

ESCOMBRERAS MINERAS DE RÉGIMEN ESPECIAL DE PEQUEÑA MINERÍA METÁLICA: UN NUEVO HORIZONTE PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICO

Jhoni Iván Bravo Aillón

inggeol@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0548-7086>

Empresa minera privada EXPAUSA - Ecuador

Miryan Elizabeth Macías Castro

lcdammc@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6125-8016>

Ministerio de Educación - Ecuador

Diana Ivone Bravo Macías

d_ibm1987@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7977-515X>

Ministerio de Educación - Ecuador

Recibido: 19/11/24

Aceptado: 16/12/24

Publicado: 01/01/25

RESUMEN

El artículo aborda el potencial de las escombreras mineras de pequeña minería metálica, específicamente en Bella Rica de Azuay, Ecuador, para ser reutilizadas en la producción de materiales de construcción ecológicos. Se exploran tres etapas metodológicas: revisión bibliográfica sobre la composición mineralógica y geoquímica de los residuos, estudios de campo y laboratorio para determinar su idoneidad y el desarrollo de estrategias para mitigar los impactos ambientales. Los residuos se caracterizan por una mineralogía diversa, que incluye silicatos, carbonatos y sulfuros metálicos, con minerales valiosos como cobre, cobalto y oro. La investigación destaca la viabilidad de aprovechar estos materiales en la fabricación de concretos reciclados y otros productos de bajo impacto ambiental, a pesar de los riesgos asociados, como la generación de drenaje ácido de mina (AMD). Para mitigar estos riesgos, se proponen procesos de estabilización de sulfuros y recuperación selectiva de metales estratégicos. Además, se resalta el impacto positivo que tendría la valorización de estos residuos para la economía circular y la minería sostenible. Este enfoque no solo promovería la reutilización de escombreras como recursos en la construcción ecológica, sino que también generaría oportunidades económicas en las comunidades locales dependientes de la minería, impulsando un modelo de desarrollo regional más sostenible.

PALABRAS CLAVE: residuos mineros, pequeña minería metálica, reutilización de escombreras, Bella Rica, sostenibilidad minera.

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>

enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

MINE WASTE DUMPS FROM SPECIAL REGIME OF SMALL-SCALE METALLIC MINING: A NEW HORIZON FOR ECO-FRIENDLY CONSTRUCTION MATERIALS

ABSTRACT

The article addresses the potential of mine waste dumps from small-scale metallic mining, specifically in Bella Rica in Azuay, Ecuador, to be reused in the production of eco-friendly construction materials. It explores three methodological stages: a literature review on the mineralogical and geochemical composition of the waste, field and laboratory studies to determine its suitability and the development of strategies to mitigate environmental impacts. The waste is characterized by diverse mineralogy, including silicates, carbonates, and metallic sulfides, with valuable minerals such as copper, cobalt, and gold. The research highlights the feasibility of using these materials in the production of recycled concrete and other low-impact construction products, despite associated risks such as the generation of acid mine drainage (AMD). To mitigate these risks, stabilization processes for sulfides and selective recovery of strategic metals are proposed. In addition, the study emphasizes the positive impact that the valorization of this waste could have on the circular economy and sustainable mining. This approach would not only promote the reuse of mine dumps as resources for green construction, but also create economic opportunities in local communities dependent on mining, driving a more sustainable model of regional development.

KEY WORDS: mining waste, small-scale metallic mining, mine waste reuse, Bella Rica, mining sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La minería metálica, fundamental para el abastecimiento de metales estratégicos en la industria global, genera enormes volúmenes de residuos sólidos, incluyendo escombreras y relaves, que históricamente han sido considerados como pasivos ambientales peligrosos (Guzmán et al., 2020). A nivel mundial, estos residuos sólidos representando un desafío ambiental, tanto para las autoridades reguladoras como para las comunidades cercanas a los sitios de explotación (Kulczycka et al., 2020), debido a los impactos ambientales negativos que pueden provocar, tales como la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, pérdida de biodiversidad y emisiones de gases tóxicos (Arias et al., 2021). La acumulación de residuos mineros, a menudo en forma de escombreras y relaves, conlleva riesgos relacionados con la estabilidad geotécnica de los depósitos, la generación de drenaje ácido de mina (AMD) y la liberación de metales pesados al medio ambiente, lo que provoca efectos adversos en los ecosistemas y la salud humana (Hakim et al., 2023).

