



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**La sostenibilidad como eje  
transformador del sector minero  
mexicano**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera de Minas y Metalurgista**

**P R E S E N T A**

Arleth Luna González

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado LA SOSTENIBILIDAD COMO EJE TRANSFORMADOR DEL SECTOR MINERO MEXICANO que presenté para obtener el título de INGENIERA DE MINAS Y METALURGISTA es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

ARLETH LUNA GONZALEZ

Número de cuenta: 318104005



---

## DEDICATORIA

*Dedico este gran proyecto a mis padres Alejandro Luna y Fabiola González, gracias por darme la oportunidad y el apoyo para realizarme profesionalmente, por su amor incondicional, por sostenerme los días difíciles, por celebrar conmigo cada pequeño avance y por ser mi ejemplo e inculcarme los valores que se reflejan en cada acción. Ustedes han sido mi fuerza, mi refugio y mi mayor motivación, los amo con todo el corazón y deseo que me apapachen la vida entera.*

*A mi hermanita Alison Luna, por su amor, su apoyo incondicional y por siempre creer en mi cuando yo dudaba; gracias por ser mi cómplice, la mejor compañera de vida y aventuras y mi inspiración, te amo muchísimo pequeña.*

*A mis tías Elena González y Alma González, y mi abuelita Marina Villegas; gracias por ser mi ejemplo de resiliencia y esfuerzo, por las palabras de aliento, el cariño y los consejos que han sido clave para mi crecimiento personal y profesional.*

*Deseo expresar mi absoluta gratitud a mi director de tesis, Dr. José Enrique Santos por su guía, paciencia y por compartir sus conocimientos para que este trabajo fuera posible. Más allá de lo académico, agradezco la confianza y las palabras de ánimo que hicieron que este trayecto fuera más ligero y significativo.*

*Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme el espacio, las herramientas y la formación que hicieron posible mi desarrollo académico y profesional. Me llevo con gusto las experiencias, retos y aprendizajes que marcaron profundamente mi crecimiento personal.*

*A Amairani Albañil por ser mi mejor amiga y compañera en esta aventura, por los consejos, trabajos, fiestas, risas, viajes y noches de desvelo.*

*A mi prima y compañera de vida Michelle Márquez, por crecer conmigo y siempre estar en cada etapa de mi vida, por ser mi confidente y mi roomie, por los consejos, las pláticas nocturnas y las risas.*

*A mis amigos Alan, Luis, Danna y André, quienes hicieron más llevadera la etapa universitaria, compartiendo aprendizajes, vivencias y risas que atesoraré la vida entera.*

*A mis profesores, Ing. Israel Ortega, Ing. Roberto Canales e Ing. Pamela Briones; gracias por compartir sus conocimientos, su experiencia y su tiempo a lo largo de mi formación. Su dedicación y compromiso han dejado una huella indeleble en mi desarrollo profesional y personal.*

*Agradezco infinitamente a Dios la oportunidad de que hoy sea realidad el sueño de una pequeña de ocho años de convertirse en la primera mujer de la familia con una carrera profesional. Este logro representa el esfuerzo, los sacrificios y el amor de quienes me han acompañado en cada etapa de mi formación personal y profesional y marca el inicio de una nueva etapa llena de retos, aprendizajes y oportunidades, que afrontaré con gratitud, humildad y la firme intención de honrar todo lo que he recibido.*

*Con cariño,*

*Arleth Luna González.*



---

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar el proceso del sector minero mexicano en su transición hacia la sostenibilidad a partir de las tendencias internacionales. La investigación aborda, desde los antecedentes e importancia del sector, la situación actual, los retos y limitaciones futuras, hasta las áreas de mejora de los actores involucrados en la actividad extractiva.

El enfoque se sustenta en la revisión de informes internacionales sobre la alineación de la minería al desarrollo sostenible, reportes de sostenibilidad de empresas establecidas en México y artículos sobre estrategias y acciones implementadas con éxito en unidades mineras a nivel mundial. A partir del análisis, se identifican las principales brechas y limitaciones del sector y se proponen estrategias de coordinación y colaboración entre actores para fortalecer la implementación de las mejores prácticas e indicadores que permiten evaluar la eficiencia de las mismas.

Los resultados evidencian que la transición hacia la sostenibilidad ha sido progresiva, aunque no homogénea, y destaca la necesidad de consolidar mecanismos de corresponsabilidad, fortalecimiento institucional y vigilancia normativa, adaptados al contexto ambiental y social de cada operación, con la finalidad de garantizar la permanencia y legitimidad del sector minero en el país.

## ABSTRACT

The purpose of the present work is to analyze the process of the Mexican mining sector's transition toward sustainability in light of international trends. The research addresses the sector's background and relevance, its current conditions, future challenges and limitations, and the areas for improvement among the stakeholders involved in extractive activities.

This study is based on a review of international reports on alignment of mining with sustainable development, sustainability reports from companies operating in Mexico, and articles describing strategies and actions successfully implemented in mining operations worldwide. Based on this analysis, the main gaps and limitations within the sector are identified, and strategies for coordination and collaboration among stakeholders are proposed to strengthen the implementation of best practices and indicators for evaluating their effectiveness.

The results show that the transition toward sustainability has been progressive, although uneven, and highlight the need to consolidate mechanisms for shared responsibility, institutional strengthening, and regulatory oversight, adapted to the environmental and social context of each operation, in order to ensure the long-term viability and legitimacy of the mining sector in the country.



# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
1.1    Justificación.....	11
1.2    Objetivos.....	12
1.3    Alcances .....	13
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
<b>MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>14</b>
2.1    Antecedentes del sector minero mexicano y su importancia .....	14
2.2    La evolución de la sostenibilidad y la agenda 2030.....	17
2.3    El sector minero en el marco de sostenibilidad .....	19
2.4    Análisis del sector minero a partir de 2012 .....	22
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
<b>SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR</b> .....	<b>26</b>
<b>MINERO MEXICANO</b> .....	<b>26</b>
3.1    Prácticas actuales en el sector minero mexicano .....	26
3.2    Cámara Minera de México .....	26
3.2    Peñoles/ Fresnillo plc.....	31
3.3    Grupo México.....	36
3.4    Pan American Silver .....	40
3.5    Agnico Eagle .....	42
3.6    First Majestic Silver.....	43
3.7    Torex Gold Resources.....	45
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>47</b>
<b>ESTADO DEL ARTE Y RETOS FUTUROS</b> .....	<b>47</b>
4.1    Síntesis del estado actual del sector minero mexicano .....	47
4.2    Limitaciones y áreas de mejora en el sector minero mexicano.....	49
4.3    Gestión de jales.....	49
4.3.1. Panorama actual del almacenamiento de jales .....	49
4.3.2 Jales como relleno de minas subterráneas y tajos.....	51
4.3.3 Depósitos de jales espesados, en pasta y filtrados.....	57
4.3.4 Depósitos convencionales .....	60
4.3.5 Valorización y aprovechamiento de residuos mineros.....	61
4.3.6 Análisis sobre la viabilidad en gestión integral de jales .....	66
4.4    Remediación de acuíferos, aguas superficiales y suelos.....	67
4.5    Gestión hídrica y fuentes alternativas de abastecimiento de agua .....	75
4.6    Cierre de minas y planes de restauración integral .....	80
4.6.1    Casos de éxito y buenas prácticas .....	83
4.7    Diversidad e inclusión en la fuerza laboral.....	89
4.7.1    Situación actual en México .....	89
4.7.2    Iniciativas y políticas de inclusión .....	91
4.7.3    Retos y perspectivas.....	92
4.8    Cambio climático y huella de carbono .....	92
4.8.1    Fuentes de emisiones .....	93
4.8.2    Estrategias y acciones de mitigación internacional.....	94
4.8.3    Estrategias y acciones de mitigación en México.....	98
4.9    Innovación tecnológica para la sostenibilidad .....	101
4.9.1    Áreas de aplicación .....	101
4.9.2    Avances en México .....	102
4.9.3    Retos y perspectivas.....	103



---

4.10	Transparencia y acceso a la información .....	104
4.10.1	Avances en México .....	105
4.10.2	Retos y perspectivas .....	106
4.11	Gobernanza y cumplimiento regulatorio .....	107
4.11.1	Evolución del marco regulatorio en México .....	107
4.11.2	Retos y perspectivas .....	110
<b>CAPÍTULO 5</b>	.....	<b>112</b>
<b>OPORTUNIDADES PARA AVANZAR</b>	.....	<b>112</b>
<b>HACIA UNA MINERÍA SOSTENIBLE EN MÉXICO</b>	.....	<b>112</b>
5.1	Áreas de mejora en las prácticas empresariales .....	112
5.2	Áreas de mejora para fortalecimiento institucional .....	122
5.3	Áreas de mejora en la academia .....	129
5.4	Áreas de mejora en la sociedad .....	133
5.5	Hacia la consolidación de un futuro minero sostenible .....	136
<b>CAPÍTULO 6</b>	.....	<b>137</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	.....	<b>137</b>
<b>REFERENCIAS</b>	.....	<b>138</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Participación de mujeres en el sector minero. Fuente: Informe Anual de Sostenibilidad 2024 (CAMIMEX, 2024).....	28
Figura 4. 1. Acciones implementadas en la industria minera mexicana. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Figura 4. 2. Relleno con jales de obra subterránea en mina de Perú. Fuente: Experiences of Underground Mine Backfilling Using Mine Tailings Developed in the Andean Region of Peru: A Green Mining Solution to Reduce Socio-Environmental Impacts (Cacciattolo & Marinovic, 2023). ....	52
Figura 4. 3. Planta de tratamiento de jales para relleno de obras subterráneas. Tomada de Sustainability Report Capstone Gold 2023 (Capstone Gold, 2024).....	53
Figura 4. 4. Instrumentación colocada al tapón del relleno para evaluar la continuidad del vertido. Fuente: Paste backfill continuous pour: Red Lake operations case study (Oke et al., 2021).....	53
Figura 4. 5. Mezcla y vertido de los jales como pasta cementada en tajo. Fuente: Properties of cemented rockfill used in an open pit mine (Basanta et al., 2020). ....	55
Figura 4. 6. Relleno de tajo unidad Pinos Altos. Fuente: Responsible Tailings Management (Agnico Eagle, 2025).....	56
Figura 4. 7. Tajo minado y construcción parcial del paleocanal. Fuente: In-pit Tailings Disposal at Langer Heinrich – Tailings Storage Facilities in a Unique Hydrogeological Setting (Hore & Luppnow, 2015). ....	56
Figura 4. 8. Depósito de jales espesados en Canadian Malartic. Fuente: Responsible Tailings Management (Agnico Eagle, 2025). ....	57
Figura 4. 9. Disposición de jales espesados en unidad Esperanza. Fuente: Esperanza Thickened Tailings Project (Cacciattolo & Marinovic, 2022). ....	58
Figura 4. 10. Disposición de jales en pasta de unidad Las Cenizas, Chile. Fuente: Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance (Cacciattolo & Marinovic, 2022). ....	58
Figura 4. 11. Depósito de jales en pasta de la unidad Alhué, Chile. Fuente: Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance (Cacciattolo & Marinovic, 2022). ....	59
Figura 4. 12. Depósito de jales filtrados de unidad Meliadine. Fuente: Responsible Tailings Management (Agnico Eagle, 2025). ....	59
Figura 4. 13. Disposición de jal filtrado en Mina La Encantada. Fuente: Jales Espesados y Jales en Pasta (First Majestic Silver, 2024).....	60
Figura 4. 14. Esquema del método constructivo aguas abajo con enrocamiento. Fuente: NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004).....	61
Figura 4. 15. Desarrollo de productos con jales de hierro: a) Pavimento asfáltico; b) Adoquines; c) Agregado de mortero fino; d) Bloques cerámicos. Fuente: Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective (Vilaça et al., 2022).....	62
Figura 4. 16. Ladrillo conformado por cemento y jales IoT. Fuente: Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste (Pereira et al., 2019).....	63
Figura 4. 17. Ladrillos fabricados a partir de jales de oro sin tóxicos. Fuente: Aplicación de la Economía Circular en la Industria Metalúrgica Minera para la Recuperación de oro y la Producción de Ladrillos a partir de Relaves (Yoplac et al., 2024). ....	63
Figura 4. 18. Construcción del proyecto de recuperación de jales de cobre y cobalto, con un avance de 65%. Fuente: First Quantum Suspends Construction at Kolwezi (Metalkol RTR, 2020).....	64
Figura 4. 19. Minas de As Pontes en su etapa final de producción. Fuente: Que es el tecnosol (Martorell, 2022). ....	65
Figura 4. 20. Aplicación de suelos tecnogénicos y revegetación de minas de As Pontes. Fuente: Que es el tecnosol (Martorell, 2022). ....	65
Figura 4. 21. Planta de tratamiento activo de mina Wheal Jane. Fuente: Wheal Jane mine water treatment scheme (Coal Authority & Mining Remediation Authority, 2020).....	69
Figura 4. 22. Proceso general involucrado en la adsorción. Fuente: Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies (Dinis & Fiúza, 2021). ....	70
Figura 4. 23. Corte transversal de la barrera reactiva permeable colocada en España. Fuente: In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain) (Gibert et al., 2011). ....	70



Figura 4. 24. Proceso de fitorremediación. Fuente: Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies (Dinis & Fiúza, 2021). .....	71
Figura 4. 25. El diseño esquemático de los sistemas que muestra el flujo vertical y los detalles de la disposición del sustrato. Fuente: Passive Treatment of Acid Mine Drainage Effluents Using Constructed Wetlands: Case of an Abandoned Iron Mine, Morocco (Naghoun et al., 2025). .....	71
Figura 4. 26. Tratamientos aplicados CT (Control sin labrar ni enmendar), TL (Labranza superficial), MW (Labranza superficial y aplicación de residuos de mármol), PS (Labranza superficial y aplicación de purín de cerdo) y MW+PS (Labranza superficial y aplicación combinada de residuos de mármol y purín de cerdo). Tomado de Phytoremediation of mine tailings with Atriplex halimus and organic/inorganic amendments: A five-year field case study (Acosta et al., 2018). .....	73
Figura 4. 27. Área remediada y con crecimiento de vegetación cinco años después a la aplicación de los tratamientos. Tomado de Phytoremediation of mine tailings with Atriplex halimus and organic/inorganic amendments: A five-year field case study (Acosta et al., 2018). .....	74
Figura 4. 28. Planta de tratamiento de aguas residuales de Met-Mex Peñoles. Fuente: Peñoles, pionera en el tratamiento del agua residual (MILENIO, 2017). .....	76
Figura 4. 29. Planta desalinizadora de agua de mar "La Escondida". Fuente: BHP Billiton Approves Escondida Water Supply Project (BHP, 2021). .....	77
Figura 4. 30. Planta desalinizadora de la unidad Los Pelambres, Chile. Fuente: Los Pelambres desalination plant (Ramos & Villegas, 2024). .....	77
Figura 4. 31. Sistema de captación de agua de lluvia en depósito de jales de mina San José. Fuente: Unidad Minera San José opera con normalidad ante lluvias (México Minero, 2025). .....	79
Figura 4. 32. Sistema RWHI en Wuda, China. Fuente: A new small-scale system of rainwater harvesting combined with irrigation for afforestation in mine area: Optimizing design and Application (Liu et al., 2022). .....	79
Figura 4. 33. Captación de agua de lluvia en Vikram Cement Works. Fuente: Rainwater Harvesting at UltraTech's Vikram Cement Works – Case Study (GCCA, 2021). .....	80
Figura 4. 34. Planificación del Cierre Integrado de Minas. Fuente: Integrated Mine Closure (ICMM,2025)..	81
Figura 4. 35. Proyecto solar en la mina recuperada de Sullivan, Canadá. Fuente: Integrated Mine Closure: Good practice guide,3rd edition (ICMM, 2025). .....	84
Figura 4. 36. Pista de esquí en la mina recuperada de Sullivan, Canadá. Fuente: Integrated Mine Closure: Good practice guide,3rd edition (ICMM, 2025). .....	85
Figura 4. 37. La rehabilitación del PTNMR en Indonesia ahora es un jardín botánico. Fuente: Integrated Mine Closure: Good practice guide,3rd edition (ICMM, 2025). .....	85
Figura 4. 38. Puy de l'Age antes y después del cierre de operaciones. Fuente: Integrated Mine Closure: Good practice guide,3rd edition (ICMM, 2025). .....	86
Figura 4. 39. Vista del yacimiento a cielo abierto parcialmente rellenado y de las pilas de desmonte recuperadas, aproximadamente un año después del final de la producción de oro en diciembre de 2014. Fuente: Inclusive Closure and Post-Mining Transition at the Golden Pride Mine, Tanzania (IISD, 2022). .....	86
Figura 4. 40. Vista del lago de la mina hacia el este en febrero de 2022. Las partes rellenadas del lago se encuentran en el extremo opuesto de esta foto. Fuente: Inclusive Closure and Post-Mining Transition at the Golden Pride Mine, Tanzania (IISD, 2022). .....	87
Figura 4. 41. Reforestación como eje prioritario para el cierre de Mina Álamo Dorado, Sonora. Fuente: Plan de cierre de Álamo Dorado (El Imparcial, 2022). .....	87
Figura 4. 42. Vista de la revegetación que se ha realizado en la tepetatera norte de la mina El Chanate, Sonora. Fuente: "Cierre de Minas" (Mundo Minero, 2025). .....	88
Figura 4. 43. Línea del tiempo de la incorporación de las mujeres en la minería mexicana. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Women in Mining México (2023), Grupo Peñoles (2022) e INEGI (2020).90	90
Figura 4. 44. Participación de las mujeres en el sector minero, respecto al total de colaboradores. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Informe de Sostenibilidad (2020, 2021, 2022, 2023, 2024). ...	91
Figura 4. 45. Clasificación de los alcances de emisiones GEI. Fuente: Elaboración propia a partir de Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG Protocol, n.d.). .....	94
Figura 4. 46. Principios de minería del ICMM relevantes para cambio climático. Fuente: Elaboración propia a partir de Declaraciones de Posición (ICMM, 2021). .....	95
Figura 4. 47. Planta de energía híbrida eólica-diésel para suministro de la mina Diavik, Cánada. Fuente: Diavik Diamond (Natural Resources Canada, 2014). .....	95



---

Figura 4. 48. Se observa al fondo las turbinas eólicas, a la izquierda el campo de energía solar fotovoltaica y las instalaciones del proyecto de litio Kathleen Valley. Fuente: FY24 ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE REPORT (Liontown, 2024).....	96
Figura 4. 49. Central Eólica Punta Lomitas que abastece de energía a la operación Quellaveco. Fuente: Central Eólica Punta Lomitas entra en operación comercial (ENGIE, 2023). .....	97
Figura 4. 50. Parque solar fotovoltaico que suministra energía a Collahuasi. Tomada de Collahuasi y Sonnedix firman contrato por 150 GWh de energía solar y el primero en Chile con respaldo de baterías (COLLAHUASI, 2020).....	98
Figura 4. 51. Parque eólico Fenicias, que abastece la Refinería Electrolítica de Zinc en SLP. Fuente: Informe de sostenibilidad (Grupo México, 2024). .....	99
Figura 4. 52. Sistema RopeCon implementado en las operaciones de Torex Gold Resources en México. Fuente: 2024 RESPONSIBLE GOLD MINING REPORT (Torex Gold Resources, 2025). .....	99
Figura 4. 53. Planta Hidroeléctrica Las Truchas, que abastece de energía la operación San Dimas en Durango. Fuente: Central Hidroeléctrica “Las Truchas” (SESELEC, 2009). .....	100
Figura 4. 54. Centro de control de operaciones de unidad minera Peñasquito. Fuente: Minera Peñasquito inaugura nuevo Centro de Control (Mundo Minero, 2025). .....	102
Figura 4. 55. Voladura remota en la unidad Fresnillo, Zacatecas. Fuente: Fotografía por Danna Sánchez. ...	103
Figura 4. 56. Marco normativo aplicable al sector minero. Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida del DOF.....	109
Figura 5. 1. Cambios dentro de la industria minera mexicana. Fuente: Elaboración propia. ....	113
Figura 5. 2 Acciones estratégicas para la gestión sostenible y valorización de los jales en la industria minera. Fuente: Elaboración propia.....	116
Figura 5. 3. Acciones estratégicas para fortalecer la gestión hídrica en las operaciones mineras. Fuente: Elaboración propia. ....	118
Figura 5. 4. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones referentes a la cultura organizacional de las empresas mineras. Fuente: Elaboración propia. ....	121
Figura 5. 5. Modificaciones que se han realizado a la Ley de Minería en la última década. Fuente: Elaboración propia.....	122
Figura 5. 6 Acciones estratégicas a implementar para mejorar la capacidad institucional. Fuente: Elaboración propia.....	123
Figura 5. 7. Acciones estratégicas que las autoridades pueden implementar para homologar los criterios técnicos. Fuente: Elaboración propia.....	125
Figura 5. 8. Indicadores propuestos para evaluar las acciones estratégicas implementadas para mejorar el papel del Estado como facilitador. Fuente: Elaboración propia. ....	127
Figura 5. 9. Indicadores que puede evaluar la eficiencia en la implementación de las acciones estratégicas para mejorar la gestión de pasivos ambientales. Fuente: Elaboración propia. ....	128
Figura 5. 10. Acciones que ha implementado la academia en su transición hacia una minería sostenible. Fuente: Elaboración propia. ....	129
Figura 5. 11. Acciones estratégicas que puede implementar la academia y sus beneficios en la integración como ente en la minería sostenible. Fuente: Elaboración propia. ....	130
Figura 5. 12. Indicadores para evaluar la implementación de las acciones estratégicas en el afianzamiento de la formación profesional. Fuente: Elaboración propia. ....	131
Figura 5. 13. Acciones estratégicas que puede implementar la academia para el desarrollo de laboratorios regionales y los beneficios que traen consigo. Fuente: Elaboración propia. ....	132
Figura 5. 14. Indicadores propuestos que permiten evaluar las acciones estratégicas implementadas para fortalecer el desarrollo de laboratorios regionales. Fuente: Elaboración propia. ....	132
Figura 5. 15. Acciones que realiza la sociedad civil y las comunidades ante la presencia de la industria minera. Fuente: Elaboración propia.....	133
Figura 5. 16. Acciones para fortalecer la implementación del consentimiento libre, previo e informado en comunidades y sociedad civil. Fuente: Elaboración propia.....	134



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Acciones, beneficios e indicadores propuestos para una transición hacia una gestión proactiva. ....	114
Tabla 2. Acciones, beneficios e indicadores pensados para la transición hacia energías y tecnologías limpias. ....	115
Tabla 3. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones en la gestión de jales. ....	117
Tabla 4. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones referentes a la gestión hídrica. ....	119
Tabla 5. Acciones estratégicas para fortalecer la cultura organizacional de las operaciones mineras. ....	120
Tabla 6. Indicadores y beneficios de la implementación de las acciones estratégicas propuestas para el fortalecimiento institucional. ....	123
Tabla 7. Indicadores y beneficios propuestos para la implementación de las acciones estratégicas desarrolladas para alineación regulatoria. ....	125
Tabla 8. Acciones propuestas para fortalecer el papel del Estado como facilitador de la inversión y sus beneficios esperados. ....	126
Tabla 9. Acciones estratégicas que puede implementar el Estado para mejorar la gestión de pasivos ambientales y sus beneficios. ....	127
Tabla 10. Indicadores para evaluar la eficiencia en la implementación de acciones para CLPI. ....	135



---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El término sostenibilidad se incorporó en la agenda internacional a partir del informe *Nuestro futuro común* (1987). Sin embargo, la industria minera consolida su adopción a partir de la década del año 2000, entendiendo que su objetivo es maximizar la contribución al bienestar de la generación actual de manera que se garantice una distribución equitativa de sus costos y beneficios, sin reducir el potencial de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (IIED, 2002).

