de planes de cierre de pasivos ambientales mineros [Tesis para optar al grado de magister, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22529>. 2021.
- [29] Negrón, M. Reaprovechamiento y remediación ambiental de los pasivos ambientales mineros "Acarí", una aplicación de la Ley 28271 [Tesis para optar al grado de magister, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/2097>. 2015.
- [30] Ticona, W. Recuperación de suelos de las riberas de la laguna choquene generados por la contaminación de pasivos ambientales mineros en el

- Proyecto Minero Sillustani - Minsur S.A. [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8273>. 2018.
- [31] Maraza, G. Aislamiento y purificación de microorganismos biodegradadores de cianuro obtenidos de un pasivo ambiental minero ubicado en el distrito de Palca, Tacna [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/4724>. 2022.
- [32] Flores, S. Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible [Tesis para optar al grado de magister, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10899>. 2019.
- [33] Diaz, W. Contaminación del ecosistema en San Mateo de Huanchor por los pasivos ambientales mineros metalúrgicos y su impacto en la salud de los pobladores [Tesis para optar al grado de magister, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5045>. 2016.
- [34] Quijano, A. Remediación de un efluente minero mediante bioadsorción con *Serratia marcescens* M8a-2T [Tesis para optar al grado de magister, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18442>. 2022.
- [35] Farge, R. Métodos de mitigación sobre los efectos de los pasivos ambientales en zonas mineras [Tesis para optar al grado de Bachiller, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/27047>. 2019.
- [36] Rodríguez, O. Técnicas de remediación de suelos contaminados por metales pesados en la industria minera [Tesis para optar al grado de Bachiller, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/26375>. 2020.
- [37] Bardales, A. & Vilcazan, E. Sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/31749>. 2020.
- [38] Azcona, H. Estudio comparativo de métodos de remediación de pasivos ambientales mineros en el Perú [Tesis para optar al grado de Ingeniero, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/32587>. 2022.
- [39] Pérez, N., Schwarz, A. & Urrutia, H. Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8 (1), 53-64. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v8n1/2007-2422-tca-8-01-00053.pdf>. 2017.
- [40] Santiesteban, M. et al.. Estudio hidroquímico de los embalses afectados por procesos de drenaje ácido de mina en la faja pirítica ibérica [Artículo científico, Universidad do Minho]. RepositoriUm. <https://hdl.handle.net/1822/49210>. 2017.
- [41] Rojas, J. et al. Pasivo ambiental minero: una fuente potencial de contaminación por metales para los ecosistemas de agua dulce en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (68), 329-352. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.12>. 2022.
- [42] Zamora, G., Lanza, J. & Arranz, J. Metodología para la identificación y evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros con fines de priorización para su remediación. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, (5), 31-43. http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/n5/n5_a04.pdf. 2018.
- [43] Pardavé, W., Serrano, B., & Castillo, C. Tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero. *Revista Politécnica*, vol. 18, núm. 36, pp. 115-125. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a2>. 2022.