En este contexto, se ha intensificado la discusión sobre cómo gestionar estos residuos de manera que puedan tener un impacto positivo, impulsando el concepto de economía circular en la minería (Olivares & Arias, 2024). Esta filosofía busca maximizar el aprovechamiento de los recursos a través de la reutilización, reciclaje y valorización de los residuos, de modo que la actividad minera no solo minimice su impacto ambiental, sino que también aporte al desarrollo económico de las comunidades aledañas (Hamraoui et al., 2024). En esta línea, la reutilización de residuos mineros como insumos para la construcción sostenible ha emergido como una estrategia clave para reducir la dependencia de materias primas vírgenes y mitigar el impacto ambiental de la minería (Makhathini et al., 2023).

Dentro de este enfoque global, las escombreras generadas por la minería metálica a pequeña escala, especialmente las que operan bajo un régimen de explotación, representan un área de interés emergente para la valorización de residuos mineros (Bruguera et al., 2020). Aunque estos residuos han sido históricamente descartados como fuentes de pasivos ambientales, investigaciones recientes han demostrado que muchos de estos materiales contienen fases metaestables que pueden transformarse en agregados de alto valor, ideales para la fabricación de concretos ecológicos, bloques estructurales, y otros productos de construcción (Escobar et al., 2019). La variabilidad mineralógica de las escombreras de pequeña minería ofrece una oportunidad única para el desarrollo de materiales de construcción con propiedades específicas y de alto rendimiento. Por ejemplo, algunas escombreras ricas en sílice o en óxidos de hierro pueden ser utilizadas para crear concretos de alta resistencia o agregados ligeros, con propiedades físicas que los hacen adecuados para diversos usos constructivos (Londoño et al., 2023).

A medida que las investigaciones en geoquímica aplicada y geometalurgia avanzan, se han identificado oportunidades para recuperar elementos valiosos presentes en los residuos mineros, como tierras raras, metales preciosos o elementos traza que, al ser reintegrados en las cadenas productivas, podrían

generar un valor económico significativo (Pada, 2023; Pirraglia, 2024). Estos avances apuntan no solo a la transformación de los residuos en productos comercializables, sino también a su integración dentro de un modelo de economía circular que aprovecha los recursos contenidos en los desechos mineros, reduciendo la necesidad de extracción de recursos primarios (Díaz et al., 2019).

La reutilización de residuos mineros en la industria de la construcción sostenible tiene un gran potencial, como lo demuestran casos exitosos en países como Brasil, donde los relaves mineros se utilizan para la fabricación de adoquines y bloques de concreto y Suecia, donde los residuos ricos en pirita de la mina de cobre se convierten en ácido sulfúrico para la extracción de fosfatos y otros subproductos (Parbhakar & Baumgartner, 2023). Estos ejemplos resaltan el potencial de transformar pasivos ambientales en recursos estratégicos, siempre que se cuente con un enfoque integral que incluya la caracterización adecuada de los materiales y el desarrollo de tecnologías de procesamiento que mejoren sus propiedades. Sin embargo, para replicar estos modelos en el contexto de la pequeña minería metálica, es fundamental superar desafíos técnicos, económicos y regulatorios, que actualmente limitan la escalabilidad de estos proyectos (LLaccho et al., 2023).

La caracterización detallada de los residuos mineros es un paso crucial para determinar su idoneidad como materiales de construcción (Molahid et al., 2023). La caracterización implica un análisis exhaustivo de la composición mineralógica, geoquímica y estructural de los residuos, lo que permite identificar las fases minerales presentes, su estabilidad y su comportamiento en diferentes condiciones ambientales (Malaoui et al., 2023). Sin embargo, en muchos casos, la caracterización de estos materiales se limita a parámetros básicos como la densidad de pulpa, el tamaño de partícula y los análisis químicos limitados, lo que no proporciona información suficiente sobre su evolución post-deposición o sobre los riesgos asociados a su inestabilidad (Lemos et al., 2023).