De acuerdo con el *International Institute for Environment and Development (IIED)*, la sostenibilidad en la industria minera requiere de un marco sólido basado en principios generales, la comprensión de los desafíos y limitaciones clave que enfrenta el sector en diferentes niveles y regiones, así como la definición clara de las acciones necesarias para enfrentarlos, junto con sus respectivas funciones y responsabilidades de los actores involucrados. Asimismo, demanda procesos capaces de responder a los desafíos, respetar los derechos de los grupos de interés, establecer prioridades, garantizar que se tomen medidas en el nivel apropiado y articular instrumentos de política, mecanismos de cumplimiento, acciones voluntarias responsables y herramientas de evaluación que permitan una mejora continua (IIED, 2002).

En México, este enfoque ha cobrado mayor relevancia durante las últimas dos décadas mediante la incorporación progresiva de informes de sostenibilidad, lineamientos corporativos y una creciente visibilidad de los temas ambientales y sociales dentro del sector. Se debe comprender que si bien se ha avanzado en términos de sostenibilidad aún persisten temas que se deben atender por parte de la industria como la degradación de suelos, contaminación de cuerpos de agua, deforestación, emisión de gases de efecto invernadero, alteración en el medio físico, biológico y social por la dispersión de jales y desbordamiento de depósitos de residuos mineros. A ello se suman conflictos sociales persistentes como pérdida de terrenos, daños a la salud, alteración de modos de vida y la limitada comunicación con las comunidades locales.

Este hecho deja en evidencia que aún existe una brecha entre los principios de sostenibilidad impulsados a nivel internacional y su aplicación efectiva en el contexto nacional. Dicha brecha enfrenta varios desafíos específicos, en aspectos tanto ambientales como sociales y regulatorios, entre los que destacan la gestión y disponibilidad del agua, la transición energética, la gestión de residuos y la atención a la contaminación de agua y suelo, los procesos de consulta y participación social, así como resistencias internas en las empresas



debido a los costos y cambios operativos. A lo anterior se suma la necesidad de incrementar la supervisión gubernamental, mejorar la claridad y aplicación de la normativa existente y propiciar una mayor coordinación entre los organismos gubernamentales y el sector minero.

En este sentido, aunque el sector minero mexicano se encuentra en un proceso de transición hacia modelos más sostenibles, es imperativo comprender que persisten limitaciones que dificultan la integración plena de criterios sociales, ambientales y de gobernanza. Por ello, surge la necesidad de visualizar y analizar de forma integral cuáles son los principales retos, limitaciones y áreas de mejora que enfrenta la minería mexicana actualmente, con el fin de identificar aquellos factores nuevos y emergentes que condicionan este proceso y contribuir a la formulación de acciones que permitan fortalecer la transformación del sector.

En función de lo anterior, surgen cuestionamientos clave como, ¿cuáles son las principales afectaciones ambientales y sociales de la minería en México?, ¿qué tanto se ha hecho en la industria minera para realmente lograr una igualdad de género?, ¿existen políticas y normativas que promuevan o regulen la sostenibilidad dentro de la industria?, ¿a qué desafíos se enfrentan las compañías mineras para adoptar prácticas sostenibles?, ¿en qué punto se encuentra situado México en comparación con otras naciones que también han adoptado el término de sostenibilidad minera?, y finalmente, ¿qué tanto falta para alcanzar el objetivo de integración de la minería a la sostenibilidad?.

Partiendo de ello, un principio debe tenerse presente; la industria minera ya no debe responder a las antiguas prácticas operativas, sino que su objetivo primordial sea la innovación de sus acciones respondiendo así a la demanda ética y ambiental y a su vez a la necesidad de hacer un aprovechamiento sostenible de los recursos minerales; es momento de darle a la industria minera un enfoque de responsabilidad social, ambiental, económica y cultural.

## **1.1 Justificación**

La industria minera es una actividad estratégica para México debido a su contribución en el Producto Interno Bruto (PIB), la generación de empleo y su papel en el suministro de materias primas esenciales en múltiples cadenas productivas. Sin embargo, su relevancia económica contrasta con los desafíos sociales, ambientales y regulatorios que acompañan su desarrollo, tales como los conflictos con las comunidades locales, la contaminación ambiental, la presión sobre los recursos hídricos y la necesidad de actualizar y adaptar un marco normativo que se alinee con los estándares internacionales de sostenibilidad.

Estas problemáticas varían según el tipo de minería, escala de operación y el contexto de la región en que se ubiquen las unidades. La minería mediana y de gran escala presentan diferencias en cuanto a nivel de regulación y tecnificación y grado de controles ambientales y sociales, lo cual influye directamente en su transición parcial hacia la sostenibilidad.



La presente investigación se justifica en la necesidad de analizar de manera integral el proceso de adaptación de criterios de sostenibilidad dentro del sector minero mexicano a partir de los casos de éxito y buenas prácticas desarrolladas internacionalmente en materia de sostenibilidad. La revisión de estos casos permitirá identificar aquellos avances tecnológicos, técnicos y regulatorios que puedan adaptarse al contexto nacional para mejorar la transición del sector minero hacia la sostenibilidad y mitigar las brechas existentes.

Asimismo, esta investigación busca aportar elementos técnicos que apoyen la toma de decisiones en las áreas clave (industria, academia y sector público), al proponer acciones que favorezcan un incremento en el desempeño ambiental y social de la actividad minera. De esta manera, se contribuye al debate sobre el futuro de la minería en México y se promueve un enfoque de protección ambiental, responsabilidad social y competitividad económica.

## 1.2 Objetivos

### *Objetivo general:*

- Analizar, a partir de las tendencias a nivel mundial, el proceso de transición del sector minero mexicano hacia la sostenibilidad, para identificar hasta qué punto se ha avanzado y cuáles son los retos nuevos y emergentes que enfrenta, y con esto, proponer estrategias de coordinación y colaboración entre actores clave que fortalezcan la implementación de las mejores prácticas ambientales, sociales y de gobernanza, y asegurar la viabilidad, responsabilidad y permanencia del sector.

### *Objetivos específicos:*

- Analizar las principales características del sector minero mexicano, incluyendo su impacto económico, empleo generado y distribución regional, para establecer una base diagnóstica.
- Evaluar la evolución que ha tenido el sector minero mexicano en materia de sostenibilidad, considerando su dimensión ambiental, social y de gobernanza.
- Reconocer buenas prácticas internacionales, avances tecnológicos e instrumentos regulatorios aplicados en otros países que puedan ser adaptados al contexto nacional para promover una minería responsable y consciente.
- Identificar los retos emergentes y las áreas críticas que enfrenta el sector minero mexicano para incorporarse y operar efectivamente dentro de los ejes ambiental, social y de gobernanza.
- Proponer acciones y estrategias de colaboración entre actores clave orientadas a mejorar el desempeño sostenible del sector minero mexicano.



---

### 1.3 Alcances

La presente investigación se centra en identificar los principales retos, limitaciones y áreas de mejora que enfrenta el sector minero mexicano en su transición hacia la sostenibilidad. El estudio aborda la minería en mediana y gran escala, con el propósito identificar las diferencias en términos de magnitud de afectaciones e incorporación de criterios de sostenibilidad.

El análisis se desarrolla a escala nacional, considerando las principales regiones mineras del país, particularmente aquellas con mayor relevancia productiva como Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Coahuila, Guanajuato, Hidalgo y Guerrero. El periodo de estudio contempla aproximadamente los últimos 10 a 15 años, con el fin de examinar la evolución del sector minero y su alineación con los estándares internacionales en materia de sostenibilidad.

La investigación tiene un enfoque analítico y propositivo, que se orienta a evaluar las condiciones actuales, identificar las áreas de mejora y reconocer las buenas prácticas internacionales aplicables al contexto mexicano. En este no se considera el desarrollo de estudios de campo específicos, evaluaciones técnicas detalladas por unidad minera, ni modelaciones de impactos ambientales, sino un análisis de carácter sectorial basado en información documental, marco regulatorio y referencias internacionales.



---

## CAPÍTULO 2

### M A R C O D E R E F E R E N C I A

#### 2.1 Antecedentes del sector minero mexicano y su importancia

La minería en México tiene raíces que remontan a la época prehispánica, en ese entonces era una actividad realizada a pequeña escala, se aprovechaban minerales en estado nativo como oro (Tlapa, Tototepec, Etna, Teotitlán), plata (Taxco y Zumpango), cobre (Guerrero y Michoacán), estaño, mercurio (Chilapa) y plomo (Ixmiquilpan). Un elemento importante de la minería prehispánica fue el aprovechamiento de piedras semipreciosas como jades, jaspes, ágatas, turquesas y obsidiana.

A partir del siglo XVI, esta actividad económica se basó en la explotación de oro y plata y con ello adquiere un papel fundamental en el enriquecimiento de la Nueva España, además permitió la construcción de caminos y el crecimiento de regiones en estados como Sonora, Zacatecas, Guanajuato, Durango, Chihuahua, Nuevo León, Hidalgo, Guerrero, México y San Luis Potosí, así como los principales centros mineros en los que destacan San Martín, Chalchihuites, Sombrerete, Fresnillo, Charcas, Taxco y Salinas de Santa María (*Coll-Hurtado et al., 2002*). El descubrimiento de grandes depósitos polimetálicos en estas regiones llevó a México a convertirse en una de las principales fuentes de metales preciosos en el mundo (*Miranda, 2020*).

Durante la Independencia se siguió explotando la plata y se abrieron algunas minas de hierro y cobre, mientras que en el Porfiriato existió una fuerte inversión extranjera que consolidó a la minería como un monopolio, además el *boom* de la minería se inició con la apertura de minas en Chihuahua para obtención de oro y plata, esto permitió el desarrollo de centros urbanos, caminos y vías férreas. Posteriormente durante la Revolución Mexicana esta actividad se vio comprometida debido a la importación de equipos costosos, huelgas, desperfectos ocasionados en las vías y el cierre temporal o permanente de algunas minas de carbón; sin embargo, no todo fue malo ya que, la alta demanda de minerales industriales permitió una fuerte alza en el precio de los mismos (*Coll-Hurtado et al., 2002*).

La culminación de la Segunda Guerra Mundial trajo consigo la decadencia de la industria y dio prioridad a la industrialización del país mediante la política de sustitución de importaciones; solamente el plomo y el zinc conservaron un mercado importante. En esta etapa, no se hicieron estudios de prospección ni se conocieron nuevos yacimientos, sin embargo, en 1961 Adolfo López Mateos promulgó que toda empresa dedicada a la minería debía contar con una participación mayoritaria de capital mexicano, al menos 51% (*Coll-Hurtado et al., 2002*).



Es importante reconocer que México posee una gran riqueza geológica, siendo parte del “Cinturón de Plata”, que es considerada una de las franjas más ricas en plata del mundo. Posee importantes yacimientos de oro, cobre, plomo, zinc, hierro, entre otros. A nivel nacional se producen 53 tipos de minerales, de los cuales, 11 son metálicos y 42 no metálicos (*Centro de Estudio de las Finanzas Públicas, 2024*).

Esta actividad económica representa uno de los pilares de la sociedad mexicana, por ello, actualmente no sólo se destaca por la producción de metales preciosos, sino también por minerales industriales que son clave en la producción global. A su vez, representa un motor social y cultural ya que muchas comunidades mexicanas están estrechamente vinculadas con el sector, el cual se desenvuelve, adapta y adopta las costumbres, folklore, gastronomía y desarrollo arquitectónico de las mismas, moldeando relaciones laborales y movimientos sociales a lo largo del tiempo.

México se reconoce a nivel internacional como una nación con una fuerte y sólida tradición minera, que actualmente desempeña un rol de vital importancia en el desarrollo de la sociedad mexicana consolidándose como la base primaria de más de 70 industrias y que a su vez genera 416,875 empleos directos y 2.6 millones de empleos indirectos con salarios superiores al 33% del promedio nacional (*CAMIMEX, 2025*).

De acuerdo con la publicación de la *Secretaría de Economía (2024)*, la industria extractiva se posiciona como un líder global por las siguientes razones:

- Al ser el principal productor de plata a nivel global por más de trece años consecutivos.
- Al ubicarse entre las primeras 10 posiciones en la producción mundial de 17 minerales, segundo en fluorita, tercero en sulfato de sodio y wollastonita, cuarto en celestita, quinto en plomo, molibdeno, barita, diatomita, sulfato de magnesio, sexto en zinc, octavo en sal, yeso, cadmio, oro y feldespato y décimo en cobre.
- Ya que, de acuerdo con el informe de Tendencias de Exploración Mundial, publicado por la agencia S&P Global Market Intelligence, la inversión mundial en exploración minera tuvo una recuperación en 2021, por regiones, América Latina se mantuvo como el principal destino de la inversión en exploración con 24% del total, y México ascendió al primer lugar, seguido de Chile, Perú y Brasil.
- En la encuesta anual del Instituto Fraser, México se ubicó en 2021 en el sexto sitio como destino de inversión en América Latina, y en el sitio 34 a nivel mundial del Índice de Atracción de Inversión.
- Debido a que el sector minero invirtió 4 mil 809.6 millones de dólares en 2021, lo que significó un aumento del 36.1% en comparación con lo invertido en 2020; el sector continúa manteniéndose como una de las ramas productivas que atrae mayor inversión al país.



- El sector contribuyó con el 2.75% al PIB (Producto Interno Bruto) y agregando la cadena de valor represento el 4.5%.
- Con un repunte importante de los metales industriales no ferrosos, ya que, el valor de la producción minero-metalúrgica nacional pasó de 281 mil 515.9 millones de pesos en 2020 a 334 mil 782 millones de pesos en 2021 (16 mil 516 millones de dólares) cifra que representó un incremento de 19% con respecto al año previo.

Lo anterior descrito subraya la importancia estratégica del sector para la economía, desarrollo nacional y transición energética. Por ello es necesario comprender y atender los retos que enfrenta la industria minera en materia de sostenibilidad, debido a la gran importancia de esta industria en el país no es posible ni conveniente limitarla, es mejor, integrarla al principio de sostenibilidad para beneficio de la sociedad mexicana.

Sin embargo, a pesar de la contribución económica, la minería enfrenta crecientes desafíos relacionados con las afectaciones ambientales y sociales. En este contexto, la sostenibilidad es un factor determinante en la viabilidad a largo plazo del sector. La creciente preocupación y presión de inversionistas, las modificaciones realizadas a la regulación y los conflictos con las comunidades cercanas a las operaciones han impulsado a las empresas mineras a adoptar medidas más transparentes y responsables; trayendo consigo la publicación de informes de sostenibilidad que permiten evaluar a grandes rasgos el desempeño ambiental, social y económico de las mismas. Es importante destacar que de acuerdo con el informe de sostenibilidad publicado en 2024 por la Cámara Minera de México los principales avances en desarrollo son:

- Fomento al emprendimiento local: Las empresas afiliadas contratan proveedores locales y respaldan proyectos productivos. Los proyectos incluyen cooperativas, viveros, huertos, talleres mecánicos y de elaboración de ropa, estéticas, pastelerías, lavanderías, cocinas económicas, etc.
- Seguridad y salud ocupacional: Se adoptan nuevas tecnologías operativas y digitales que permiten a los colaboradores un trabajo digno y seguro; reduciendo de forma considerable los accidentes de trabajo.
- Centros comunitarios y de capacitación: Estos fueron establecidos como espacios de integración social y desarrollo, donde se impartieron horas de capacitación en cursos y talleres de emprendimiento.
- Durante 2023, las empresas afiliadas invirtieron en acciones de protección ambiental.
- El 70% de agua utilizada en las distintas etapas del proceso provino de aguas recirculadas.
- Se estima existen operaciones que produjeron y consumieron energías renovables.
- En los últimos cinco años se logra un incremento en las hectáreas reforestadas y se trabaja en conjunto para proteger especies de flora y fauna.



Mediante el análisis de los informes, es posible comprender cómo la industria está respondiendo a las demandas actuales, qué medidas se están implementando para reducir la huella ecológica y mejorar las relaciones con las comunidades, y en qué áreas aún existen brechas por cubrir.

## 2.2 La evolución de la sostenibilidad y la agenda 2030

La minería inicialmente era vista como una actividad exclusivamente económica, con pocos o nulos controles sobre las afectaciones sociales y ambientales; hasta que a finales del siglo XX se reconoce la necesidad de regularla para reducir las afectaciones y con ello, surgen además de normativas específicas en materia social y ambiental, iniciativas y organismos como el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) y estándares como la ISO 14001.

A partir de la adopción del término desarrollo sostenible comienza una transición en el sector minero tradicional a un sector minero sostenible, de acuerdo con el estudio *Breaking New Ground* se deben comprender tres conceptos para conocer lo que es el desarrollo sostenible; el primero es ganar-ganar-ganar que implica mejoras en el ámbito social, ambiental y económico actual y futuro, el segundo consiste en la transacción que implica ganancias y compensaciones por la afectación ocasionada y en tercer lugar la prohibición que se basa en rechazar todo aquello que pueda destruir al capital natural o transgredir los derechos humanos (*IIED, 2002*).

Sin embargo, para realmente arraigar el concepto de sostenibilidad en minería es necesario ser conscientes que debe existir equilibrio entre las necesidades a largo plazo y los imperativos a corto plazo; esto se puede lograr mediante una evaluación de la aceptabilidad, es decir, evaluar el mantener un daño ambiental menor a cambio de una importante ganancia económica, o sacrificar metas económicas en favor de un bienestar ambiental.

La evolución del término básicamente es una lista de deseos que marca la pauta de la meta que se debe alcanzar, no de manera inmediata, pero si en el largo plazo. En ellos se contemplan los siguientes aspectos (*IIED, 2002*):

- Internacionalización progresiva de los costos y rescate de las buenas prácticas.
- Las decisiones sobre el uso de territorio deberán ser tomadas basándose en el consentimiento informado previo, en el cual se respeten y consideren los derechos e intereses de las partes interesadas.
- Mejorar el bienestar humano protegiendo la calidad del medio ambiente y los valores sociales y culturales.