Este artículo tiene como objetivo explorar el potencial de las escombreras de régimen especial en la pequeña minería metálica como fuente alternativa de materiales de construcción ecológicos. A través de un análisis de las propiedades fisicoquímicas, los desafíos de procesamiento y las tecnologías emergentes para la valorización de estos residuos, se pretende ofrecer un marco conceptual y técnico que permita una gestión más sostenible de estos materiales.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de las escombreras mineras de pequeña minería metálica como lo es Bella Rica, ubicado en la provincia del Azuay en Ecuador, como fuentes de materiales ecológicos para la industria de la construcción. La investigación se estructura en tres fases metodológicas interrelacionadas: revisión bibliográfica, trabajo de campo y laboratorio, y análisis técnico-ambiental de valorización.

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

Esta revisión abarcó estudios previos sobre la valorización de residuos mineros en aplicaciones constructivas, técnicas emergentes de reciclaje y estabilización de materiales con potencial contaminante, así como marcos regulatorios nacionales e internacionales aplicables a la reutilización de residuos en contextos productivos. La información recopilada permitió establecer una base conceptual para orientar los análisis de campo y definir los criterios de selección y evaluación de los residuos mineros con miras a su reutilización segura y eficiente.

Con base en los resultados obtenidos, se diseñaron estrategias de valorización ambientalmente responsables, que incluyeron técnicas de estabilización química de sulfuros (encapsulamiento con geopolímeros, neutralización con aditivos alcalinos) y métodos de recuperación selectiva de metales críticos mediante flotación y lixiviación diferencial. Estos procesos no solo buscan minimizar impactos negativos, sino también maximizar el aprovechamiento de elementos valiosos, promoviendo un enfoque de economía circular minera.

3. RESULTADOS

El análisis geológico y geoquímico de las escombreras del sector minero Bella Rica reveló una mineralogía diversa, compuesta por silicatos, carbonatos y sulfuros metálicos, así como elementos de interés económico. La composición química obtenida a partir de la pérdida por calcinación (LOI) y el análisis geoquímico de los elementos en las muestras analizadas se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1

Análisis de pérdida por calcinación (LOI).

Muestras	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (T) (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	LOI (%)
M-01	14,1	12,55	0,07	0,05	2,11	0,977	49,31	10,6	7,71	0,185	2,65
M-03	12,63	12,93	0,1	0,2	2,18	1,191	50,18	11,09	6,33	0,184	3,15
M-06	13,89	10,8	0,07	0,07	4,16	0,845	51,31	8,67	6,89	0,18	2,63
M-07	16,47	6,03	0,11	0,16	4,2	0,569	60,08	6,11	3,19	0,114	2,27
M-10	14,47	11,75	0,08	0,26	2,82	1,000	50,36	9,9	7,77	0,188	1,73
M-13	14,12	11,88	0,08	0,06	1,9	0,994	51,04	5,67	7,46	0,248	6,48
M-15	12,79	14,11	0,07	0,09	1,77	0,895	48,62	11,71	8,34	0,199	2,05
M-16	12,19	15,44	0,07	0,04	0,48	0,903	48,99	3,78	10,11	0,216	8,34
M-18	13,41	12,13	0,11	0,11	3,67	1,223	51,69	9,42	6,44	0,207	2,1
M-19	12,78	13,9	0,12	0,06	1,02	1,465	48,05	7,35	5,58	0,151	10,37

Fuente: autoría propia.

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

Tabla 2
Análisis geoquímico de los elementos.

Elemento	M-01	M-03	M-06	M-07	M-10	M-13	M-15	M-16	M-18	M-19
Li	6,8	9,4	4,8	4,7	4,9	13,7	4,6	25,1	4,0	12,8
Rb	0,42	3,79	0,28	3,66	5,93	0,71	1,41	1,38	1,12	2,98
Cs	0,11	0,28	0,07	0,39	1,17	1,54	0,96	1,15	0,30	4,55
Be	0,26	0,30	0,23	0,59	0,24	0,23	0,22	0,21	0,34	0,39
Sr	84	75	126	242	81	61	80	14,5	100	94
Ba	12,7	9,7	25,8	118	21,7	16,0	8,2	2,8	21,8	31
Y	23,7	24,8	19,6	16,9	21,2	22,0	20,6	16,5	25,2	24,9
Lu	0,36	0,41	0,31	0,25	0,34	0,35	0,33	0,29	0,40	0,41
Zr	48	57	41	43	45	45	41	40	38	66
Hf	1,41	1,70	1,27	1,27	1,37	1,38	1,25	1,23	1,34	2,02
V	331	381	303	154	327	318	305	299	366	374
Nb	3,2	4,1	2,93	2,91	3,3	3,2	3,1	2,93	4,1	4,1
Ta	0,22	0,27	0,20	0,20	0,22	0,22	0,24	0,20	0,26	0,30
Cr	231	101	189	53	232	225	212	212	111	113
Mo	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
W	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	0,54	0,63	0,83	<0,4	<0,4	<0,4
Co	43	41	37	28	38	40	39	27	45	40
Ni	102	77	96	15	103	102	97	89	83	84
Cu	122	147	61	122	94	116	22	191	207	151
Ag	0,26	0,31	0,20	0,31	0,40	0,46	0,19	0,65	0,22	0,32
Zn	80	91	76	40	93	1358	54	163	80	87
Cd	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,50	4,62	<0,2	0,34	<0,2	<0,2
Hg	0,014	0,011	0,004	0,003	0,0025	0,0185	0,003	0,006	0,002	0,148
Ga	14,6	14,6	15,4	15,6	14,4	14,2	15,3	13,8	15,1	14,9
Sn	0,51	0,58	0,45	0,36	0,58	0,53	0,59	0,77	0,56	0,61
Pb	<2	<2	<2	<2	<2	3,11	<2	<2	<2	<2
Sb	<1,6	3,5	1,12	<1,6	8,9	18,0	19,7	6,9	<1,6	3,7
La	2,84	3,4	2,51	6,4	2,58	3,1	2,69	1,98	3,43	3,5
Ce	7,0	9,0	6,4	13,6	6,9	8,1	6,9	5,3	9,0	9,5
Pr	1,14	1,43	1,01	1,93	1,11	1,27	1,08	0,83	1,41	1,52
Nd	5,7	7,4	5,2	8,6	5,8	6,4	5,6	4,3	7,2	7,8
Sm	1,93	2,48	1,74	2,16	1,99	2,15	1,87	1,50	2,44	2,58
Eu	0,75	0,93	0,79	0,71	0,82	0,84	0,95	0,53	0,96	0,89
Gd	2,80	3,33	2,49	2,47	2,74	2,98	2,63	2,05	3,37	3,43
Tb	0,54	0,64	0,46	0,44	0,53	0,55	0,50	0,41	0,64	0,65
Dy	3,6	4,3	3,14	2,73	3,5	3,7	3,4	2,76	4,3	4,3
Ho	0,82	0,94	0,71	0,60	0,79	0,81	0,77	0,62	0,94	0,97
Er	2,57	2,88	2,19	1,82	2,35	2,53	2,33	1,95	2,81	2,88
Tm	0,38	0,43	0,31	0,26	0,35	0,36	0,33	0,28	0,41	0,42
Yb	2,32	2,62	1,92	1,66	2,23	2,27	2,10	1,84	2,54	2,71

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
 enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

Th	0,24	0,29	0,21	0,93	0,24	0,24	0,20	0,21	0,26	0,30
U	0,07	0,08	0,06	0,29	0,07	0,07	0,07	0,06	0,09	0,09

Fuente: autoría propia.

Los minerales identificados incluyen epidota, clorita, pirita, calcopirita, calcita, titanita, minerales del grupo de la cobaltita, pirrotita, digenita, esfalerita, cuarzo y oro. La distribución de estos minerales sugiere que los residuos provienen de un sistema mineralizado polimetálico. En particular, la presencia predominante de sulfuros metálicos, como pirita y calcopirita, indica un riesgo potencial de generación de drenaje ácido de mina (AMD) debido a la oxidación de estos minerales en contacto con el oxígeno y el agua. Sin embargo, la coexistencia de carbonatos, en especial la calcita, puede generar un efecto buffer, neutralizando la acidez y reduciendo el impacto ambiental de la oxidación de sulfuros en ciertos escenarios geoquímicos.

Los análisis geoquímicos revelaron concentraciones significativas de cobre, cobalto y oro, lo que refuerza la posibilidad de recuperar estos elementos mediante procesos de concentración selectiva. La presencia de esfalerita y digenita, aunque en menores proporciones, sugiere la existencia de zinc y sulfuros de cobre con potencial de aprovechamiento mediante tecnologías de separación y concentración. También, se realizaron pruebas de granulometría, estabilidad química y resistencia mecánica en las muestras representativas de las escombreras. Se identificó que la fracción silicatada, compuesta por cuarzo, epidota y clorita, posee propiedades adecuadas para su uso como agregado en concretos estructurales y en la fabricación de materiales para pavimentos. Los carbonatos, en particular la calcita, pueden actuar como agentes cementantes en mezclas estabilizadas, mejorando la resistencia mecánica de los materiales de construcción. Sin embargo, la presencia de sulfuros reactivos como pirita y pirrotita representa un riesgo en términos de estabilidad química, ya que su oxidación puede generar lixiviados ácidos que comprometan la durabilidad de los materiales fabricados a partir de estos residuos.