- Se debe incluir a todos los grupos vulnerables en el diálogo, capacitación y acceso adecuado de información, además de priorizar los derechos de las personas y grupos marginados de las comunidades.
- Las relaciones entre las personas interesadas deben ser de colaboración, respeto y confianza.
- Los efectos negativos deben reducirse al mínimo en todas las fases del ciclo de extracción y beneficio; si se desconoce el alcance de las afectaciones ambientales debe actuarse con prudencia.
- Debe existir una correcta planificación para el cierre y postcierre de las operaciones mineras, este debe garantizar las mismas condiciones del territorio.
- Debe lograrse una distribución más equiparable del uso de los minerales entre países industrializados y países en desarrollo.
- Las decisiones que se tomen deben descentralizarse e involucrar a los actores que son afectados directamente. A su vez, se busca generar alianzas entre el sector privado, el sector público, la sociedad civil y los socios de negocios, ya que, esto demandará objetivos aceptados por todas las partes, responsabilidad compartida, rendición de cuentas separadas y obligaciones recíprocas.

En primera instancia, podría inferirse que el término sostenibilidad en minería es una contradicción, debido a que, los minerales son recursos no renovables; sin embargo, es necesario comprender que esta no tiene que aplicarse rigurosamente sobre los minerales, más bien deben aplicarse los principios de sostenibilidad en todas las etapas y actividades de una operación minera.

La agenda 2030 de la ONU plantea diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan equilibrar el crecimiento económico, la equidad social y la protección ambiental. Como tal los ODS no representan un conjunto adicional de requerimientos o normas que las empresas deban seguir, más bien, ofrecen un marco de trabajo con el cual las empresas pueden demostrar, a través de su integración y de la presentación de informes de sostenibilidad, que están gestionando de manera responsable toda la gama de asuntos económicos, ambientales, sociales y de gobernanza (*Responsible Mining Foundation, 2020*). Los ODS que involucran en mayor medida a la industria minera son:

- ODS 5 → Igualdad de género.
- ODS 6 → Agua limpia y saneamiento.
- ODS 7 → Energía asequible y no contaminante.
- ODS 8 → Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS 9 → Industria, innovación e infraestructura.
- ODS 12 → Producción y consumo responsables.
- ODS 13 → Acción por el clima.



- ODS 15 → Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS 16 → Paz, justicia e instituciones sólidas.

La sostenibilidad en el sector minero ha adquirido una relevancia creciente, transitando de modelos asociados con altos impactos ambientales y sociales, hacia esquemas con mayores regulaciones y mejores prácticas. En este contexto, la Agenda 2030 brinda un marco de referencia clave para guiar el desarrollo de una industria más responsable, basada en el crecimiento económico, el equilibrio con la protección del ambiente y el bienestar social. No obstante, persisten brechas y limitaciones que deben ser gestionadas por los actores involucrados para consolidar la transición hacia un modelo minero sostenible.

### 2.3 El sector minero en el marco de sostenibilidad

El estudio *Breaking New Ground (IIED, 2002)* plantea que la sostenibilidad en el sector minero no depende únicamente de reducir las afectaciones, ya que, al hablar de ellas siempre se generan dudas sobre cómo deben agruparse y ciertamente no existe una única respuesta porque se pueden agrupar de acuerdo con los componentes afectados, con las actividades desarrolladas y con la dificultad de algún detalle medioambiental no previsto (*Spitz & Trudinger, 2019*). En este contexto, lo que se busca es integrar las afectaciones y contribuciones del sector como parte de un sistema en el que coexisten dimensiones ambientales, sociales, económicas y de gobernanza, además de múltiples actores, instrumentos de regulación y mecanismos de gestión.

En el siguiente apartado, se mencionan las principales áreas que se desean abordar y se identifican beneficios de la actividad minera y brechas que persisten hasta ese momento en el marco de transición hacia la sostenibilidad.

- **Control, uso y manejo del territorio:** El desarrollo de la actividad minera en cualquiera de sus etapas implica un uso temporal del territorio y aunque se sabe que la información sobre cualquier proyecto minero debe ser pública en muchos casos al ser el Estado el que otorga las concesiones existen partes afectadas que no conocen lo que se aproxima, aunque es importante mencionar que al menos debe existir algún tipo de compensación (diseñada para evitar una pérdida, no para generar un beneficio).

Por otra parte, existe una alteración cuando en el área se encuentran asentadas personas con percepciones diferentes sobre el valor y uso del territorio, cuyas vidas dependen de actividades de subsistencia (*IIED, 2002*). Si bien estas afectaciones son negativas, es imperativo mencionar que se obtienen beneficios para la sociedad como las regalías que las empresas realizan por la producción.



- **Reasentamiento:** En muchas ocasiones la población se ve en la necesidad de trasladarse de su lugar de residencia, es decir, se produce un reasentamiento involuntario y esto puede producir riesgos económicos, sociales y ambientales, como, pérdidas de hogares, comunidades, tierras productivas, recursos, tenencias de tierras y actividades culturales.
- **Áreas protegidas:** Los espacios considerados áreas protegidas (reserva natural integral/ áreas de vida silvestre, parques nacionales, monumentos naturales, áreas para el manejo de hábitats o especies y sitios declarados patrimonio mundial por UNESCO) han sido respetados en su mayoría y se han realizado procesos de planificación inclusivos, llevando así al aumento de áreas protegidas hasta 1990 de un 0.5% a un 8.5%, en donde la industria minera ha aportado 5.3% de esta evaluación y conocimiento (IIED,2002).
- **Generación de empleo:** En países con economías en transición y desarrollo, la industria minera cuenta con condiciones de trabajo seguras y saludables con remuneraciones competitivas, jornadas laborales razonables, oportunidades de desarrollo y capacitación, atención a normativas de salud y seguridad ocupacional.
- **Generación de infraestructura:** La actividad minera al asentarse en una zona específica busca facilitar el acceso a las instalaciones y el desarrollo de la zona, por ello, las empresas se ven en la necesidad de hacer carreteras, instalaciones eléctricas, escuelas, hospitales, líneas férreas, áreas de recreación o entretenimiento y servicios (agua y drenaje).
- **Proteger y respetar los derechos humanos:** Las relaciones entre administración y trabajadores de las empresas líderes han mejorado notoriamente, sin embargo, esta mejoría no ha sido uniforme, ya que, siguen existiendo países con gobiernos autoritarios que no respetan e incluso atentan contra la integridad humana mediante represión, asesinatos, golpizas, extorsión, saqueos y encarcelamiento (IIED,2002). Podría mencionarse que por esta razón muchos países con viabilidad para crecimiento económico a través de la minería no se han desarrollado.
- **Instituciones de la comunidad:** Es de vital importancia la planificación y puesta en marcha de instituciones, mecanismos, reglas y sanciones de gobernanza de la comunidad para la participación en evaluación de problemas y oportunidades, debates, consensos, trabajo conjunto, seguridad social, distribución de costos y beneficios, vigilancia y control que permiten evaluar y tener consciencia sobre la actividad minera que se va a llevar a cabo (IIED,2002). No obstante, la puesta en marcha de estas acciones puede ser desigual, debido a que los mecanismos para llevarse a cabo son puntuales y se degradan con el pasar de los días.
- **Desarrollo económico:** Durante la etapa de exploración este es comparativamente bajo, pero representa el primer acercamiento entre la empresa y la compañía minera. Posteriormente, en la construcción puede generar un *boom* de puestos de trabajo, aunque también puede generar agitación social.



- **Salud:** Los servicios de salud incrementan debido a que, las empresas mineras construyen instalaciones para la atención médica y oportuna de los empleados y sus familias.
- **Educación:** El acceso a instalaciones educativas ha crecido notoriamente, brindando oportunidades de mejora mediante programas de becas.
- **Contaminación de aguas superficiales y subterráneas:** Cuando no existe control sobre las actividades que realiza la compañía minera en cuestiones de disposición de residuos mineros potencialmente generadores de drenaje ácido; sumado a esto que no exista supervisión alguna, las probabilidades de fugas crónicas por exceso de acumulación y el contacto directo de estos en los cuerpos de agua causan daños difíciles de mitigar y que afectan a todo un sistema ambiental y social.
- **Disparidades de género:** La industria representa la oportunidad de obtener un empleo de manera directa e indirecta, logrando con ello una diversificación de la economía local y la formación de conocimientos técnicos sobre las etapas del proceso productivo (IIED, 2002). No obstante, siguen existiendo vacíos que deben trabajarse para que exista igualdad de oportunidades para todas las personas.
- **Fundaciones o fondos de ayuda:** Las compañías mineras se han preocupado por crear programas que garanticen que las comunidades aledañas reciban beneficios de la actividad minera. A la par que, las empresas inculcan y motivan a la población a realizar compras a proveedores y distribuidores locales.
- **Emisiones y cambio climático:** La minería tiene una influencia significativa debido a la maquinaria requerida para realizar actividades dentro del ciclo operativo la cual utiliza combustibles fósiles, asimismo, en las etapas del proceso se suelen consumir grandes cantidades de energía que provienen generalmente de fuentes no renovables, incrementando así las emisiones de gases efecto invernadero anuales.
- **Deforestación:** Principalmente la minería a cielo abierto requiere de la eliminación de vegetación y suelo superficial, además de la modificación del relieve, con ello, no solo se destruye el hábitat de especies animales y vegetales, sino que también se reduce la capacidad de los ecosistemas para absorber gases contaminantes como el CO<sub>2</sub>, por ello se debe trabajar conjuntamente para tener áreas de protección y reproducción de especies animales y vegetales, para que al cierre de operaciones estas sean reestablecidas en el área.

En conjunto, estos elementos reflejan que el sector minero ha incorporado progresivamente componentes de sostenibilidad; sin embargo, también evidencian las brechas persistentes relacionadas con la gestión de impactos acumulativos, la distribución equitativa de beneficios, la gobernanza territorial y la articulación entre actores. Con lo analizado en esta sección se confirma que la sostenibilidad en el sector minero no constituye un estado alcanzado, sino un proceso de mejora continua condicionado por factores técnicos, sociales e institucionales.



## 2.4 Análisis del sector minero a partir de 2012

A una década de la publicación de *Breaking New Ground* se realiza una revisión independiente de cómo se desempeñó el sector minero en relación al desarrollo sostenible de alto alcance la cual lleva por nombre “MMSD+10: Reflecting on a decade of mining and sustainable development” (*IIED, 2012*); sin embargo, esta evaluación recae en que el avance se da de manera desproporcionada en los diversos aspectos considerados para alcanzar el objetivo de sostenibilidad en la industria. Si bien se presentó un avance trascendente, aún se encontraron desafíos que nadie había considerado como la demanda de minerales necesarios para cubrir las necesidades de la población que va en aumento.

Para adentrarnos en este sentido es necesario comprender que la transición de la minería no es proceso sencillo y aunque no es justificable, debe ser entendible que a 10 años de haber publicado la base de lo que sería la minería sostenible, algunos de los objetivos no se habrían cumplido y esto se debe en gran medida a que al realizar esta guía los estándares y objetivos estaban fuera del alcance y conocimiento de las compañías mineras. Por ello, lo que a continuación se expresa abarca aquellos puntos que fueron realmente evaluados, enfocados y atendidos y que sirvieron como una base para la transición que se generaría en años posteriores (*IIED, 2012*).

La comprensión de desarrollo sostenible ha mejorado notablemente ya que las empresas reconocen que este consiste en equilibrar las necesidades de la sociedad, medio ambiente y economía, este avance resultó vital para saber cuál es el punto de partida de cada uno de los interesados. La creación de políticas organizacionales y sistemas de gestión era imprescindible, sin embargo, actualmente se requiere hacer más para garantizar las buenas prácticas en todo el sector (mineros en pequeña escala, empresas junior, de medio y alto nivel).

La cuestión en este punto debe ser ¿Cómo se verifica que la industria tenga éxito?; esta verificación se realiza mediante informes que son públicos e independientes y que plasman el éxito que tienen las compañías, pero debe considerarse que estos no siempre son fidedignos y que para estar seguros de un avance en sostenibilidad se necesitan acciones y no solo palabras.

Otro paso fue la articulación de principios y códigos de conducta entre las partes interesadas que comparten objetivos e intereses, además, la visión comienza a cambiar debido a que al reestructurar el intercambio de ideas la sociedad en colaboración con la industria ven las diversas situaciones que se presentan como una manera de obtener ganancias.

A su vez la industria al comenzar su transición se apoyó de algunas iniciativas internacionales como las iniciativas GRI (Global Reporting Initiative) que son de utilidad debido a que los informes de sostenibilidad publicados presentan principios e indicadores de desempeño, los principios voluntarios de seguridad que ayudan a las empresas a operar de manera segura y respetando los derechos de los colaboradores, la iniciativa EITI (Extractive Industries



Transparency Initiative) que permite fortalecer la gobernanza responsable y transparente, las normas de desempeño CFI (Corporación Financiera Internacional) que permiten identificar, evitar, mitigar y gestionar riesgos e impactos, entre otros.

A continuación, se indagará en los avances logrados para tener una comprensión de aquellos aspectos que se han cubierto casi en su totalidad (*IIED, 2012*):

- La salud y la seguridad son un tema prioritario, por ello, en el ámbito de los programas sociales se consideraron los movimientos en pro de la salud y el bienestar de los colaboradores y sus familias. Se realizan talleres y conferencias en los que se comparten experiencias y respuestas.
- Existen bases de datos de mejores prácticas sobre salud ocupacional y es posible decir con certeza que hay una mejora real debido a los datos de las propias empresas y las instituciones de salud.
- Se redujo el número de fallecimientos en la labor minera.
- La industria se encuentra comprometida con el acceso a la tierra y la nacionalización de los recursos, además planteó renegociaciones entre las partes involucradas de cada uno de los proyectos.
- Se mejoró el intercambio de información y la cooperación entre los sectores y el gobierno; además, se buscó la adecuada planificación del uso de la tierra.
- Las partes interesadas tienen mayor conocimiento gracias al consentimiento libre, previo e informado.
- El ICMM (International Council on Mining and Metals) publicó documentos sobre los derechos humanos en el sector que también han iniciado el proceso de apoyo con orientación específica sobre sistemas de gestión.
- Se implementan planes comunitarios de desarrollo sostenible en forma de acuerdos de impacto-beneficio y se está extendiendo en las regulaciones nacionales.
- Existe un registro sobre los avances técnicos relacionados a la toxicidad del agua y los metales residuales, debido al conocimiento hay menos desastres ambientales.
- Se implementaron buenas prácticas sobre las áreas protegidas y la biodiversidad, además se acordó que ninguna compañía minera tiene permiso de explorar y explotar en los sitios considerados patrimonio mundial.
- Existen publicaciones que sirven para ayudar a planificar el cierre de minas y ya existen ejemplos de buenas prácticas.
- La introducción de un programa de cambio climático en el cual se han acordado principios, compromisos y áreas prioritarias mediante la formulación de políticas nacionales.
- Actualmente, gran parte de las compañías se encargan de almacenar y dar tratamiento al suelo, crear unidades de manejo ambiental y reproducción de especies endémicas y en peligro de extinción. Aunque para algunos países en desarrollo las actividades de conservación de especies, tratamiento de hábitats o implementación de programas



de rehabilitación solamente se implementan, pero no se monitorean debido a que los países carecen de la capacidad necesaria para llevarlos a cabo.

- Se tiene un avance en cuanto a compensación o mitigación de los impactos ambientales, esto se ha realizado mediante la implementación de energías limpias, reforestación de áreas, tratamiento de agua, compensación forestal in situ o en otra zona que lo requiera.
- El acceso a la información actualmente es clave para generar confianza y cooperación, ya que permite una interacción con todos los actores interesados, además de promover la participación pública en la toma de decisiones. Por otra parte, también se consideran sistemas de rendición de cuentas y verificación para supervisar el desempeño de las empresas, gobiernos y sociedad civil.
- Publicación y divulgación de informes de sostenibilidad que ha logrado una gran aceptación pública y política, además de un modelo de gobernanza de múltiples partes interesadas.

A partir de los avances descritos se puede mencionar la posibilidad de que durante los diez años transcurridos solamente se hayan establecido normas y regulaciones en materia de sostenibilidad y que, por lo tanto, el reto para los años posteriores fuera la aplicación de esas regulaciones en consonancia con las crecientes expectativas que definan la gobernanza del sector lo cual da lugar a iniciativas como:

- La espera de que las empresas creen y compartan valor y responsabilidad en un complejo conjunto de cuestiones económicas, sociales y medioambientales.
- Los gobiernos actúen en la búsqueda de beneficios como el aumentar el capital social de los proyectos, el aumento de impuestos y regalías, la realización de exámenes de políticas y la introducción de una mayor supervisión y atención a programas de vinculación.
- La asociación con otros países para implementación de procesos y tecnologías.
- La adopción de principios voluntarios sobre derechos humanos y humanidad que deben ser obligatorios.
- Consentimiento libre, previo e informado como una herramienta principal para garantizar y proteger los derechos de los pueblos indígenas, abriendo conversaciones sobre aquello que no se permite para las inversiones basadas en cuestiones sociales y ambientales.
- Apoyar la adaptación al cambio climático, incluyendo el aumento de los riesgos para insumos críticos como el agua y la energía, el aumento de la competencia por otros recursos y los riesgos para la salud y la seguridad de los empleados.
- Tomar mejores decisiones sobre la renta de los recursos, la reinversión, los incentivos verdes y la transparencia.

Para lograr lo planteado el sector minero tiene que considerar la viabilidad en el contexto de un impulso posterior en torno a la planificación integrada del uso de la tierra y las situaciones



---

sociales que generen nuevos modelos de asociación que aporten habilidades diferentes y garanticen que el sector minero haga una verdadera contribución a la sociedad y el medio en el que se desarrolle.



---

## CAPÍTULO 3

# SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR MINERO MEXICANO

### 3.1 Prácticas actuales en el sector minero mexicano

El sector minero actualmente es un motor clave de inversión, empleo y desarrollo regional pero no se debe dejar de lado los desafíos a los que se enfrenta, los cuales están relacionados principalmente con sostenibilidad ambiental, seguridad laboral y la relación con las comunidades. Ante estos retos, la industria se encuentra en constante evolución desde hace algunos años, adoptando diversas prácticas tecnológicas, ambientales y sociales para hacer la operación más eficiente y responsable.

El punto clave del análisis que se presenta a continuación es explorar las principales prácticas aplicadas en la minería mexicana a mediana y gran escala, evaluando el impacto en la eficiencia operativa, la reducción de afectaciones negativas y la contribución al desarrollo sostenible. A través de este, se busca comprender cómo la industria está adaptándose a un contexto global más transparente, sostenible y de gobernanza.

### 3.2 Cámara Minera de México

Para hablar del mismo, se considerará el análisis del informe anual de sostenibilidad de CAMIMEX (Cámara Minera de México). El Informe Anual de Sostenibilidad de la Cámara Minera de México se ha consolidado como un documento clave para analizar el desempeño ambiental, social y económico del sector; en él se recopilan datos sobre las acciones implementadas por las empresas afiliadas desde 2020.

En cuanto al sentido social las empresas son conscientes y se encuentran comprometidas con el personal que labora en las unidades y su desarrollo por ello, se han centrado en cuatro puntos estratégicos como (*CAMIMEX, 2025*):

- Trabajo digno y seguro
  - Se han desarrollado políticas de seguridad que impulsan el bienestar de los colaboradores y que se ven materializadas a través de una cultura preventiva, además de proporcionar e implementar nuevas herramientas y métodos para un trabajo seguro.
  - Se realizó la adquisición de sistemas de sensores de humo, equipos de bombeo, estaciones totales para monitoreo de estabilidad de terreno. Actualmente algunas operaciones cuentan con salas de operación remota de equipos, cables



---

geomecánicos inteligentes y drones en exploración, sistemas de monitoreo en tiempo real a personal en interior mina, implementación de tecnología de monitoreo de fatiga y somnolencia al personal.

- Vigilancia al personal con enfermedades crónico-degenerativas, platicas de salud ocupacional y la adopción de la implementación del plan integral de ergonomía.
- Incremento en la cantidad de campañas y programas que promueven el cuidado del bienestar físico y psicológico, la seguridad y la realización de las actividades de forma adecuada y segura.
- Capacitaciones a colaboradores para brindarles conocimientos técnicos, teóricos y prácticos para que puedan desarrollar su labor de la mejor manera.
- Salarios competitivos
  - De acuerdo con datos del IMSS, el salario promedio del sector minero fue de 716.46 pesos diarios, representando un incremento del 11.3% con respecto al promedio registrado anteriormente.
  - Beneficios que incluyen bonificaciones, seguros y planes de carrera, asegurando un entorno de trabajo estimulante y productivo.
- Colaboradores
  - Las empresas generan empleos dignos, seguros y de calidad en zonas con pocas alternativas de empleo formal (*CAMIMEX, 2025*).
  - Se ha incrementado la escolaridad de los colaboradores gracias a la mejora en las condiciones de vida, las becas, capacitaciones y apoyos otorgados por las empresas del sector.
- Diversidad e inclusión
  - La participación femenina ha tenido un crecimiento en los últimos doce años; actualmente 74 mil 529 mujeres trabajan en este sector, representando con ello el 18% del total de la plantilla laboral, distribuyéndose como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3. 1. Participación de mujeres en el sector minero. Fuente: Informe Anual de Sostenibilidad 2024 (CAMIMEX, 2025).

- Durante 2023 se suman a la iniciativa de salas de lactancia Minera Peñasquito y Compañía Minera Peña Colorada, consumando un total de 43 salas ubicadas en distintas operaciones a lo largo del país; a su vez esta última empresa publicó el Manifiesto de Diversidad e Inclusión, mientras que, Agnico Eagle mediante su Política de Maternidad brinda la oportunidad de tener hasta un año de licencia para ejercer su maternidad o periodo de lactancia con un goce de sueldo.