El estudio también evaluó la viabilidad de recuperar metales estratégicos a partir de las escombreras. Se determinó que la calcopirita y la digenita contienen cantidades considerables de cobre, lo que abre la posibilidad de aplicar procesos de flotación diferencial para su concentración. Además, la presencia de minerales del grupo de la cobaltita sugiere que el cobalto podría ser extraído y utilizado en aplicaciones industriales, como la fabricación de baterías y aleaciones especiales. La detección de oro en los residuos indica que una porción del metal valioso no ha sido recuperada en el proceso de beneficio primario, lo que justificaría la implementación de tecnologías de recuperación como lixiviación selectiva o concentración gravitacional.

Se identificaron riesgos ambientales derivados de la presencia de sulfuros metálicos reactivos, los cuales pueden inducir la formación de drenaje ácido de mina (AMD) en condiciones de exposición prolongada a la intemperie. Asimismo, el contenido de metales pesados en los residuos sugiere que, sin un tratamiento

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

adecuado, podrían generarse procesos de movilización de contaminantes hacia los ecosistemas circundantes.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la caracterización de las escombreras mineras de Bella Rica sugieren que estos residuos tienen un potencial significativo para su reutilización en la industria de la construcción y la recuperación de metales estratégicos (Cordero et al., 2022). Sin embargo, la viabilidad de su aprovechamiento depende de varios factores, incluidos los riesgos ambientales asociados y la necesidad de procesos de tratamiento adecuados para asegurar que los residuos sean transformados en productos útiles sin causar daño al medio ambiente (McConnell et al., 2024).

Los residuos de las escombreras, particularmente los que contienen silicatos y carbonatos, tienen un potencial considerable para ser utilizados como agregados en la producción de concreto estructural y materiales de pavimentación (Díaz et al., 2019). Los silicatos presentes en los residuos, como el cuarzo, epidota y clorita, tienen propiedades mecánicas favorables, que los hacen aptos para la fabricación de concretos de alta resistencia y los carbonatos, especialmente la calcita, no solo pueden mejorar las propiedades mecánicas de los productos, sino que también pueden actuar como agentes cementantes, lo que los hace atractivos para la producción de materiales de construcción ecológicos (Cadena et al., 2021). Sin embargo, el reto principal radica en la presencia de sulfuros reactivos que pueden generar drenaje ácido y contaminar el medio ambiente. Para mitigar este riesgo, es necesario pretratar los residuos antes de su utilización. Algunas posibles estrategias de tratamiento incluyen la encapsulación de sulfuros mediante mezclas cementantes con alto pH, que neutralicen los ácidos generados por la oxidación de los sulfuros, mezclas estabilizadas con aditivos como cal o silicatos reactivos para neutralizar la acidez y prevenir la liberación de metales pesados y tratamientos térmicos o químicos para pasivar los sulfuros y evitar su interacción con el agua y el aire (Parviainen et al., 2025). Estos tratamientos permitirían garantizar la estabilidad química de los materiales a largo plazo, evitando que los residuos mineros se conviertan en una fuente de contaminación.

La presencia de cobre, cobalto y oro en los residuos mineros sugiere que estas escombreras podrían ser una fuente valiosa de metales estratégicos. Estos metales son cruciales para varias industrias, como la tecnología, la energía renovable y la electrónica. El cobre puede ser recuperado eficazmente mediante procesos como la flotación diferencial o la lixiviación ácida, y el cobalto mediante lixiviación selectiva, un proceso que ya se utiliza en la minería de metales preciosos (Estay & Díaz, 2019). Por otro lado, el oro, que se encuentra en menor concentración, podría ser recuperado mediante técnicas no convencionales como la concentración gravitacional o la lixiviación con cianuro de bajo impacto, que tienen un menor impacto ambiental en comparación con las prácticas tradicionales de minería (Parbhakar & Baumgartner, 2023). Por ende, el aprovechamiento de estos metales estratégicos también permitiría fomentar una minería más sostenible, Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

al reducir la necesidad de extraer metales de yacimientos primarios y aprovechar los recursos ya presentes en los residuos.

A pesar de las oportunidades que ofrecen las escombreras mineras, los riesgos ambientales asociados son significativos (Cisternas, 2022). El principal riesgo es la generación de drenaje ácido de mina (AMD), que puede liberar metales pesados en el ambiente y comprometer la calidad del agua en la región (Parbhakar & Baumgartner, 2023). Para mitigar estos riesgos, es fundamental implementar estrategias de tratamiento y estabilización antes de utilizar estos residuos en la construcción. Las estrategias más efectivas incluyen la clasificación selectiva de los residuos, separando las fracciones más ricas en sulfuros para su tratamiento específico, la encapsulación de sulfuros en matrices que impidan su exposición a la atmósfera, como mezclas cementantes y el monitoreo ambiental constante para evaluar la calidad del agua y el suelo circundante, asegurando que no haya contaminación derivada de la oxidación de los residuos. Estas estrategias permitirán que los residuos de las escombreras sean reutilizados de manera segura y sostenible, minimizando los impactos negativos en el medio ambiente.

5. CONCLUSIONES / CONSIDERACIONES FINALES

La valorización de escombreras mineras de pequeña minería metálica como fuentes de materiales de construcción ecológicos y recuperación de metales estratégicos representa una oportunidad para promover un modelo de economía circular en la minería. Mediante el uso de tecnologías avanzadas de tratamiento y recuperación, es posible reducir el impacto ambiental de estas escombreras, mientras se generan recursos valiosos para la industria de la construcción, fomentando la sostenibilidad en ambas áreas.

El éxito de la valorización de residuos mineros depende de la mejora de las tecnologías de tratamiento, especialmente en la recuperación de metales y la estabilización de residuos que contienen sulfuros y metales pesados. Invertir en la investigación y el desarrollo de procesos más eficientes permitirá transformar estos residuos en materiales de construcción seguros y rentables, contribuyendo al avance de la minería sostenible y la reducción de riesgos ambientales asociados.

La creación de marcos regulatorios adaptados a las particularidades de la pequeña minería es esencial para fomentar la valorización de residuos mineros en la construcción ecológica y la recuperación de metales. Además, la colaboración activa entre el sector público y privado es fundamental para impulsar la adopción de prácticas innovadoras, garantizando la viabilidad económica y la protección ambiental en estos proyectos. Una regulación eficiente y flexible puede potenciar el aprovechamiento de las escombreras como una fuente sostenible de recursos.

La implementación exitosa de proyectos de valorización de escombreras mineras ofrece un potencial no solo para la regeneración ambiental, sino también para la creación de oportunidades económicas en las comunidades locales. A través de la mejora de las prácticas mineras y la generación de productos

Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

ecológicos para la construcción, se puede contribuir al desarrollo económico regional, generando empleo y mejorando las condiciones de vida en áreas tradicionalmente dependientes de la minería.

6. REFERENCIAS

- Arias, S., Córdova, J., & Gómez, M. (2021). Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción. *Revista EIA*, 18(36), 1-12. <https://doi.org/10.24050/reia>
- Bruguera, N., Gallardo, D., & Díaz, J. (2020). Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba. *Avances*, 22(3), 469-490.
- Cadena, L., Frías, M., Medina, C., & Sánchez, M. (2021). *Aprovechamiento de los residuos procedentes de la minería del carbón como puzolanas para la fabricación de nuevos eco-cementos* (Vol. 1, pp. 25-52).
- Cisternas, L. (2022). *Economía circular en procesos mineros* (Vol. 1). RIL.
- Cordero, C., Marchevsky, N., Chiacchiarini, P., & Giaveno, M. (2022). Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y Geología*, 38(1), 70-82.
- Díaz, M., Ortega, F., & Martínez, G. (2019). Economía circular de los residuos mineros no estructurales: de residuo a recurso. *International Congress on Project Management and Engineering*, 1(23), 1144-1155.
- Escobar, I., Villalobos, M., Pi, T., Romero, F., & Carrillo, J. (2019). Identification of jarosite and other major mineral Fe phases in acidic environments affected by mining-metallurgy using X-ray Absorption Spectroscopy: With special emphasis on the August 2014 Cananea acid spill. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2), 229-249. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57265251007>
- Estay, H., & Díaz, F. (2019). *Estudio de un proceso de recuperación de de covalto desde relaves de cobre* (Vol. 1).
- Guzmán, F., Arranz, J., Smoll, L., Collahuazo, L., Calderón, E., & Otero, O. (2020). *Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas*.
- Hakim, A., Sunjaya, D., Hawu, A., Indriati, T., & Hidayat, T. (2023). Critical raw materials associated with the lateritic bauxite and red mud in West Kalimantan, Indonesia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 23(3). <https://doi.org/10.1144/geochem2022-064>
- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C., & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), 319-339. <https://doi.org/10.3390/min14030319>
- Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88. <http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