Con las acciones descritas las empresas están contribuyendo particularmente al ODS 8, al promover empleos seguros, dignos y bien remunerados, impulsando la capacitación técnica y fomentando condiciones laborales justas. Asimismo, se relacionan con el ODS 3 mediante la implementación de políticas y tecnologías orientadas a la seguridad ocupacional, la salud física y mental de los colaboradores. Por otra parte, las iniciativas de diversidad e inclusión fortalecen al ODS 5, al incentivar la participación de mujeres dentro del sector y crear condiciones laborales equitativas. Estas prácticas también reflejan el compromiso con el ODS 10, al generar oportunidades en comunidades con escasas alternativas de empleo formal.

Anteriormente se habla de aspectos sociales referentes al personal de las compañías, sin embargo, las mismas tienen un compromiso que va más allá de sus colaboradores el cual se ve reflejado en el conjunto de condiciones que permiten a las personas y comunidades vivir con dignidad, seguridad y calidad de vida esto se conoce como bienestar social y se ha convertido en un objetivo central del sector, ya que implica garantizar el progreso económico y tecnológico de manera equitativa. Las empresas afiliadas a la CAMIMEX deciden evaluarlo en cuatro ejes estratégicos que son (CAMIMEX, 2025):

- Salud
  - El sector colabora estrechamente con las autoridades sanitarias para mejorar el acceso a servicios de salud en las comunidades mineras, esto mediante la donación



de medicamentos y equipo médico, además de contratación de personal médico, para garantizar acceso oportuno y de calidad, a su vez, realiza consultas médicas y campañas de salud preventiva.

- Educación
  - Se implementan programas que promueven una educación inclusiva y de calidad, ofreciendo oportunidades de aprendizaje a niños, jóvenes y adultos en las comunidades.
  - Se otorgan becas educativas y se invierte capital en construcción y mejora de infraestructura educativa, equipos de cómputo, materiales didácticos y útiles escolares.
- Desarrollo
  - Mediante iniciativas de inversión social, las empresas mineras promueven oportunidades de desarrollo, apoyando a negocios existentes o nuevos emprendimientos a través de programas de capacitación, insumos y capital semilla.
  - Se han establecido centros comunitarios que son espacios de integración social, construcción de visiones comunitarias, convivencia y desarrollo, en los cuales se llevan a cabo talleres y cursos de capacitación y de habilidades como computación, cocina, corte y confección, belleza, inglés, superación personal, así como actividades deportivas, culturales y de emprendimiento en beneficio de los habitantes de las comunidades.
- Infraestructura
  - Las compañías han mantenido una estrecha relación con las comunidades, lo cual les ha permitido ser beneficiarios de mantenimiento y rehabilitación de espacios públicos, construcción y remodelación de vivienda, rehabilitación y pavimentación de vialidades y caminos, obras para suministro de electricidad y agua potable, servicio de internet y alumbrado público, construcción o mantenimiento del sistema de alcantarillado y drenaje, saneamiento de aguas residuales, entre otros.

Mediante la implementación de estas acciones, las empresas están contribuyendo al ODS 3 por incentivar programas de salud, diagnóstico y control de enfermedades crónico degenerativas, apoyo en campañas de vacunación, salud visual y auditiva, mejora y equipamiento de clínicas; el ODS 4, a través del otorgamiento de becas y el fortalecimiento de la infraestructura educativa; el ODS 8 y el ODS 10, al promover y diversificar las economías locales; así como el ODS 9 y el ODS 11 implementando obras de infraestructura básica y servicios que mejoren la calidad de vida de las comunidades cercanas.

En un contexto global donde la protección del medio ambiente se ha vuelto una prioridad, el compromiso ambiental en el sector minero adquiere una relevancia cada vez mayor. Las empresas del sector han comenzado a implementar políticas y prácticas orientadas a minimizar las afectaciones. La CAMIMEX refleja este compromiso que no solo responde a la creciente presión social y regulatoria, sino también a la necesidad de asegurar la viabilidad



a largo plazo de las operaciones afiliadas a la misma, que se enfocan en tres ejes estratégicos (CAMIMEX, 2025):

- Reducir la huella hídrica a través de una gestión eficiente del agua
  - Las operaciones han logrado reducir su consumo de agua fresca, en el año 2023 el agua fresca consumida representó el 30% aproximadamente 160 millones de m<sup>3</sup> del agua total requerida, hubo una reducción de 14 millones de m<sup>3</sup> en comparación con el año anterior debido a que muchas de las empresas afiliadas han optado por la implementación y uso de aguas residuales tratadas en sus procesos industriales e implementan circuitos cerrados en sus operaciones.
- Combatir el cambio climático a través del uso eficiente de la energía y del consumo de sus energías renovables
  - El sector minero trabaja activamente en su descarbonización mediante la generación de energía a partir de fuentes renovables, logrando con ello que de toda la energía requerida en las operaciones el 35% provenga de las mismas; la descarbonización se ha llevado a cabo mediante la implementación de parques eólicos y centrales de energía solar, la reconversión o sustitución de equipos para un uso más eficiente de la energía y energéticos.
  - De acuerdo con *Domke et al. (2020)* la reforestación de bosques contribuye a la absorción de más del 14% de emisiones de CO<sub>2</sub> anuales. Por tal motivo, las empresas mineras han implementado programas y campañas de reforestación tanto dentro como fuera de sus instalaciones coadyuvando a la captura de carbono, un caso es el que mencionan *Ussiri et al. (2006)* sobre las áreas reforestadas en minas de Ohio, EUA que capturan carbono en medida comparable a ecosistemas naturales.
- Minimizar su huella ambiental y contribuir a la conservación y protección del medio ambiente
  - Las empresas realizan una planeación conceptual del cierre de una mina desde las etapas iniciales del mismo proyecto con el propósito de establecer los criterios y lineamientos para garantizar la seguridad y estabilidad física y química de la operación al final de su vida útil.
  - Los viveros e invernaderos operados por las empresas afiliadas alcanzaron una producción de 6.81 millones de árboles, de los cuales aproximadamente el 33% se utilizó para reforestar áreas dentro de las operaciones mineras y zonas aledañas y el resto fue donado a organizaciones de la sociedad civil.
  - Se implementan diversos programas para proteger y conservar distintas especies de flora y fauna, algunas de ellas consideradas en alguna categoría de riesgo; como parte de dichas acciones, algunas empresas operan Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) o Predios o Instalaciones que manejan Vida Silvestre (PIMVS).



- Conversión de jales de apilamiento en seco o filtrado como mejor método de disposición, ya que reduce el consumo de agua y el riesgo de alguna falla en el depósito; recuperación del agua contenida en los jales a través de circuitos cerrados; uso como materia prima para mejorar la estabilidad en minas subterráneas, en actividades de restauración progresiva o como relleno en tajos agotados.

A través de estas iniciativas las empresas afiliadas han contribuido directamente sobre el ODS 6 mediante la gestión responsable del recurso hídrico y el uso de fuentes de agua alternas; el ODS 7 y el ODS 13 por medio de la incorporación de energías renovables y la reducción de la huella de carbono de las unidades en operación; así como al ODS 15 mediante programas de reforestación y preservación de especies de flora y fauna y el manejo adecuado de residuos mineros.

El análisis anterior engloba a todas las empresas afiliadas a la Cámara Minera de México como Agnico Eagle, Arcelormittal, Capstone Gold, Carrizal Mining, Autlán, Minera Cuzcatlán, First Majestic, Minera Peña Colorada, Peñoles, Fresnillo plc, Orla Camino Rojo, entre otras; por ello, podría intuirse que el informe de sostenibilidad es más un resumen sobre las actividades en materia social, ambiental y económica que realizan las empresas considerándolas como un conjunto y en las que se destacan aquellas que han implementado actividades o programas en el transcurso del año; esto no pretende ser una crítica negativa, más bien pretende hacer del conocimiento de todos que para evaluar el verdadero avance que se ha tenido en materia de sostenibilidad es necesario conocer qué han hecho las empresas individualmente, cuáles son sus ejes estratégicos y cuál es la diferencia entre lo reportado por la CAMIMEX y lo que cada empresa describe en sus informes de sostenibilidad.

Para efectos de la presente investigación se enfoca en los informes de sostenibilidad de Peñoles, Fresnillo plc, Grupo México y un conjunto de empresas multinacionales que son líderes dentro del sector minero mexicano y que su principal objetivo al publicar estos es transparentar su desempeño y responsabilidad en materia ambiental, social y de gobernanza.

### 3.2 Peñoles/ Fresnillo plc

De acuerdo con el informe de sostenibilidad de Peñoles y Fresnillo plc su enfoque se apoya en tres principios (*Peñoles S.A.B. de C.V., 2024*):

- Arraigar la sostenibilidad en su cultura organizacional.
- Operar de manera compatible con la sociedad y el medio ambiente.
- Compartir los beneficios con sus grupos de interés.

Basándose en estos principios Peñoles y Fresnillo plc han desarrollado estrategias que impulsan su desarrollo dentro de un esquema de sostenibilidad; integrado por **dimensiones ambientales**, como (*Peñoles S.A.B. de C.V., 2024*):

- Huella de carbono



- Una de sus principales metas es que para 2028 el consumo de energía que requieren sus operaciones provenga 100% de fuentes limpias.
- Para evaluar los riesgos y oportunidades se consideraron escenarios y horizontes de tiempo de las posibles condiciones climáticas futuras y de las respuestas de la sociedad para mitigar y adaptarse a los impactos.
- La estrategia que se ha implementado para la descarbonización de sus operaciones se basa en la migración de las cargas de Termoeléctrica Peñoles (TEP) al mercado eléctrico mayorista (MEM) con el propósito de reducir costos. También se migraron las cargas del complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles y Minera Tizapa al *pool* del MEM. El complejo químico Quirey, La Herradura, Fresnillo flotación de hierro y Juanicipio migraron al MEM con un contrato de cobertura del campo eólico de Mesa La Paz. Gracias a este proceso de descarbonización en 2023 se obtuvo una disminución de 14.17% en las emisiones de GEI (Gases Efecto Invernadero).
- Se han implementado hojas de ruta que permiten establecer aquellos procesos que son difíciles o complejos de descarbonizar en las que se consideran múltiples palancas, su impacto en la reducción de emisiones, la velocidad de implementación y las implicaciones financieras que conlleva, las operaciones que han servido para hacer pruebas piloto son Penmont, fundición de plomo y Química del Rey, además de dos operaciones subterráneas Fresnillo y Velardeña.
- Otras actividades que se han implementado son talleres de cambio climático en modalidad virtual y presencial y talleres con investigadores de la UNAM.
- Gestión hídrica
  - En el proyecto minero Orisyvo se han realizado análisis detallados para entender las necesidades en todas las etapas del proyecto, evaluación del área de influencia directa e indirecta de la operación, planificación a futuro y con ello un planteamiento del diseño estratégico de las instalaciones, en colaboración con las comunidades y partes interesadas.
  - Estas empresas reportaron en 2023 una entrada de agua de 38,728.11 ML de agua de entrada de las cuales 28,735.7 ML es agua fresca, agua salobre 3,580.10 ML y agua tratada 6,412.31 ML; como salida de agua 14,500.83 ML y consumo total de todas sus operaciones 24,227.28 ML. A su vez, reportan una eficiencia de reúso del 78% que comprende 111,958.54 ML de agua de proceso y 87,731.26 ML de agua recirculada.
- Biodiversidad
  - Se gestiona la conservación de la biodiversidad de manera eficiente a nivel local, con base en el marco regulatorio aplicable.
  - Restauración al entorno impactado y, como último recurso, se realiza la compensación correspondiente.
  - Se evitan desmontes no autorizados, ingreso de flora o fauna no nativa y extracción de especies fuera del predio autorizado.



- Actividades de rescate y reubicación de individuos de flora y fauna.
- Ejecución de obras de conservación de suelos e infiltración de agua.
- Gestión de residuos minero-metalúrgicos
  - Se han implementado acciones como el revestimiento, el sistema de drenaje de interceptación de filtraciones aguas abajo y las canaletas para los desvíos de aguas superficiales, además de programas ambientales de vigilancia alineados al Sistema de Gestión y Cumplimiento Normativo.
  - Las inversiones durante 2023 se concentraron en extender los depósitos de jales existentes.
  - Durante 2023 se generaron 19.35 Mt de jal, de las cuales 2.33 Mt fueron utilizados como relleno de obras inactivas en interior mina. Además, se depositaron 23.01 Mt de mineral en patios de lixiviación y se generaron 1.21 Mt de otros residuos minero-metalúrgicos diferentes al jal (jarosita).
  - Los jales en 2023 se contabilizaron como 85.15% jales generados directamente, 12.36% jales reprocesados dispuestos nuevamente y 2.49% jales reutilizados.
  - Se han implementado mejoras con cambios de estaciones tradicionales a estaciones robotizadas para la medición automática en las principales estructuras geotécnicas de los depósitos en unidades como San Julián, Herradura, Sabinas, Tizapa y Capela. Con ello se tienen beneficios como el monitoreo continuo, mejor precisión y frecuencia de datos y generación de alertas tempranas aumentando la gestión proactiva (antes de falla en el depósito) en comparación con los sistemas tradicionales que además de mayor índice de errores solo permitía una gestión reactiva.
- Gestión de residuos peligrosos y de manejo especial
  - Se realiza una valorización de éstos para verificar si pueden ser reusados, reciclados o valorizados energéticamente.
  - Durante 2023 se generaron 33,000 toneladas de residuos peligrosos (procesos metalúrgicos, fundición, refinería, escombros contaminados y lodos blancos peligrosos) y 294,000 toneladas de residuos de manejo especial.
- Cierre de minas
  - La metodología para el cierre se revisa cada cinco años para minas de Peñoles y, cada tres años para minas de Fresnillo plc o cuando sucede un cambio significativo en la operación.
  - En las unidades operativas se mantienen viveros para la propagación de especímenes que se emplean en la restauración progresiva.
  - En el caso específico de Bismark se ha logrado reforestar 61 hectáreas, se tiene un índice de sobrevivencia del 88% para las especies vegetales reforestadas y se han reubicado 22 ejemplares de fauna silvestre.



En el *tejido social*, Peñoles y Fresnillo plc se enfocan en los siguientes aspectos (*Peñoles S.A.B. de C.V., 2024*):

- Bienestar social integral
  - La organización cuenta con el Protocolo de Acciones para la Implementación de la Consulta Previa, Libre e Informada (CPLI) el cual tiene como objetivo establecer la serie de pasos a seguir en todos los proyectos nuevos y sus expansiones, con la finalidad de determinar si existe la obligación de generar un proceso de consulta a pueblos y comunidades indígenas o afroamericanas, y establecer el procedimiento que se debe seguir.
  - Se imparten periódicamente talleres vinculados con los derechos humanos, entre los que destacan medio ambiente, salud ocupacional, seguridad industrial, evolución cultural, diversidad e inclusión, protección de datos personales, código de conducta y código de conducta a terceros.
  - Se cuenta con la Línea Correcta que sirve como mecanismo de denuncia y se encuentra en proceso de incrementar su alcance y fortalecer sus acciones.
  - Cuenta con programas para la atracción y retención de talento.
  - Se ofrecen programas de capacitación interna y externa alineados con las necesidades de formación detectadas.
  - Se brindan salarios y beneficios competitivos y justos.
  - En 2023 se consolidó la estrategia de Bienestar Integral, que promueve el sano crecimiento y desarrollo de las personas.
  - Se redefinieron proyectos de alto impacto como entornos de prevención, confianza y equilibrio, potenciando el talento, personas con propósito y plenitud.
- Diversidad, equidad e inclusión
  - Se creó la Política de Igualdad Laboral y no Discriminación y un comité que atenderá principalmente dos ejes de acción: talento femenino y personas con discapacidad.
  - Se implementaron acciones como campañas referentes a la lactancia materna y se inauguraron los lactarios en las unidades Capela, Sabinas, Fresnillo, Penmont y Juanicipio.
- Seguridad y salud
  - Se refrendó el Derecho a Decir No, elementos preventivos de la estrategia para la Gestión del Alto Potencial.
  - En 2023 se desarrolló el plan de continuidad de los estudios de seguridad e higiene con el fin de actualizar los mapas de riesgo.
  - La Semana de Seguridad BAL 2023 fue una iniciativa para fortalecer la cultura preventiva en seguridad, salud ocupacional y medio ambiente.



- En cuestiones de salud, se realizaron *check ups* y exámenes ginecológicos, talleres de primeros auxilios, sesiones psicológicas individuales, talleres antiestrés; además, se aplicaron estrategias para fomentar los estilos de vida saludables.
- Comunidades locales
  - Involucramiento en las causas y necesidades de las comunidades, así como apoyo a sus planes de desarrollo de futuro compartido.
  - Espacios de diálogo y participación para el desarrollo comunitario, empoderando a las comunidades para el desarrollo sostenible.
  - Se han impartido talleres y foros interactivos con la comunidad en la que se desarrolla el proyecto Rodeo mostrando las buenas prácticas de las demás unidades y se da la apertura para escuchar sus dudas e inquietudes.
  - Con la participación de la comunidad, se conforman comités para el seguimiento de actividades en torno al manejo y cuidado del agua y se implementaron acciones para el mantenimiento del sistema de abastecimiento.
  - En términos de educación se instauraron programas como Picando Letras, Programa de Robótica FIRST; en colaboración con INNOVEC se lanzó el programa de Educación Climática, se apoya a escuelas y docentes para una mejora en la educación y para disminuir la deserción de los niños y jóvenes.
  - Se promueven estilos de vida saludable; en alianza con Fundación UNAM se realizan jornadas de salud ofreciendo consultas y atención especializada a personas vulnerables.
  - Sin dejar de lado a la población adulta Peñoles y Fresnillo plc promueven el emprendimiento y la mejora de los negocios locales mediante capacitación, asesorías y becas.
  - Se realizan campañas de reciclaje, limpieza y concientización ambiental, y cuidado del agua, mediante difusión, conversatorios y concursos.
  - Se promovió la vinculación con las comunidades de Velardeña y Capela a través de los medios para lanzar la campaña “Desmitificación de la minería”, cuyo objetivo fue resaltar los beneficios socioambientales de una operación minera.
  - Colaboración multidisciplinaria en proyectos de mejora de vivienda, acceso al agua, desarrollo de proveedores, empleo local, obras civiles y estrategia de desarrollo.

A manera de cierre, el compromiso que tienen estas empresas trasciende su papel como actor económico, posicionándose como un agente activo en la mejora del bienestar ambiental y comunitario en las regiones en las que opera. Todas las acciones descritas anteriormente no solo generan valor compartido, sino que también consolidan una relación más armónica y sostenible entre la industria y la sociedad, en línea con los principios de responsabilidad social y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



### 3.3 Grupo México

Por otra parte, se encuentra Grupo México que es una empresa cuyo alcance y presencia internacional la convierten en un actor clave para comprender la relación entre la minería y la sostenibilidad. En su informe de sustentabilidad de 2024 se detalla el desempeño en aspectos sociales, ambientales y de gobernanza. A continuación, se presenta un breve resumen de cómo la compañía gestiona los temas que compete el desarrollo sostenible como el uso del agua, la relación con las comunidades, la mitigación de emisiones, la seguridad laboral, entre otros. En el *plano social*, el informe se enfoca en seis ejes estratégicos los cuales son (*Grupo México, 2025*):

- Seguridad y salud en el trabajo.
- Nuestra gente.
- Diversidad e inclusión.
- Derechos humanos.
- Comunidades locales.
- Pueblos indígenas.

El presente análisis se centra en tratar los seis ejes estratégicos de manera más general y concisa, sin dejar de lado ninguna de las acciones que se han llevado a cabo en cada uno (*Grupo México, 2025*):

- Seguridad y salud laboral
  - Las acciones se basan principalmente en actividades como programas de capacitación y entrenamiento, planes de atención a emergencias, brigadas de seguridad, programas de seguridad conductual, además se cuenta con campañas de salud y pláticas de prevención, talleres de formación en salud mental, programa de bienestar (identificación y prevención de riesgos para la salud no ocupacional y enfermedades crónico-degenerativas), seguimiento a trabajadores incapacitados, auditorias al área de salud, todos estos programas a disposición del personal de la división minera y de las comunidades aledañas.
- Bienestar social integral
  - Se promueve el crecimiento personal de los colaboradores, preparando y perfeccionando las habilidades técnicas y las competencias a través de planes de capacitación y desarrollo.
  - El 46.3% de la plantilla de la División Minera son empleados contratados desde las comunidades locales.
  - En 2023 se brindaron permisos parentales, sólo en la división minera 49 mujeres y 566 hombres hicieron uso del permiso, con una tasa de regreso al trabajo del 99.2%.
- Diversidad e inclusión
  - Se destacan por realizar campañas de sensibilización, capacitación y comunicación sobre diversidad e inclusión y no discriminación, incorporación del enfoque de



igualdad de género y de diversidad en las políticas y procesos de recursos humanos, modificaciones en la infraestructura de centros de trabajo para la inclusión de mujeres, definición de procesos específicos para la sensibilización, prevención y atención de posibles casos de acoso y hostigamiento sexual y/o laboral, promover diversidad e igualdad de oportunidades en comunidades cercanas a las operaciones.

- Apoyo a alumnos de Centros Educativos con algún tipo de discapacidad o necesidades especiales, además de capacitación a mujeres del lugar sobre posibles actividades económicas que podrían llevar a cabo.
- Se colocaron salas de lactancia en plantas metalúrgicas, en la Caridad y en las oficinas corporativas en Ciudad de México.
- Comunidades locales
  - Cuentan con un diagnóstico social participativo (identificación, prevención, mitigación y remediación de los posibles impactos potencialmente adversos), planes de gestión (establecimiento de las medidas para prevenir, mitigar o remediar cualquier potencial efecto negativo) y servicio de atención comunitaria (aplicación de auditorías interpropiedades, lo cual permite la revisión y validación de los elementos necesarios).
  - Se han implementado mecanismos de relacionamiento comunitario como servicio de atención comunitaria, comité comunitario, diálogos comunitarios, programas de desarrollo económico, inversión en infraestructura social, programas de desarrollo humano, proyectos por convocatoria, además de estudios de línea base que permiten evaluar las condiciones sociales en las que se encuentran las comunidades cercanas a las operaciones.
  - En 2023 se hizo inversión en infraestructura social y programas como rehabilitación urbana, certificaciones y reconocimientos, programas sociales como el taller ambulante de cine documental y fotografía, centros educativos.
  - Se han implementado acciones como el centro de desarrollo comunitario en La Ventosa, Juchitán, Oaxaca en el cual se promueve la preservación y fortalecimiento de la lengua y cultura zapoteca y se ha establecido una relación cercana con algunos miembros de la población de Guerrero Negro, Mulegé, Baja California que se identifican con la cultura Cochimí.
  - Existen mecanismos formales de quejas y reclamaciones en presencial y en línea, en ambas se cuenta con personal que atiende en español, inglés y zapoteco.

El **ámbito ambiental** es de igual importancia si se hace referencia al desarrollo sostenible, por ello Grupo México lo divide en los siguientes ejes estratégicos (*Grupo México, 2025*):

- Cambio climático.
- Agua y efluentes.
- Biodiversidad.
- Residuos.



- Cierre de operaciones.

Para hacer una investigación más coherente y concisa se abarcarán las acciones realizadas tomando como base los ejes estratégicos presentados anteriormente (*Grupo México, 2025*):

- Huella de carbono
  - Se han implementado registros de riesgos críticos que aseguran las aplicaciones de controles para enfrentar condiciones atípicas de eventos climáticos que podrían detonar fallas en las cortinas de los depósitos de jales, así como el deslizamiento de taludes en tajos, protocolos de prevención del estrés térmico (incluyen la instrucción necesaria para reconocer señales, síntomas y técnicas de primeros auxilios en las minas subterráneas), implementación de lagunas de retención de agua y canales laterales para el redireccionamiento de los flujos de agua pluvial.
  - La Refinería de Zinc hizo una transición energética posterior al inicio de operaciones del parque eólico Fenicias sustituyendo en un 83% el uso de energía eléctrica y el 17% restante proviene de energía renovable de fuentes alternas.
  - Otras acciones importantes son la implementación de trazas eléctricas para el ahorro de diésel en Buenavista del Cobre, implementación del sistema termo-solar para ahorro de diésel en La Caridad, además se estima invertir en energía renovable, electrificación de camiones mineros, reforestación, formación de humedales y captura permanente de carbono.
- Gestión hídrica
  - Se están recuperando alrededor de 6,000 m<sup>3</sup> de agua al día a través de la nueva planta de filtrado de jales en Quebrada Honda, Perú.
  - Mejoramiento de infraestructura y equipamiento de la red hídrica en Cananea, Sonora.
  - Plan de gestión de sequías para la región Tacna, Perú, se emplea como una herramienta para implementar acciones para reducir impactos a las zonas más vulnerables, de acuerdo con la escala del evento hídrico.
  - Abastecimiento de agua para toda la comunidad de Nacozari, México, mediante la instalación de una planta potabilizadora de agua con capacidad de 30 L/s.
  - En Perú se llevaron a cabo acciones como una planta de tratamiento de aguas residuales, instalación del sistema de agua potable y saneamiento rural y la producción de 200 m<sup>3</sup>/h de agua a partir de cuatro plantas desaladoras instaladas en Ilo.
  - En 2024, el 78% del agua utilizada en sus concentradoras provino de reuso (192,520 ML), mientras que el 22% fue agua fresca que se representa en mega litros (ML) 67,130 de los cuales, 1311 ML fueron de agua residual, 391 ML fue agua producida (aguas residuales de origen natural que pueden contener hidrocarburos, sales, metales y químicos), 22 ML por terceros y 65, 406 ML fueron extraídos de fuentes superficiales y subterráneas. Además, ha trabajado en la reducción de



vertidos, asegurando la calidad de los efluentes antes de liberarlos al ambiente, implementando tecnologías como decantadores para el tratamiento de aguas.

- Biodiversidad

- Unidades como Buenavista del Cobre, La Caridad y Metalúrgica de Cobre cuentan con manuales de prevención de riesgos a la biodiversidad.
- Se han elaborado planes de gestión de la biodiversidad para las unidades de Charcas, San Martín, Santa Bárbara, Buenavista del Cobre, La Caridad, Metalúrgica del Cobre en Nacozari, además, se destacan acciones como reforestación compensatoria, unidades de manejo ambiental (UMA), monitoreo ambiental y planes de cierre con enfoque ecológico.
- Los humedales de Ite, Perú; el sitio estuvo ocupado por residuos mineros por cerca de tres décadas y mediante un proceso de restauración de largo plazo se han estabilizado física y químicamente 1,317 hectáreas de las 1,562 que abarca el sitio en su totalidad.
- Adopción desde 2011 al lobo gris como insignia de la Unidad para la Conservación, Manejo y Aprovechamiento Sustentable de la Vida Silvestre de Buenavista del Cobre albergando hasta 2023, 62 ejemplares del lobo mexicano y ha logrado el alumbramiento de 23 cachorros, así como la reintroducción de 27 ejemplares en sitios en los que originalmente habitó la especie.
- En 2023 se produjeron 5,647,409 plantas, con ello la división minera reforestó 1410 hectáreas. Además, se construyeron 29 presas filtrantes en las inmediaciones de la mina La Caridad y el Complejo Metalúrgico, con capacidad de retener 390 toneladas de suelo. También se construyeron represas con capacidad de retener 7,359 toneladas de suelo adicionales, así como 86 zanjas de infiltración, 897 metros lineales de bordos a nivel y 192 km de riego para romper la capa endurecida del suelo, obras que en conjunto tienen la capacidad de capturar agua de lluvia.

- Gestión de residuos mineros

- Entre las principales acciones se encuentran la operación de presas de jales bajo estrictos estándares de seguridad y monitoreo con sistemas de gestión que incluyen auditorías periódicas y actualizaciones para reducir riesgos de fallas.
- Se fomenta el uso de jales como relleno de minas subterráneas, en 2023 se utilizaron para esta actividad 767,396 toneladas de jales mineros.
- Se diseñan y construyen depósitos para optimizar la estabilidad y minimizar la erosión eólica y cuando ciertas zonas del depósito llegan al final de su ciclo de vida se cubren con material de préstamo o vegetación.
- Desarrollo de técnicas de producción de suelos artificiales mediante la implementación de tecnosuelos a partir de residuos mineros, concretamente jales y material estéril producto del minado; actualmente esta acción se encuentra en etapa piloto en Buenavista del Cobre con ello la empresa se está involucrando a la economía circular.



- Existen dos proyectos de aprovechamiento de escoria, uno de ellos en Hayden, Arizona, con un procesamiento de 4,000 ton/día y el segundo en Metalúrgica del Cobre, Sonora, el cual se encuentra en proceso de evaluación.
- De los 32 depósitos de residuos mineros inactivos con los que cuenta Grupo México 16 están remediados.
- Cierre de operaciones
  - Entre las principales acciones se incluyen etapas progresivas del cierre, que se actualizan según el avance del proyecto, se rehabilitan las áreas afectadas, se realiza el seguimiento ambiental de la calidad del agua, estabilidad de presas de jales y se minimizan los pasivos ambientales, se aseguran y estabilizan las obras para evitar riesgos futuros, además, se mantienen espacios de diálogo con las comunidades para satisfacer sus necesidades e inquietudes.
  - Remediación y confinamiento de residuos metalúrgicos en San Luis Potosí, logrando la remediación de 193 hectáreas y la estabilidad física, química y recubrimiento de 30 hectáreas.

Los informes de sostenibilidad revisados hasta este punto muestran el compromiso del sector con una operación responsable y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible, integrando acciones en los ámbitos social, ambiental y económico. Para enriquecer este análisis, a continuación, se presentan de manera concreta, coherente y concisa algunas de las acciones más importantes llevadas a cabo por empresas mineras transnacionales que cuentan con operaciones en territorio mexicano, con el objetivo de identificar enfoques complementarios y tendencias que sirvan como un referente para fortalecer la sostenibilidad en el contexto nacional actual y futuro y permitir con ello la adopción y adaptabilidad de las mismas para completar la transición de la industria.

### 3.4 Pan American Silver

Cuenta con dos unidades operando en territorio nacional que son La Colorada en Zacatecas, Dolores en Chihuahua y una más en etapa de postcierre que lleva por nombre Álamo Dorado en el estado de Sonora; a su vez, cuenta con operaciones en el extranjero como Shahuindo y Huarón en Perú. Las acciones más destacables dentro de los *aspectos ambientales* llevadas a cabo por la empresa son las siguientes (*Pan American Silver, 2024*):

- Gestión hídrica
  - En Shahuindo se amplió el uso de melaza como aditivo para la mitigación del polvo en más rutas de transporte, esta acción permitió disminuir el uso de agua.
  - En Dolores, se implementó un proyecto para captar agua de lluvia como fuente alternativa de agua.
  - Implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Gestión de residuos mineros



- Planta de filtración a presión y una instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Huarón.
- Sistemas de tratamiento de agua activos o pasivos para neutralizar el drenaje ácido y prevenir los impactos en el agua corriente abajo.
- Se pudieron reutilizar el 30% de la roca estéril producida para el relleno del tajo abierto Dolores.
- Biodiversidad
  - Rehabilitación en más de 89 hectáreas en todas las operaciones, de las cuales 66 hectáreas fueron recuperadas en mina Dolores.
- Cierre de minas
  - Cierre exitoso de mina Álamo Dorado, actualmente se encuentra en monitoreo y mantenimiento posterior al cierre. Esto se realiza mediante la toma de muestras ambientales y análisis para evaluar la erosión, la supervivencia de la vegetación, la recuperación del hábitat, la calidad del agua, la biodiversidad, la estabilidad geotécnica y geoquímica.
  - Experiencia y conocimiento en reconfiguración, recuperación de la vegetación del área con especies nativas y la instalación de nueve depósitos de sedimentos y cuatro diques de contención para el control de drenaje, debido al caso de éxito con mina Austin Gold Ventures.

Los *aspectos sociales* constituyen una dimensión fundamental en el sector minero, por ello, Pan American Silver ha llevado a cabo acciones como (*Pan American Silver, 2025*):

- Seguridad y salud laboral
  - Implementación del sistema de seguridad de tarjeta roja que faculta a los trabajadores a plantear inquietudes sobre condiciones inseguras y rechazar trabajos inseguros.
- Comunidades locales
  - En 2015, se requirió una ampliación del proyecto La Colorada y con ello se realizó la reubicación de trabajadores y familias que ocupaban viviendas deficientes; sin embargo, algunas familias se negaron al reasentamiento y en 2021 se inició un proceso de negociación de reubicación bajo los estándares y mejores prácticas internacionales y en 2024, 31 familias optaron por recibir una compensación económica o un reasentamiento físico.
  - Proyectos locales para el desarrollo económico como el proyecto de fortalecimiento de la cadena de producción de aguacate en Perú, el programa de cría de llamas en Bolivia y el programa de ganadería en México.
  - En las comunidades o pueblos indígenas se cuenta con un programa de Licencias por Prácticas Indígenas Tradicionales que ofrece hasta cinco días de licencia no remunerada para que puedan participar en prácticas tradicionales indígenas.



### 3.5 Agnico Eagle

Reside con tres operaciones en el país, las cuales llevan por nombre Pinos Altos y Crestón Mascota ambas en Chihuahua y La India en el estado de Sonora; además, cuenta con operaciones como Odyssey, Canadian Malartic, Goldex, Detour Lake y Macassa en Canadá, Kittilä en Finlandia y Fosterville en Australia. Es una empresa que busca la incorporación de sus proyectos a la sostenibilidad, por ello, trabaja y desarrolla actividades en el **aspecto ambiental** entre las que destacan (*Agnico Eagle, 2025*):

- Huella de carbono
  - Implementación de sistemas avanzados de recuperación de calor y sistemas de ventilación bajo demanda, así como estrategias de gestión de activos avanzadas y análisis para predecir y reducir el consumo de energía.
  - Actualmente se opera una gran flota de vehículos eléctricos de batería (BEVs) en Odyssey, Macassa, Kittilä y Detour Lake.
- Gestión hídrica
  - La India en México continúa reciclando agua de contacto superficial en lugar de usar agua fresca para actividades de procesamiento.
- Gestión de residuos mineros
  - En 2022, el equipo de medio ambiente de Canadian Malartic se propuso cubrir progresivamente sus celdas de jales, que se habían identificado como que generaban potencialmente ácido, con jales no potenciadores de ácido y simplificar la opción de cobertura final para el cierre de la instalación de jales.
- Gestión de residuos peligrosos y de manejo especial
  - En 2024, Fosterville logró restablecer un canal de reciclaje para madera residual, a través de la colaboración con negocios locales. Esto resultó en más de 100 toneladas de madera en desecho desviadas de vertederos.
  - Goldex implementó una nueva prensa de cartón para optimizar la recolección de material reciclable bajo tierra.
  - En 2024, Pinos Altos lanzó un programa para ayudar a los talleres mecánicos en comunidades cercanas a disponer adecuadamente de residuos peligrosos, específicamente aceite usado, a través de una empresa autorizada.
- Economía circular
  - Todas las operaciones encuentran oportunidades para reutilizar residuos de roca extraída utilizándola como material en construcción o relleno subterráneo o en pozos. Pinos Altos utiliza el 30% de jales filtrados para crear una pasta de alta resistencia para el relleno de rebajes subterráneos, mejorando la estabilidad y seguridad de la mina.
  - En la unidad Detour Lake, Agnico Eagle se ha asociado con Kal Tire para reparar neumáticos en el sitio en lugar de comprar neumáticos nuevos. Este enfoque logró



prevenir 2,050 toneladas de emisiones de dióxido de carbono y evitar el uso de 44 mil litros de aceite en 2024.

- La unidad Fosterville tiene un programa de reciclaje para los uniformes emitidos, con un servicio de recolección dedicado en el lugar. La ropa se envía a un reciclador textil en Melbourne, donde se reutiliza como hilo para su uso en nuevos productos.

En el **aspecto social**, Agnico Eagle ha implementado acciones en ejes estratégicos como (*Agnico Eagle, 2025*):

- Bienestar social
  - En Pinos Altos y La India en México, el 100% de la fuerza laboral es de México y el 57% local o de las comunidades más cercanas a la operación, con la mayoría viviendo en los estados del norte de Chihuahua, Sonora y Sinaloa.
  - El equipo de Agnico Eagle México cocreó un libro titulado "Libro de Bosques Templados Pino y Encino de la Sierra Madre Occidental" junto con miembros de la comunidad local. Este libro documenta los usos de la flora nativa, basándose en las experiencias y el conocimiento tradicional de la comunidad. Esta iniciativa sirve como un recurso educativo y contribuye a la preservación del patrimonio cultural.
  - Se proporciona información sobre el proyecto en idiomas culturalmente apropiados o dialectos usados por las comunidades o pueblos indígenas, agregando nombres de lugares tradicionales a los mapas del proyecto, proporcionando resúmenes en audio en el sitio web y abordando los desafíos de acceso a la información.

### 3.6 First Majestic Silver

Opera tres unidades de plata y oro en el país, las cuales son San Dimas y Santa Elena en Sonora y La Encantada en el estado de Coahuila. Es una empresa que busca alinear todas sus unidades mineras a los principios de sostenibilidad por ello ha trabajado en actividades en el **sector ambiental** como (*First Majestic Silver, 2024*):

- Calidad del aire
  - Se planta vegetación en las zonas mineras y en los alrededores de las instalaciones de almacenamiento de depósito de jales para ayudar a estabilizar el suelo y reducir el polvo.
- Huella de carbono
  - Las operaciones de Santa Elena y La Encantada ya hicieron la transición del gasóleo al gas natural licuado. Además, la transición a la generación hidroeléctrica, como en la operación de San Dimas, reduce casi por completo las emisiones de gases procedentes del combustible.
- Gestión hídrica
  - En México, los pozos disponen de medidores para controlar la extracción de agua en tiempo real. Estos datos se comunican en tiempo real a CONAGUA.



- En México, todas las operaciones producen jales de apilamiento en seco. Este sistema de filtrado recupera más del 80% del agua que se utiliza en sus procesos. Además, el agua de contacto y las soluciones de infiltración se recogen en un estanque o cisterna de almacenamiento y se bombean de nuevo a la planta de procesamiento para su reutilización.
- El agua vertida proviene de la deshidratación de minas y el agua residual tratada, se reporta ante CONAGUA y recibe un tratamiento de clarificación para reducir la carga de sedimentos antes de su vertido a las aguas superficiales adyacentes a cada mina. Cuando es necesario, también se efectúa un ajuste del pH antes del vertido. Es importante recalcar que el agua vertida debe cumplir con los requisitos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (*SEMARNAT, 2022*); por ello es necesario que tanto CONAGUA como la empresa colaboren mutuamente para verificar la calidad del agua vertida en laboratorios certificados.
- Aproximadamente el 80% del agua procedente de la deshidratación de minas en las operaciones en México no se utiliza para las actividades comerciales y, por lo tanto, CONAGUA la reasigna para otros usos. En este sentido se deben considerar dos aspectos, el primero de ellos es que el término de “deshidratación de minas” hace referencia al agua de laboreo, es decir, la extracción y bombeo del recurso en las etapas tanto de exploración como de explotación; como segundo aspecto debe de tenerse en cuenta que al existir una reasignación del recurso para otros fines este debe cumplir con la NOM-127-SSA1-2021 que establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano, así como los tratamientos de potabilización que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados (*SSA, 2021*), además tanto la empresa como CONAGUA deben atender colaborativamente el control de calidad que requiere el recurso.
- La unidad Santa Elena cuenta con dos concesiones, al tener circuitos cerrados de agua, cada año se donan 48,000 m<sup>3</sup> de la concesión de agua a grupos locales de propietarios de tierras o ejidos, lo que permite a otros usuarios extraer agua para usos ganaderos, agrícolas y de regadío.
- La empresa apoyó a un agricultor de ajo del Río Sonora, en un proyecto piloto de irrigación, el cual incluyó el establecimiento de riego por goteo para apoyar el cultivo. Los resultados obtenidos fueron que se pudo cosechar 20 toneladas de ajo en una hectárea de tierra, lo que supuso una mejora del 33% respecto a la cosecha habitual de 15 toneladas. También existió una reducción del 80% en el consumo de agua, lo que supone un beneficio importante en una región con tanta escasez de agua.

En el presente apartado no se desarrollan de manera específica las acciones que se han realizado en el sector social, ya que estos guardan una estrecha relación con las prácticas



empresariales previamente descritas y por ello, se busca evitar redundancias y mantener coherencia en el análisis.

### 3.7 Torex Gold Resources

Opera el complejo minero Morelos en Guerrero, México. Este complejo incluye las minas El Limón Guajes (ELG) a cielo abierto y subterránea, y el proyecto Media Luna. En su búsqueda por alinearse con los estándares mundiales de sostenibilidad en minería ha realizado acciones en el **aspecto social** como las que se mencionan a continuación (*Torex Gold Resources, 2025*):

- Diversidad, equidad e inclusión
  - Se publicó el libro “Mujeres Mineras Mexicanas”, el cual presenta un compendio de experiencias personales, reflexionando sobre desafíos como el tiempo alejado de la familia, navegar en un sector dominado por hombres, y equilibrar roles como madres, esposas y profesionales. El libro también enfatiza la solidaridad y el apoyo entre las mujeres en la minería, con el objetivo de resaltar sus contribuciones y dismantelar estereotipos.
- Bienestar laboral
  - LifeBand, que utiliza electroencefalografía (EEG) y tecnología Bluetooth para transmitir de manera inalámbrica el estado de fatiga de los usuarios para apoyar la intervención antes de que ocurran incidentes no deseados relacionados con la fatiga.