- Kulczycka, J., Dziobek, E., & Szmitk, A. (2020). Challenges in the management of data on extractive waste: the Polish case. *Mineral Economics*, 33, 341-347. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00203-5/Published>
- Lemos, M., Valente, T., Reis, P., Fonseca, R., Pantaleão, J., Guabiroba, F., Filho, J., Magalhães, M., Afonseca, B., Silva, A., & Delbem, I. (2023). Geochemistry and mineralogy of auriferous tailings deposits and their potential for reuse in Nova Lima Region, Brazil. *Scientific Reports*, 13(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31133-6>
- LLaccho, P., Rivera, X., & Marin, M. (2023). Analysis of recovery strategies for construction and demolition waste in the last 10 years: a review of the scientific literature. *International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 1, 17-21. <https://doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.530>
- Londoño, J., Parra, R., Ramirez, M., & Mujica, S. (2023). Viabilidad técnico-económica de la reutilización de residuos estériles mineros del municipio de Marmato - Caldas. *Grindda*, 3(2021), 3-22.
- Makhathini, T., Bwapwa, J., & Mtsweni, S. (2023). Various options for mining and metallurgical waste in the circular economy: A review. In *Sustainability* (Vol. 15, Issue 3, pp. 1-21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15032518>
- Malaoui, R., Harkati, E. H., Soltani, M., Djellali, A., Soukeur, A., & Kechiched, R. (2023). Geotechnical characterization of phosphate mining waste materials for use in pavement construction. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(1), 10005-10013. <https://doi.org/10.48084/etasr.5493>
- McConnell, J., Chellman, N., Wensman, S., Plach, A., Stanish, C., Santibáñez, P., Brugger, S., Eckhardt, S., Freitag, J., Kipfstuhl, S., & Stohl, A. (2024). Hemispheric-scale heavy metal pollution from South American and Australian mining and metallurgy during the Common Era. *Science of The Total Environment*, 9(12), 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169431>
- Molahid, V., Kusin, F., & Syed, S. (2023). Mineralogical and chemical characterization of mining waste and utilization for carbon sequestration through mineral carbonation. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(7), 4439-4460. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01513-y>
- Olivares, C., & Arias, M. (2024). Hacia una minería sostenible en San Juan: Desafíos, prácticas y oportunidades. *Revista Del Instituto de Desarrollo Sostenible*, 1(12), 1-12. <https://orcid.org/0009-0004-7343>
- Pada, B. (2023). Valorization of Iron Ore Tailing (IOT) waste through the circular economy concept: A sustainable solution towards mitigation of resource crisis and climate change. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 5(2), 309-316.
- Bravo Aillón, J., Macías Castro, M. y Bravo Macías, D. (2025). Escombreras mineras de régimen especial de pequeña minería metálica: un nuevo horizonte para materiales de construcción ecológico. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(1), 77-88. <http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/187>
enero - junio (2025) ISSN 2806-5573

- Parbhakar, A., & Baumgartner, R. (2023). Action versus reaction: How geometallurgy can improve mine waste management across the life-of-mine. *Elements*, 19(6), 371-376. <https://doi.org/10.2138/gselements.19.6.371>
- Parviainen, A., Beisner, K., Blake, J., O'Sullivan, E. M., Miller, C., & Rosca, C. (2025). Geochemical processes related to mined, milled or natural metal deposits in a rapidly changing global environment. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 25(1), 62-68. <https://doi.org/10.1144/geochem2024-062>
- Pirraglia, L. (2024). *Reciclado de minerales y economía circular: un enfoque preliminar* (Vol. 1).