La sostenibilidad en el sector minero implica además un enfoque en el **aspecto ambiental**; la empresa Torex Gold Resources ha implementado acciones como (*Torex Gold Resources, 2025*):

- Huella de carbono
  - En el Proyecto Media Luna, está en proceso de instalar un sistema de comunicación inalámbrica subterránea para habilitar iniciativas planificadas de ahorro de energía, como la ventilación bajo demanda, lo que ayudará a reducir el consumo energético durante la vida de la mina.
  - Finalización del túnel Guajes, de siete kilómetros de largo, que conecta el Complejo ELG en el lado norte de la Propiedad Morelos con el Proyecto Media Luna en el lado sur. Este túnel, que pasa por debajo del río Balsas, transporta mineral a la planta a través de un transportador aéreo, lo que elimina la necesidad de camiones de acarreo, reduciendo así significativamente el consumo de diésel.
  - Implementación del sistema RopeCon© para transportar mineral desde las minas a cielo abierto hasta las instalaciones de procesamiento, a través de una caída vertical de 400 metros. Este sistema es un generador neto de electricidad, produciendo más energía de la que consume. En 2024, regeneró y reutilizó 1,690 megavatios hora de energía, eliminando su propia necesidad de energía eléctrica externa.



- 
- Biodiversidad y uso de suelo
    - En enero de 2025, se firmó un acuerdo de coordinación entre la Compañía y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMAREN). El acuerdo está diseñado para apoyar la restauración de ecosistemas en la parte norte del estado de Guerrero que han sido impactados por incendios forestales.

El análisis de los informes de sostenibilidad anteriores muestra que, la industria minera ha avanzado en la incorporación de prácticas responsables en ámbitos sociales, ambientales y de gobernanza, sin embargo, hay desafíos importantes para garantizar un desarrollo totalmente sostenible y equilibrado. Las acciones reportadas en los mismos reflejan un esfuerzo por alinearse con estándares internacionales y responder a las expectativas de la sociedad, pero al mismo tiempo dejan entrever limitaciones y áreas de mejora, especialmente en la transparencia de resultados, la medición del impacto real y la consistencia en el cumplimiento de los compromisos adquiridos. Esto abre el cuestionamiento sobre cómo se ha construido el conocimiento en torno a la sostenibilidad minera en México y qué áreas de mejora subsisten en la literatura y en la práctica; de ahí la importancia de desarrollar el siguiente apartado para comprender las contribuciones académicas y tecnológicas que buscan sobrellevar estos desafíos.



---

## CAPÍTULO 4

### ESTADO DEL ARTE Y RETOS FUTUROS

En la actualidad, el sector minero en México se enfrenta a la necesidad de equilibrar su papel como motor económico con una operación socialmente responsable y ambientalmente sostenible. Partiendo del capítulo anterior queda evidenciado los avances que ha tenido la industria minera en materia de gestión ambiental, inclusión social, seguridad laboral, eficiencia energética, relación con las comunidades y gobernanza. Si bien las acciones realizadas son relevantes, no garantizan por sí mismas la consolidación de una industria plenamente sostenible, ya que, presentan disparidades en el enfoque, la profundidad de la información, la transparencia en la rendición de cuentas y los indicadores que se han establecido para evaluar la efectividad de las acciones y su seguimiento, con ello queda demostrada la brecha existente entre el cumplimiento normativo y la transformación estructural que exige un desarrollo realmente sostenible.

En este contexto, resulta de vital importancia revisar el capítulo que se desarrolla a continuación para identificar cómo ha evolucionado el conocimiento técnico y académico en torno a la sostenibilidad minera, así como los principales desafíos que persisten. Esta revisión permitirá analizar los temas de vanguardia y reconocer los vacíos que subsisten en la práctica, abriendo camino a una reflexión crítica sobre los retos futuros que enfrenta la minería mexicana en su transición hacia un modelo más responsable y resiliente.

#### **4.1 Síntesis del estado actual del sector minero mexicano**

La minería en México continúa siendo una de las actividades económicas más relevantes, no solo por su contribución en el PIB nacional y a las exportaciones, sino también por la presencia territorial que tiene en las diversas regiones con escasas alternativas de desarrollo económico. En los últimos años, gracias a los estándares internacionales, regulaciones más estrictas y presión social el sector ha avanzado en la adopción de prácticas más amigables en sentido social, ambiental y económico. Las medianas y grandes empresas del sector han comenzado a incorporar acciones como las que se observan en la Figura 4.1.



Figura 4. 1. Acciones implementadas en la industria minera mexicana. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, estos esfuerzos coexisten con desafíos persistentes como la desigualdad en la distribución de beneficios, conflictos socioambientales y rezagos tecnológicos en medianas y grandes operaciones. La finalidad de esta síntesis es ofrecer una visión general del estado actual del sector minero en México, analizando sus principales avances y abriendo camino hacia las limitaciones y áreas de mejora para buscar alineación con los estándares de sostenibilidad internacional.



---

## 4.2 Limitaciones y áreas de mejora en el sector minero mexicano

El sector minero en México ha logrado avances en materia de sostenibilidad, innovación tecnológica y responsabilidad social; sin embargo, persisten diversas limitaciones que la obstaculizan como una industria plenamente responsable y competitiva a nivel internacional. Estas limitaciones abarcan desde la concepción reduccionista de la sostenibilidad como un enfoque predominantemente ambiental, retos técnicos como la gestión integral de jales, el aprovechamiento de fuentes alternas de agua y la reducción de la huella de carbono, hasta situaciones sociales y de gobernanza, como la transparencia en la rendición de cuentas.

Asimismo, los vacíos que se mantienen en el marco regulatorio nacional, la falta de estandarización en la implementación de prácticas sostenibles entre operaciones de distinta escala e índole y la necesidad de incorporar a nivel nacional principios de economía circular, reflejan áreas de mejora. A continuación, se abordarán aquellos aspectos que representan retos significativos y requieren atención prioritaria, al analizarlos se podrán identificar las acciones estratégicas que permitan a la minería mexicana transitar hacia un modelo verdaderamente sostenible.

## 4.3 Gestión de jales

### 4.3.1. Panorama actual del almacenamiento de jales

El método tradicional más usado para la disposición de los jales es en almacenamientos convencionales en los que las colas del proceso de beneficio se depositan mezcladas con agua, para que una vez dentro del depósito el agua se recupere; además se encuentran ubicados en la superficie y tanto sus etapas de construcción como de operación ocurren de manera simultánea, sin embargo, como toda obra ingenieril está sujeta a probabilidades de falla que desencadenarían consecuencias ambientales y sociales graves. Por tal motivo, el sector minero actualmente ha desarrollado otros métodos de almacenamiento para los jales que las empresas han comenzado a adoptar, como los jales espesados, los jales en pasta para relleno de obras subterráneas y tajos y los jales filtrados; cabe recalcar que algunas empresas se han inclinado por tales métodos, sin embargo, la mayoría sigue optando por métodos convencionales.

La finalidad de estas prácticas es reducir los riesgos ambientales y sociales asociados al manejo y almacenamiento de residuos mineros como la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, la generación de drenaje ácido o el colapso de los depósitos por fallas o por consecuencias derivadas del cambio climático.

En el caso de México, su aplicación cobra especial relevancia debido a la ocurrencia de accidentes pasados, la presión social y ambiental sobre el sector minero, la necesidad de las empresas de incorporarse a un marco de sostenibilidad y un marco regulatorio a través de normas como la NOM-141-SEMARNAT-2003 (*SEMARNAT, 2004*), la cual constituye uno



de los principales instrumentos en materia ambiental aplicable a presas de jales, en ella se establece el procedimiento para su caracterización, preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación. Si bien, la sola existencia y puesta en marcha de la misma representa un avance en materia ambiental enfocada a los residuos mineros, su alcance resulta limitado frente a los riesgos actuales asociados a la gestión de jales, ya que presenta vacíos en aspectos clave como la obligatoriedad de desempeño y monitoreo postcierre, actualización acorde al cambio climático y evaluación de riesgos en condiciones extremas.

Otro instrumento de orientación en la gestión de jales es la NOM-157-SEMARNAT-2009 (*SEMARNAT, 2011*), que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Esta norma por sí sola representa un avance orientado al control y disposición, pero aún no impulsa suficientemente la valorización de residuos, reincorporación de materiales al ciclo productivo y trazabilidad de pasivos. Bajo este contexto ambas normas constituyen los principales referentes para la gestión de residuos mineros, respondiendo a una lógica de control y cumplimiento en la que se desconocen las modificaciones u alteraciones que se generan al entorno; debe tenerse claro que la vigilancia y actualización permitirían la transición hacia una gestión de jales proactiva, preventiva y sostenible de largo plazo.

Además, las empresas establecidas en México han adoptado instrumentos de orientación derivados de estándares internacionales como los lineamientos del ICMM (*ICMM, 2025*) (International Council on Mining and Metals), Australian Government (*Australian Government, 2016*) (Tailings Management) y The Mining Association of Canada (*MAC, 2021*) (Developing an Operation, Maintenance, and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities), que promueven una gestión más segura y sostenible de estos residuos.

En México se ha trabajado sobre la gestión de residuos mineros, algunas empresas han hecho construcciones más seguras y han invertido en instrumentación y controles para monitorear y evitar o mitigar posibles fallas en la cortina del depósito de jales, cabe destacar que con estas acciones si bien se previene, no se garantiza el hecho de que al finalizar la vida operativa del depósito este no sea un foco latente que afecte el medio sobre el que se establece, si realmente se aspira a una industria sostenible debe de existir un enfoque coordinado de todas las unidades para considerar en primera instancia y como almacenamiento ideal, el uso de los jales como relleno de obras subterráneas y tajos agotados dependiendo el tipo de operación que tengan; de no contar con inversión requerida o las condiciones para llevar a cabo este proceso podría optarse por espesar, empastar o filtrar los jales, reduciendo su contenido en agua y recuperando la misma para recircularla en el proceso de beneficio. Estas alternativas resultan tener una visión realmente sostenible, sin embargo, considerando que muchas operaciones no cuentan con el capital necesario para esta transición se puede elegir un depósito de jales convencional, aguas abajo con enrocamiento y monitoreo, en el cual se



garantice además un canal de derivación en las zonas con más precipitaciones al año, un cierre progresivo y una rehabilitación post-cierre.

Las acciones realizadas por las empresas se encuentran reportadas en sus informes de sostenibilidad, pero no se reportan datos contundentes que permitan evaluar si realmente estamos avanzando en términos de sostenibilidad como:

- ¿Qué volumen del total producido de jales se introduce de manera segura como relleno de minas?
- ¿Cuántos depósitos han migrado de lo convencional a un método alternativo?
- ¿Qué tanta superficie de la total con la que cuenta la unidad se ha conservado por no tener almacenamientos permanentes en superficie?
- ¿Qué tratamientos de valorización se están desarrollando en colaboración con la academia en México?

Esta falta de indicadores evidencia que, aunque existen avances reportados, aún persiste un vacío en la medición del impacto real de las prácticas. Además, la industria se enfrenta con limitaciones como:

- Los costos iniciales que suelen ser más elevados que en los métodos convencionales.
- La necesidad de personal especializado.
- La limitada capacidad de inversión por parte de algunas unidades para comprar o adquirir tecnología de punta.
- El diálogo limitado entre empresas del sector y entidades académicas para realizar investigación.

Cabe destacar que, a pesar de ello, transitar a estas alternativas ofrece beneficios como una menor exposición a riesgos ambientales, mayor confianza y aceptación de las comunidades aledañas y la posibilidad de integrar los jales a los principios de sostenibilidad, haciendo evidente que avanzar en este rubro representa además una ventaja competitiva a largo plazo para la minería mexicana.

#### **4.3.2 Jales como relleno de minas subterráneas y tajos**

El sector minero mexicana en su búsqueda de lograr un cambio puede apoyarse de casos de estudio o de éxito de aquellos trabajos desarrollados por otras naciones que destacan alternativas como la que reportan *Cacciautolo y Marinovic (2023)* que en su artículo analizan el aprovechamiento de jales como material de relleno subterráneo el cual ha demostrado resultados positivos en diversas operaciones mineras de la región andina del Perú (Figura 4.2), el uso de jales en pasta como relleno constituye una solución de “minería verde”, ya que contribuye a la seguridad estructural de las minas y a la vez limita los impactos socioambientales asociados al almacenamiento convencional. Sin embargo, de acuerdo con *Fitton Tailings Consultants (2024)* es una solución parcial porque generalmente sólo se almacena un pequeño porcentaje del total de jales y lo mejor es optar por depósitos de jales



espesados, filtrados o tubos geotextiles. Por su parte *Salman Siddique (2020)* realizó una evaluación del relleno con jales de molibdeno cementados con mortero de la mina Kumsung en Corea del Sur, un caso similar es el que describen *Wang et al. (2023)* que estudiaron la viabilidad de usar partículas finas tomadas de los jales de la mina de oro Shaling, China como agregado para el relleno, demostrando que se incrementa la resistencia del relleno y a su vez se tiene un piso de trabajo estable.



*Figura 4. 2. Relleno con jales de obra subterránea en mina de Perú. Fuente: Experiences of Underground Mine Backfilling Using Mine Tailings Developed in the Andean Region of Peru: A Green Mining Solution to Reduce Socio-Environmental Impacts (Cacciattolo & Marinovic, 2023).*

Además de las experiencias ya mencionadas, se tiene registro de otros casos de éxito como la unidad Cozamin en México que desde 2023 tiene en operación una planta de relleno (Figura 4.3), en la cual se recupera el 90% de agua, una porción de los jales se almacena en un depósito y la otra parte se mezcla con cemento y se introduce como relleno de obras subterráneas (*Capstone Gold, 2024*).



Figura 4. 3. Planta de tratamiento de jales para relleno de obras subterráneas. Tomada de Sustainability Report Capstone Gold 2023 (Capstone Gold, 2024).

De acuerdo a *Wu et al. (2015)* en minas como Chambishi, Zambia se realiza un relleno de jales en pasta con baja adición de cemento y con ello se ha prolongado la vida operativa del yacimiento. Finalmente, un caso más de éxito es el que documentan *Oke et al. (2021)* sobre el relleno de pasta cementada en la operación Red Lake en Canadá, en el que se optimiza el uso de aglutinante y el proceso de colocación y la implementación de instrumentación para evaluar si el relleno se puede verter de forma continua (Figura 4.4).



Figura 4. 4. Instrumentación colocada al tapón del relleno para evaluar la continuidad del vertido. Fuente: Paste backfill continuous pour: Red Lake operations case study (Oke et al., 2021).



---

El uso de jales ya sean espesados o en pasta para relleno de obras subterráneas ha demostrado ser una alternativa eficaz para reducir la huella ambiental, pero no representa un avance si se considera el volumen de jales requerido para rellenar con el volumen producido, ya que, generalmente es menor, además de que enfrenta retos como la escalabilidad y la adaptación a diferentes contextos geológicos.

Actualmente, en México se ha planteado la regularización de la minería a cielo abierto, por tal motivo, las empresas han comenzado a analizar e implementar acciones que les permitan mitigar las afectaciones ambientales y visuales al final de la vida operativa del proyecto, esto específicamente enfocado al relleno de tajos. Se estima que la producción mundial de jales será de 14 mil millones de toneladas por año, esto ha llevado a que los proyectos contemplen como alternativa viable el relleno con residuos procedentes del proceso de beneficio; diversos estudios han explorado el potencial de los jales como material de relleno de tajos, entre ellos se pueden encontrar el estudio de *Tebogo y Thandiwe (2021)* que documentan un caso de estudio en minas de Sudáfrica mediante la implementación de jales auríferos no radioactivos y escoria granulada de alto horno como relleno mediante una activación alcalina que no genera subproductos secundarios y debido a sus condiciones sirve como soporte, logrando reducir los riesgos geológicos. *Chen et al. (2023)* en su estudio sobre la influencia del relleno de minas a cielo abierto evalúan el impacto de las condiciones del campo de filtración y la altura del relleno en la estabilidad de las pendientes utilizando el tajo abierto específico en la provincia de Anhui, China. En la misma unidad *Zhang et al. (2021)* analizan el comportamiento del relleno de pasta cementada mediante simulaciones numéricas y experimentos en un modelo físico consiguiendo la optimización de los parámetros mecánicos del relleno. Por su parte, *Basanta et al. (2020)* en su artículo mencionan las propiedades físicas del relleno en pasta cementado, describiendo los procesos de preparación y colocación del mismo, así como las condiciones físicas con las que deben cumplir para lograr estabilidad y seguridad en las operaciones mineras (Figura 4.5).



Figura 4. 5. Mezcla y vertido de los jales como pasta cementada en tajo. Fuente: *Properties of cemented rockfill used in an open pit mine* (Basanta et al., 2020).

Lo anterior queda sustentado por la investigación realizada por *Chen et al. (2022)* en la que demuestran que el relleno de tajos ha eliminado peligros geológicos de las pendientes altas y empinadas, creando condiciones para la restauración ecológica e incrementando la seguridad de taludes a 1.5 en factor de seguridad y no muestra variaciones en cuanto a contenidos metálicos.

Conociendo estos casos de estudio, es innegable la existencia de casos de éxito de relleno de tajos como sucede con *Agnico Eagle (2025)* que en su reporte dan a conocer que en las operaciones de Meadowbank, Canadá desde 2019 se utilizan los tajos Goose y A para la disposición de jales, reduciendo los pasivos ambientales de su operación y a su vez de la operación de Amaroq, Groenlandia; además la Figura 4.6 muestra el mismo método de disposición en la unidad Pinos Altos, México.



Figura 4. 6. Relleno de tajo unidad Pinos Altos. Fuente: *Responsible Tailings Management* (Agnico Eagle, 2025).

Algunas unidades como Langer Heinrich, Namibia hacen una disposición completa de jales en el tajo durante la vida útil de la mina, incorporando en el diseño las condiciones hidrológicas (Figura 4.7) y colocando sistemas de decantación y drenaje para la recuperación de agua (Hore & Luppnow, 2015).



Figura 4. 7. Tajo minado y construcción parcial del paleocanal. Fuente: *In-pit Tailings Disposal at Langer Heinrich – Tailings Storage Facilities in a Unique Hydrogeological Setting* (Hore & Luppnow, 2015).



En 2019 un trabajo técnico destaca que en la unidad El Gallo ubicada en México existe la posibilidad de realizar reprocesamiento del mineral en las pilas de lixiviación y los jales una vez libres de cualquier tóxico almacenarlos en el tajo Samaniego, logrando con ello una maximización en la recuperación del agua y la consolidación de los jales y a su vez, un cierre exitoso del tajo (*Williamson, 2019*).

Lo anterior mencionado representa una alternativa favorable para la disposición final de los residuos mineros, además de contribuir y optimizar el aprovechamiento del espacio dentro de los tajos, disminuyendo la huella superficial de los depósitos convencionales.

#### **4.3.3 Depósitos de jales espesados, en pasta y filtrados**

Como segunda alternativa, la industria minera ha desarrollado depósitos de jales espesados, en pasta y filtrados, considerados hoy en día como prácticas más seguras y sostenibles frente al almacenamiento convencional en presas.

En los depósitos de jales espesados se remueven dos terceras partes del agua contenida en la pulpa. Se transportan como lodo y se depositan desde un punto central distribuyéndose en forma de cono con una pendiente de 2 a 6% y un contenido en sólidos del 45 al 60%, existe evidencia sobre ellos como *Agnico Eagle (2025)* que reporta la puesta en marcha y operación de un depósito de jales espesados sobre un sitio abandonado en la unidad Canadian Malartic en Canadá (Figura 4.8).



Figura 4. 8. Depósito de jales espesados en Canadian Malartic. Fuente: *Responsible Tailings Management (Agnico Eagle, 2025)*.

De acuerdo con *Cacciuttolo y Marinovic (2022)* en la planta de jales Esperanza ubicada en Chile los jales se espesan los mismos hasta alcanzar un 67% de sólidos, fue puesta en marcha desde 2010 y se estima que almacenará un máximo de 750 millones de toneladas de jales provenientes del beneficio de cobre (Figura 4.9).



Figura 4. 9. Disposición de jales espesados en unidad Esperanza. Fuente: *Esperanza Thickened Tailings Project* (Cacciuttolo & Marinovic, 2022).

Por otro lado, los depósitos de jales en pasta son aquellos que tienen un mayor contenido en sólidos 65 a 75%, liberan una mínima cantidad de agua y se transporta mediante bombas de desplazamiento positivo, siendo depositados de la misma forma que los jales espesados. Se conocen casos que han aplicado esta técnica; *Cacciuttolo y Marinovic (2022)* describen que la operación Las Cenizas en Chile reporta que del 100% de jales producidos, el 40% se almacena como jal en pasta en la superficie (Figura 4.10) y que se sigue estudiando la posibilidad de maximizar la recuperación de agua.



Figura 4. 10. Disposición de jales en pasta de unidad Las Cenizas, Chile. Fuente: *Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance* (Cacciuttolo & Marinovic, 2022).

La unidad Alhué ubicada en Chile optó por implementar un depósito de jales en pasta con una pendiente de 3% (Figura 4.11) que permite aumentar la recuperación de agua y reutilizarla en el proceso, los jales se transportan a una planta de tratamiento en la que el contenido de sólidos aumenta al 70%, dicho depósito se encuentra en operación desde 2015 (Cacciuttolo & Marinovic, 2022).



Figura 4. 11. Depósito de jales en pasta de la unidad Alhué, Chile. Fuente: *Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance* (Cacciuttolo & Marinovic, 2022).

Finalmente, los depósitos de jales filtrados o secos tienen un contenido de humedad menor al 20% y un contenido de sólidos del 80 a 90%, se manejan como un material granular que puede apilarse y transportarse mediante bandas transportadoras o camiones. Existen diversos casos conocidos en los que se aplica este método, uno de ellos se encuentra en la unidad Meliadine ubicada en Canadá, su mezcla consiste en una relación sólido-líquido con contenido de sólidos superior al 75% (Figura 4.12) (Agnico Eagle, 2025).



Figura 4. 12. Depósito de jales filtrados de unidad Meliadine. Fuente: *Responsible Tailings Management* (Agnico Eagle, 2025).



Otro caso de éxito destacable es la disposición del jal seco de la unidad La Encantada en México (Figura 4.13), que utiliza filtros prensa para recuperar aproximadamente el 90% del agua generando con ello mayor estabilidad geomecánica del depósito (*First Majestic Silver, 2024*). Finalmente, es importante añadir que se encuentra en etapa de ampliación el depósito de apilamiento de jales en seco en la Mina San Martín en Querétaro, sin embargo, se desconoce si ya se encuentra en marcha dicha ampliación (*Starcore International Mines Ltd, 2024*).



Figura 4. 13. Disposición de jal filtrado en Mina La Encantada. Fuente: Jales Espesados y Jales en Pasta (*First Majestic Silver, 2024*).

Los métodos descritos anteriormente permiten reducir significativamente el consumo de agua, mejorar la estabilidad física y química de los depósitos y minimizar riesgos asociados a fallas estructurales. Además, su implementación responde tanto a los lineamientos internacionales de gestión responsable de jales como a la necesidad de adaptarse a regulaciones más estrictas y a la creciente demanda social de operaciones más transparentes y seguras.

#### **4.3.4 Depósitos convencionales**

A pesar de los avances en el desarrollo de técnicas alternativas, los depósitos convencionales de jales continúan siendo la forma más utilizada de almacenamiento a nivel mundial, particularmente en países donde las condiciones económicas, técnicas y regulatorias limitan la adopción de tecnologías más modernas. Estos sistemas si bien son viables, desde un enfoque de sostenibilidad representan una opción que debe ser modificada debido a las implicaciones que conlleva, por tal motivo, en la actualidad debería ser considerada como una medida de almacenamiento siempre que en su diseño, construcción y puesta en marcha se consideren todos los aspectos que sugieren los lineamientos internacionales.

El método sugerido para un depósito convencional es una construcción aguas abajo con enrocamiento (Figura 4.14), ya que, al ser aguas abajo implica que cada etapa de la presa se apoya sobre la parte más estable ya construida y al usar un enrocamiento se aumenta la estabilidad del talud permitiendo un buen drenaje interno que permita la recuperación de agua y control en el nivel freático, aunque es un método que se recomienda para operaciones ubicadas en zonas sísmicas, de larga vida operativa o cercanas a poblaciones y ecosistemas sensibles, debería ser considerada como la primer opción si se opta por un depósito convencional.

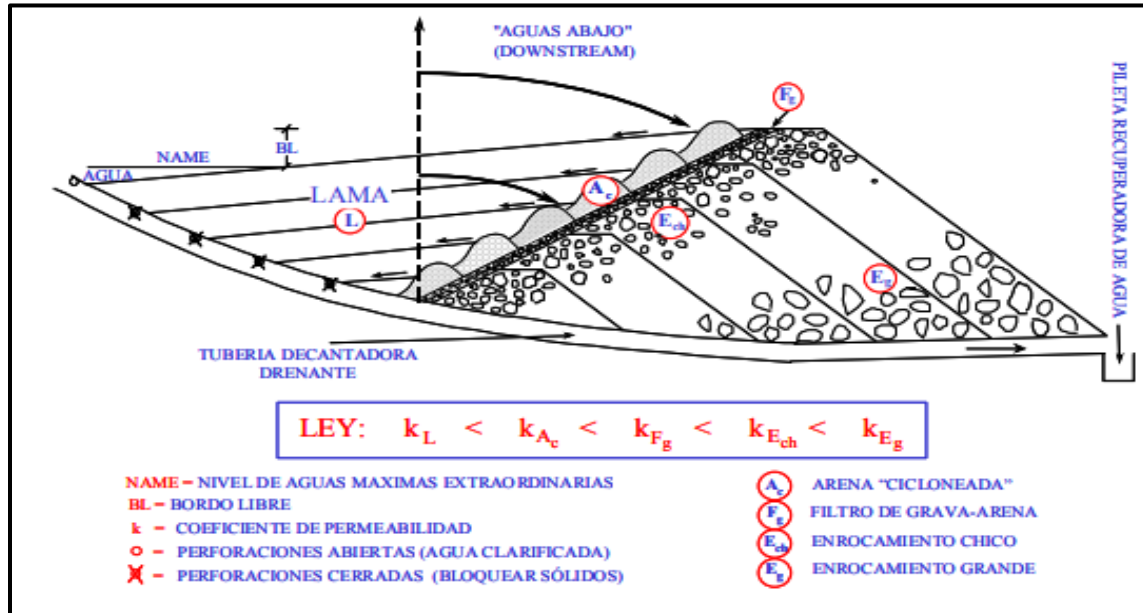


Figura 4. 14. Esquema del método constructivo aguas abajo con enrocamiento. Fuente: NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004).

Lo presentado son casos de estudio y éxito alrededor del mundo, México podría partir de ellos como ejemplo para rediseñar, planear e implementar medidas que le permitan dirigirse hacia el almacenamiento ideal o en su debido caso seguir el orden que se presentó anteriormente de acuerdo a las características que existan en cada una de las operaciones; así se podría modificar el marco regulatorio con un enfoque actual que no se limite y que pueda ser comprendido por las partes interesadas para impulsar la transición hacia prácticas más responsables y que vayan de la mano con los lineamientos internacionales.

Si bien estos métodos tienen un enfoque con mira hacia la sostenibilidad, debe de visualizarse la posible existencia de un menor volumen de jales en superficie que más allá de quedar como pasivo ambiental, podría ser valorizado para lograr su incorporación a una economía circular.

#### 4.3.5 Valorización y aprovechamiento de residuos mineros

En los últimos años, la industria minera ha evolucionado hacia un enfoque más sostenible que busca no solo reducir los impactos ambientales, sino también transformar los residuos en oportunidades de valor. En este contexto surge la valorización de los jales, que se refiere

al aprovechamiento de los componentes minerales, metálicos o no metálicos contenidos en ellos, así como su posible reutilización en aplicaciones industriales, de construcción o energéticas.

Más allá de la recuperación de metales, los jales también se han utilizado para fabricar materiales de construcción, rellenos de obra civil, suelos artificiales, agregados para pavimentos y como insumos en procesos químicos o energéticos. Estos usos alternativos representan una doble ventaja, en primer lugar, disminuyen la presión sobre los depósitos de residuos que se dejan en la superficie y en segundo lugar generan nuevas cadenas de valor económico y social. Cabe destacar que en México este enfoque ya tiene un reconocimiento normativo, pues la NOM-157-SEMARNAT-2009 establece además de lineamientos para la disposición y control, la valorización de jales como parte de una estrategia integral de gestión de residuos mineros, dando apertura a su aprovechamiento en distintos sectores productivos que requieren estudio e investigación para evaluar su potencial uso.

En la actualidad, existen casos documentados a nivel mundial que muestran que la valorización de jales ya no es solo una posibilidad teórica, sino una práctica que ya se está aplicando con resultados alentadores como *Vilaça et al. (2022)* que en su análisis evalúan la factibilidad y puesta en marcha para integrar a la economía circular los jales de hierro (IoT) provenientes del Cuadrángulo Ferroso en Minas Gerais, Brasil; los jales de hierro requieren un tratamiento previo y posteriormente se usan como materia prima en la industria del pavimento, cerámica, cemento y hormigón (Figura 4.15).

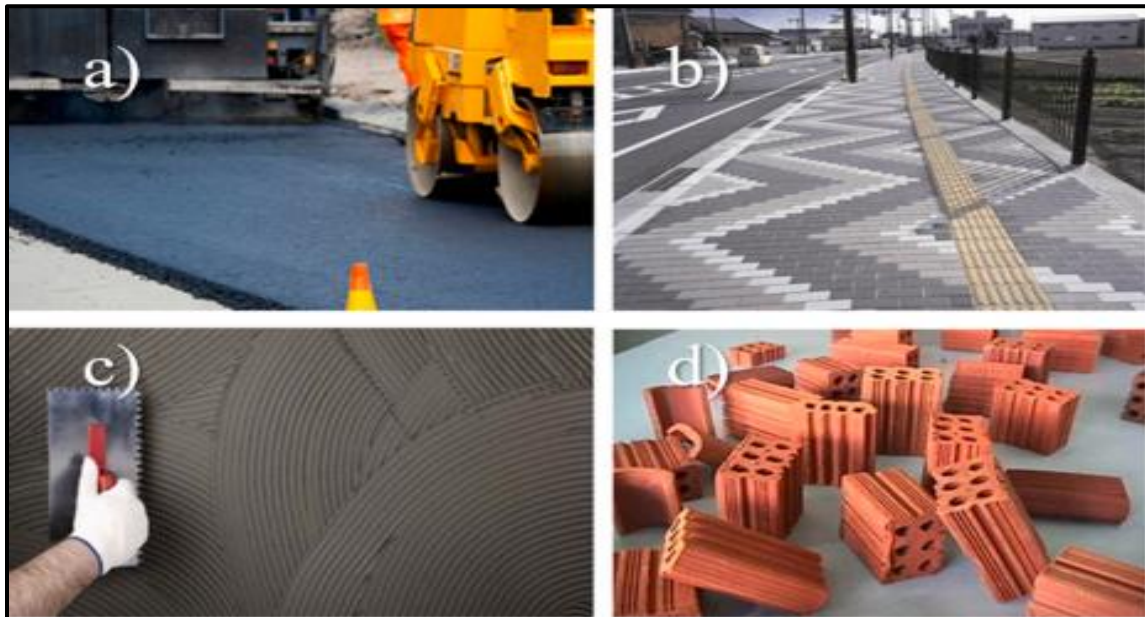


Figura 4. 15. Desarrollo de productos con jales de hierro: a) Pavimento asfáltico; b) Adoquines; c) Agregado de mortero fino; d) Bloques cerámicos. Fuente: Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective (Vilaça et al., 2022).

De acuerdo con *Yao et al. (2015)* en países como China, se han generado enormes cantidades de jales de hierro por ello surgió la necesidad de usarlos para el desarrollo de baldosas

vitrocerámicas con propiedades de absorción de microondas que sean adecuadas para aplicaciones de construcción residencial, se cumple este objetivo a través de un tratamiento térmico de enfriamiento rápido. Asimismo, *Pereira et al. (2019)* en su análisis llevan a cabo la producción de ladrillos cemento-residuo IoT (Figura 4.16) en una relación 1:9, los resultados indican que al añadir residuos mineros de hierro incrementa la densidad de los ladrillos y con ello quedó comprobado que hasta 40% de los residuos existentes en Brasil pueden incorporarse a la generación de ladrillos para construcciones civiles.



Figura 4. 16. Ladrillo conformado por cemento y jales IoT. Fuente: *Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste (Pereira et al., 2019)*

Un caso similar es el que presentan *Yoplac et al. (2024)* en él evaluaron el uso de jales de oro de la unidad Marañón en Perú para recuperar oro y producir ladrillos (Figura 4.17); realizar esta transición ofrece una ventaja al reducir el volumen de jales, además de productos ornamentales fabricados con cemento y silicato de sodio a temperatura ambiente.



Figura 4. 17. Ladrillos fabricados a partir de jales de oro sin tóxicos. Fuente: *Aplicación de la Economía Circular en la Industria Metalúrgica Minera para la Recuperación de oro y la Producción de Ladrillos a partir de Relaves (Yoplac et al., 2024).*

Existe un caso histórico conocido como Roan Tailings Reclamation que básicamente consistió en un proyecto de valorización de jales en la zona de Kolwezi en África iniciado en 2004 con el objetivo de recuperar cobre y cobalto de depósitos existentes desde 1950, en 2009 la práctica fue suspendida (Figura 4.18) y hasta 2018 se reanudaron operaciones a cargo de Metalkol, superando sus metas de producción de aproximadamente 20,718 Ton de cobalto y 94,707 Ton de cobre, contribuyendo con ello a la demanda global de estos minerales críticos (Metalkol RTR, 2020).



Figura 4. 18. Construcción del proyecto de recuperación de jales de cobre y cobalto, con un avance de 65%. Fuente: First Quantum Suspend Construction at Kolwezi (Metalkol RTR, 2020).

Por otro lado, *Uzarowicz et al. (2020)* en su análisis de perfiles de suelos tecnogénicos (suelo creado por el ser humano de forma intencionada a partir de la mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos) formados a partir de jales ferríferos y lodos postflotación de los depósitos abandonados de una mina en Polonia, en este se evalúan propiedades físico-químicas y potencial para vegetación. A su vez, *Wu et al. (2023)* en su estudio hablan de una tecnología enfocada y exitosa del uso de procesos microbianos y rizosfera para impulsar progresivamente la formación y el desarrollo de agregados en jales de hierro para lograr una rehabilitación resiliente. Uno de los ejemplos más claros es la rehabilitación de minas As Pontes en España, mediante la aplicación de esta tecnología se modificaron las características físico-químicas de los sustratos y se recuperó la tierra vegetal (Figura 4.18 y 4.19, respectivamente) (*Martorell, 2022*).



Figura 4. 19. Minas de As Pontes en su etapa final de producción. Fuente: *Que es el tecnosol* (Martorell, 2022).



Figura 4. 20. Aplicación de suelos tecnogénicos y revegetación de minas de As Pontes. Fuente: *Que es el tecnosol* (Martorell, 2022).



Lo anterior son experiencias que demuestran que es viable transformar un residuo minero en un recurso útil y no tóxico. Analizar estos ejemplos resulta fundamental para identificar los factores que han permitido su implementación y con ello, poderlos adaptar a un contexto minero mexicano con el objetivo de reducir o eliminar los pasivos ambientales y generar beneficios económicos.

#### ***4.3.6 Análisis sobre la viabilidad en gestión integral de jales***

Finalmente, en la NOM-157-SEMARNAT-2009 se describen seis procesos bajo los cuales se busca lograr la prevención, minimización y valorización de los residuos mineros, sin embargo, su viabilidad depende en gran medida del tipo de operación, la escala productiva, la capacidad técnica, la etapa en la que se encuentre la operación y el capital disponible para llevarlas a cabo. Si bien la norma ya incluye principios sobre la gestión integral, su puesta en marcha presenta inconsistencias entre lo normativamente deseable y lo operativamente factible. A continuación, se analiza cada uno de los procesos desde una perspectiva integral.

- a) Reducción en la fuente: Su aplicación es parcialmente viable, ya que, en minería reducir la generación de residuos desde la fuente no siempre es posible, ya que el material que se almacena en los depósitos se encuentra condicionado principalmente por la ley del mineral y las características geológicas del yacimiento. Además, de las mejoras en la eficiencia metalúrgica, reducción en pérdidas en proceso y la falta de investigación sobre alternativas eficientes, rentables y ambientalmente amigables.
- b) Separación: Su aplicación para gestión de jales no es tan viable principalmente por cuestiones características del jal, es decir, el tratamiento que requiere este para separar sus componentes suele representar un costo operativo y metalúrgico mayor y su potencial aún no se estudia completamente.
- c) Valorización: Este proceso representa una de las rutas más prometedoras hacia la incorporación de los jales a la economía circular (recuperación secundaria de metales, uso de jales estabilizados en relleno y materiales de construcción), sin embargo, su implementación aún es limitada por barreras tecnológicas, falta de investigación aplicada y baja vinculación entre industria y academia.
- d) Tratamiento: Su aplicación es técnicamente factible; sin embargo, la puesta en marcha se encuentra condicionada por el costo operativo, la complejidad para lograr estabilización química en el residuo y la disponibilidad de infraestructura.
- e) Almacenamiento: Actualmente es el proceso más consolidado para gestión de jales. Si bien, su implementación es técnicamente viable, su permanencia a largo plazo depende en gran medida del diseño, mantenimiento, cierre y monitoreo postcierre, por lo tanto, no debería considerarse como una solución definitiva, más bien debería ser una forma de contención del residuo.
- f) Disposición final: Este proceso sigue siendo la vía más común para el manejo de residuos mineros debido a su alta viabilidad operativa y menor costo relativo; sin embargo, si se tiene en mira la sostenibilidad minera no representa una alternativa



favorable ya que, se transfieren riesgos a largo plazo y se mantienen pasivos que requieren monitoreo, mantenimiento y control postcierre.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, queda demostrado que la implementación de estos procesos no depende de la solidez normativa, sino de la viabilidad real de cada componente dentro del contexto minero operativo. La factibilidad entre un proceso y otro evidencian que el principal desafío al que se enfrenta el sector actualmente es su capacidad para transitar de una gestión de jales centrada en contención, control y disposición a una orientada en prevención, valorización y aprovechamiento.

#### **4.4 Remediación de acuíferos, aguas superficiales y suelos**

La interacción de la minería con los recursos hídricos es uno de los mayores desafíos de sostenibilidad dentro del sector. La alteración en la calidad y disponibilidad de acuíferos y cuerpos de agua superficiales, derivada de procesos como el drenaje ácido de mina (DAM), la filtración de contaminantes o el uso intensivo del recurso, ha motivado el desarrollo y puesta en marcha de estrategias de remediación orientadas a reducir estas afectaciones.

En México, diversos estudios académicos y monitoreos ambientales han documentado la presencia de drenaje ácido y metales pesados en zonas mineras activas y abandonadas, dejando en evidencia que el fenómeno no es exclusivo de otros países, sino una realidad que requiere atención inmediata. Tal es el estudio realizado por *Romero et al. (2019)* que evaluó los niveles de arsénico y mercurio contenidos en el agua subterránea en cinco comunidades aledañas a la cuenca del río Sonora en México cuatro años después al derrame de solución enriquecida de sulfatos. Hallazgos como este confirman la necesidad de fortalecer las estrategias de manejo preventivo y de tratamiento de agua dentro del sector.

A su vez, la magnitud de este desafío puede observarse en casos documentados a nivel internacional sobre la contaminación de acuíferos y cuerpos de agua superficiales por la actividad minera, tal es el caso estudiado por *Galhardi y Bonnoto, (2016)* sobre el drenaje ácido de mina en aguas superficiales (río Laranjinha y arroyo Ribeirão das Pedras) y subterráneas de un área de minería de carbón en Paraná, Brasil, las cuales presentan valores de pH de 2.94-6.04 con gran presencia de hierro y aluminio. De manera similar *Esteller et al. (2015)* evaluaron el impacto del sitio minero abandonado en Huautla, México, en este se realizó un muestreo en diversas presas y pozos excavados los cuales presentaron concentraciones mayores de As, Fe, Mn, Pb, Cd. Un ejemplo adicional es el que reportan *Sarrazín et al. (2024)* que decidieron simular las concentraciones de Fe, Mn y Al en aguas subterráneas afectadas por el drenaje ácido de los depósitos de Brumandinho (Brasil), demostrando que el acuífero libre presenta concentraciones por encima de los límites máximos permisibles. Un caso recientemente documentado son los estudios realizados en la cuenca del río Sonora en México, los cuales demostraron la presencia de metales pesados en concentraciones preocupantes en dos áreas de la región central de la cuenca, mientras que, el agua de los acuíferos es de buena calidad para el consumo humano (*Acuña et al., 2025*).



A su vez, existen casos donde se han identificado unidades mineras inundadas como consecuencia de procesos mineros mal gestionados, *Wolkersdorfer (2006)* aborda diversos casos de estudio en relación al tema de abandono e inundación de minas, uno de ellos es el de Campos de Antracita del Norte, Pensilvania, EUA. que fue un conjunto de minas importante, pero que tras el abandono se ha incrementado el nivel freático y a su vez el agua se enriqueció de contaminantes generando un nivel alto de drenaje ácido en el área. De manera similar, *Wolkersdorfer (2006)* hace mención de lo ocurrido en el distrito minero de Picher, Oklahoma, EUA en donde se depositaron residuos de pirita y marcasita en áreas previamente minadas, con ello se dio lugar a la generación de drenaje ácido con valores de 4-5 en escala de pH. Un caso más que ejemplifica esta situación es el de la mina Frances, Escocia que tenía vetas de carbón con un contenido hasta de 3% de pirita que representaban un alto potencial de generación de drenaje ácido al incrementar el nivel freático de la unidad (*Wolkersdorfer, 2006*).

Abordar la remediación hídrica no solo es clave para garantizar la viabilidad ambiental de los proyectos, sino también para fortalecer la confianza social y avanzar hacia una gestión integral del agua en el marco de la sostenibilidad minera, esto a través de la implementación de tecnologías de tratamiento, restauración de ecosistemas acuáticos y planes de monitoreo permanente.

Es importante mencionar que la industria minera en México reporta sistemas de tratamiento de agua residual, programas de recirculación de agua de proceso y reducción del consumo de agua fresca, sin embargo, ninguna empresa o asociación reporta casos de tratamiento de acuíferos o cuerpos de agua superficiales. Por tal motivo, es de vital importancia dar a conocer los avances y experiencias internacionales que han tenido éxito, para tomarlos como referencia y punto de partida para fortalecer la transición a la sostenibilidad.

Para la remediación de acuíferos y cuerpos de agua superficiales contaminadas o afectadas por metales existen dos tipos de remediación, el primero es el tratamiento activo que consiste en la mejora de la calidad del agua mediante métodos que requieren aportes continuos de energía artificial y/o reactivos químicos y que generalmente se llevan a cabo a la par del proceso extractivo, entre ellos se encuentra (*Younger et al., 2002*):

- Oxidación, dosificación con álcali y sedimentación (ODAS).
- Sulfuración y biodesalación.
- Sorción e intercambio iónico.
- Procesos de membrana.
- Otros procesos poco factibles (extracción por disolventes, extracción electroquímica, extracción bioquímica y extracción por sulfuro de bario).

Un caso documentado sobre este tratamiento es el que presentan *Qin et al. (2019)* de una región minera ubicada en China que consiste en una dosificación de cal al agua ácida del río, a través de tanques de amortiguamiento en los que se vierte el agregado, esta medida ha

presentado ventajas ya que se ha incrementado el pH y se han eliminado los oligoelementos. A su vez *Delgado et al. (2019)* realizaron un sistema combinado de sustrato alcalino disperso como alternativa para remediar el drenaje ácido del sitio minero Zaruma-Portovelo, Ecuador, el cual funcionó, ya que, el pH se elevó y hubo retención del 80% de Fe, Al, Mn y Cu. Un caso adicional son las obras inundadas de la mina Wheal Jane, Reino Unido para el que se requirió un tratamiento efectivo, en el año 2000 se comenzó a bombear el agua de mina hasta cámaras de prerreacción, donde se mezcló con lodos recirculados, posteriormente se introdujo aire comprimido y se dosificó con lechada de cal para permitir la precipitación de los metales (Figura 4.21), esta agua tratada se envía a un clarificador que elimina partículas y posteriormente se vierte en el río Carnon (*Coal Authority & Mining Remediation Authority, 2020*).

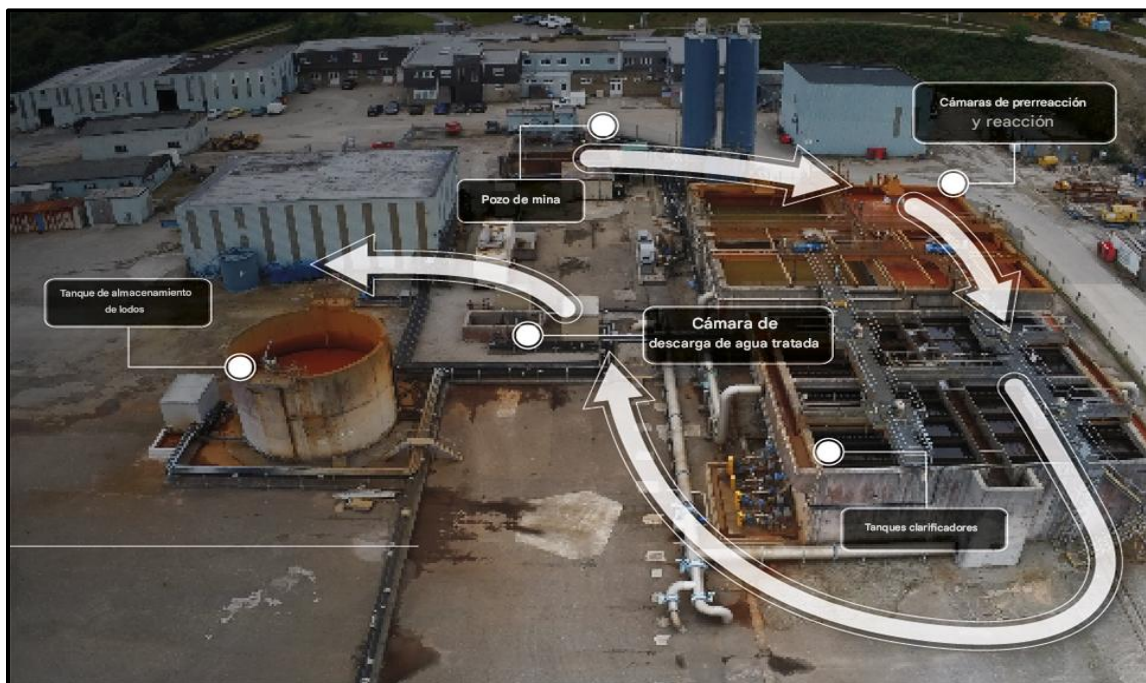


Figura 4. 21. Planta de tratamiento activo de mina Wheal Jane. Fuente: *Wheal Jane mine water treatment scheme (Coal Authority & Mining Remediation Authority, 2020)*.

Por otra parte, se encuentran los tratamientos pasivos para la contaminación por metales en acuíferos y aguas superficiales; estos consisten en mejorar la calidad del agua como resultado de reacciones químicas y biológicas naturales y la dilución con agua no contaminada, en sistemas que requieren un mantenimiento poco frecuente y de menor costo, debido a ello, estos sistemas se usan cuando las operaciones se encuentran en etapa de cierre y particularmente en aquellas que han sido abandonadas. De acuerdo con *López-Pamo et al. (2002)* los principales sistemas de tratamiento pasivo son:

- Humedales aerobios y anaerobios.
- Drenajes anóxicos calizos.
- Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad.

- Barreras reactivas permeables.

Por su parte, *Dinis y Fiúza (2021)* reúnen en un compendio los principales tratamientos pasivos, entre los que destacan las barreras verticales, fitorremediación (freno de los contaminantes mediante plantas de raíces profundas), barreras reactivas permeables y adsorción de contaminantes disueltos en la superficie dentro de los poros del carbón, bombeando el agua subterránea y reintegrándola al acuífero posterior a su tratamiento (Figura 4.22).

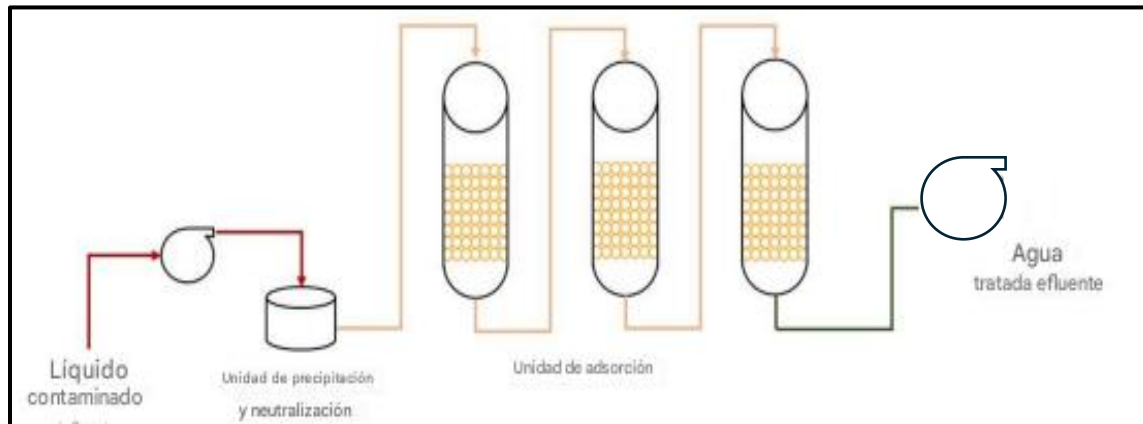


Figura 4. 22. Proceso general involucrado en la adsorción. Fuente: *Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies (Dinis & Fiúza, 2021)*.

Una experiencia relevante que ilustra la viabilidad de estas estrategias es el uso de biocarbón activado como adsorbente de metales pesados en el agua subterránea de minas en la India que se ha convertido en una alternativa prometedora gracias a su alta eficiencia, bajo costo y versatilidad (*Padhi et al., 2024*). Otro caso que resulta ilustrativo para el contexto mexicano es el que describen *Gibert et al. (2011)* donde mencionan que, posterior al vertido de una gran cantidad de drenaje ácido de mina y lodos píríticos en el acuífero Agrio en España se instaló una barrera reactiva permeable (BRP) subterránea para mitigar los impactos a largo plazo del vertido, dicha barrera consiste en una mezcla de caliza y composta vegetal que neutraliza eficazmente el pH y elimina metales pesados en el agua subterránea (Figura 4.23).

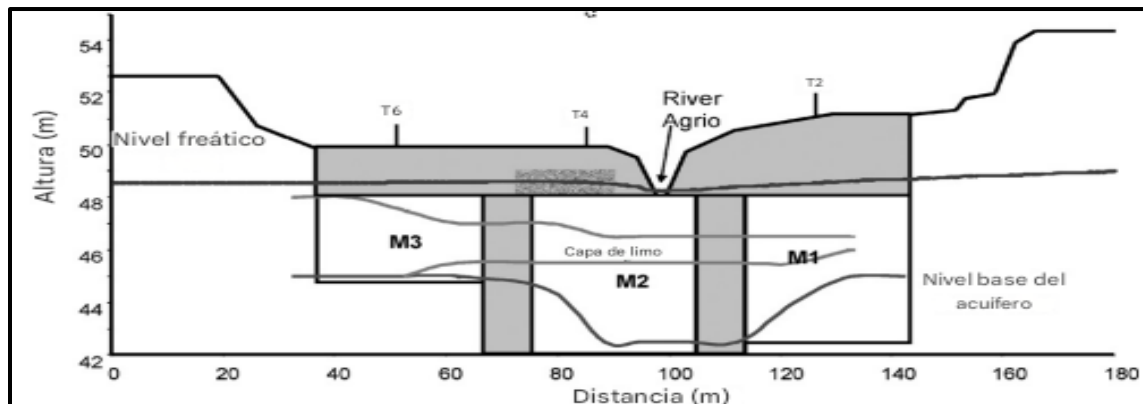


Figura 4. 23. Corte transversal de la barrera reactiva permeable colocada en España. Fuente: *In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain) (Gibert et al., 2011)*.

Un tratamiento adicional es el uso de sistemas de remediación con plantas (Figura 4.24) que consiste en un proceso en el que los contaminantes son absorbidos por sus raíces, tal es el caso de Kolar Gold Fields, India que ante la necesidad de remediar los acuíferos usaron especies de plantas como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), *Pistia stratiotes* (lechuga de agua) y *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver) para el tratamiento de agua; las especies se cultivaron en una solución sintética y se les añadió nitrógeno, fósforo y potasio (Gupta et al., 2015).

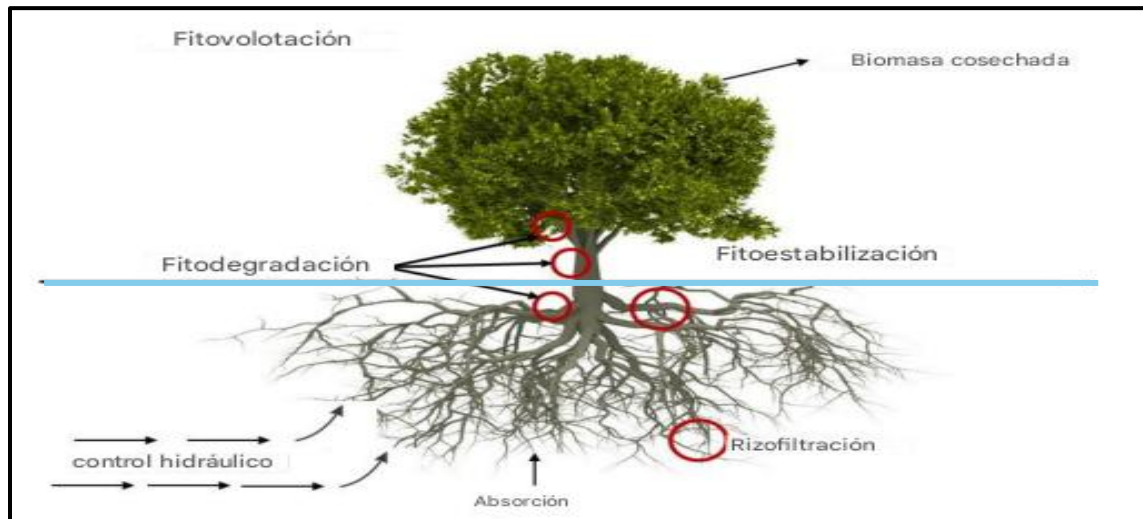


Figura 4. 24. Proceso de fitorremediación. Fuente: *Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies* (Dinis & Fiúza, 2021).

A su vez, Naghoum et al. (2025) estudiaron la efectividad de dos humedales construidos de flujo subsuperficial vertical uno plantado y uno sin plantar (Figura 4.25), además con piedra caliza como agente neutralizante, grava de río y musgo natural para la remediación del drenaje ácido de la mina abandonada de Ouixane ubicada en Marruecos.

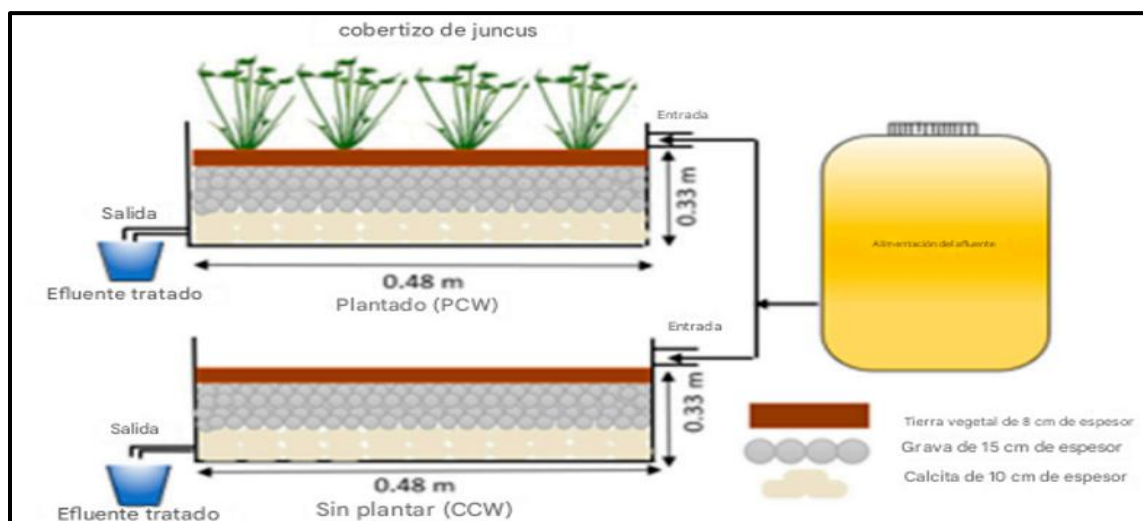


Figura 4. 25. El diseño esquemático de los sistemas que muestra el flujo vertical y los detalles de la disposición del sustrato. Fuente: *Passive Treatment of Acid Mine Drainage Effluents Using Constructed Wetlands: Case of an Abandoned Iron Mine, Morocco* (Naghoum et al., 2025).



En síntesis, los casos revisados demuestran que existe la contaminación tanto en cuerpos de agua superficiales como subterráneos; esta problemática se ha gestionado a través de métodos de remediación de acuíferos y cuerpos de agua superficiales los cuales en su mayoría se encuentran asociados al drenaje ácido, muchos de ellos usan un tipo específico de remediación, sin embargo, podría abordarse el tratamiento de manera más eficaz mediante la combinación de tratamientos activos y pasivos. Mientras los primeros permiten un control a largo plazo con menor costo y mantenimiento, los segundos aseguran resultados inmediatos en situaciones críticas. La integración de ambas estrategias no solo fortalece la sostenibilidad hídrica, sino que también constituye una referencia clave para el diseño de soluciones adaptables al contexto mexicano.

Por su parte, la remediación de suelos toma vital importancia durante la etapa de cierre y postcierre de las operaciones mineras, ya que estas zonas suelen tener altas concentraciones de metales pesados, resultado de las técnicas de extracción y de los residuos propios de la actividad. Por ello, es fundamental rehabilitar los ecosistemas degradados, prevenir la contaminación de recursos hídricos, proteger la salud humana y recuperar la biodiversidad. En los últimos años se han desarrollado técnicas sobre remediación de suelos que se clasifican según su objetivo (*Ortiz et al., 2007*):

- Contención (previenen la migración de contaminantes).
  - ✓ Aislamiento y contención.
  - ✓ Barreras permeables.
- Confinamiento (reducen la movilidad de los contaminantes mediante procesos físico-químicos).
  - ✓ Estabilización físico-química.
  - ✓ Vitricación.
  - ✓ Encapsulación.
- Descontaminación (eliminación parcial o total de la contaminación del suelo).
  - ✓ Sustitución.
  - ✓ Fracturación neumática.
  - ✓ Electrocinética.
  - ✓ Extracción ácida.
  - ✓ Flushing.
  - ✓ Lavado.

Si bien, las anteriores técnicas son más comunes suelen ser muy invasivas y costar la fertilidad del suelo; por tal razón se ha optado por alternativas más amigables, entre las que destacan (*Ortiz et al., 2007*):

- Biorrecuperación.
  - ✓ Biodegradación asistida.
  - ✓ Biotransformación de metales.
  - ✓ Fitorremediación.

- Tratamientos térmicos.
  - ✓ Desorción térmica.

La remediación de suelos en la industria minera se enfoca sobretodo en suelos que han sido contaminados por metales pesados, tal es el caso de la zona minera de Shuikoushan, provincia de Hunan, China en el que se estudió el efecto y los mecanismos de acción del biocarbón de lichí y el uso de girasol; se demostró que las plantas de girasol redujeron significativamente la concentración de Pb, Cd, As y Zn en el suelo; además la adición de biocarbón mejoró el efecto de remediación de metales pesados del girasol (*Jun et al., 2020*).

En la misma línea, el distrito minero “Sierra Minera” ubicado entre las ciudades de Cartagena y La Unión al sureste de España en 2011 llevó a cabo una estrategia de remediación en un depósito de jales mediante la aplicación de fitorremediación y enmiendas orgánicas y alcalinas aplicadas en distintas dosis (Figura 4.26), cinco años posteriores a la aplicación de estos tratamientos se observó la reducción de la movilidad de metales (Pb, Zn, Cd), mejora de las condiciones del suelo y establecimiento del arbusto forrajero (*atriplex halimus*) (Figura 4.27) (*Acosta et al., 2018*).

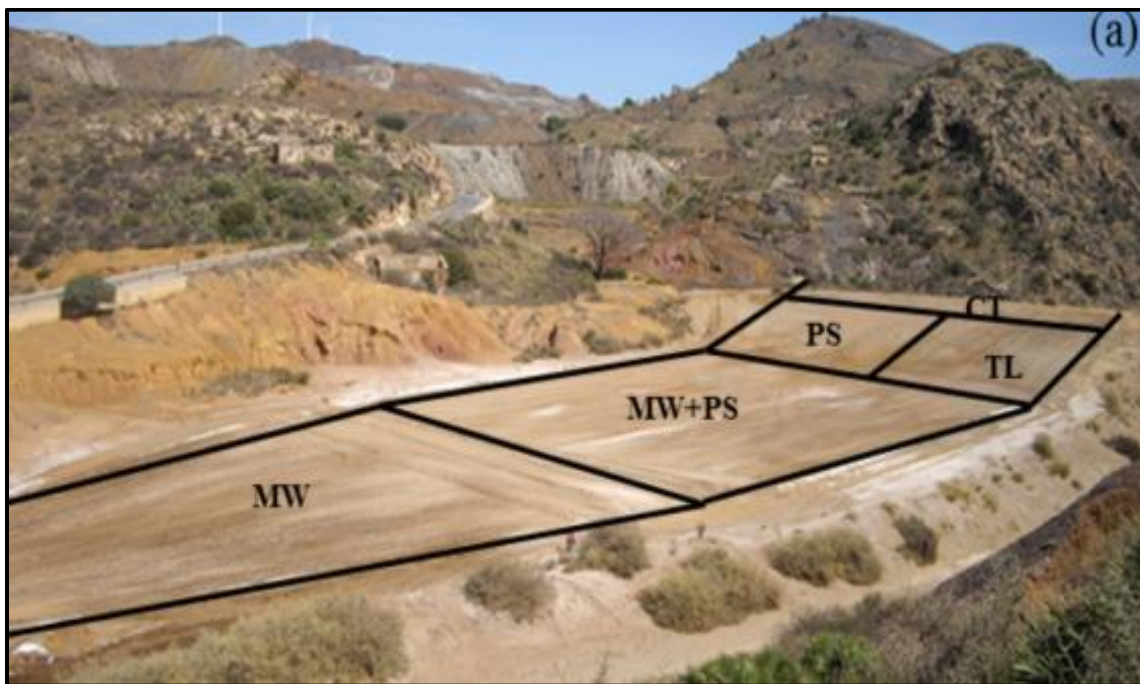


Figura 4. 26. Tratamientos aplicados CT (Control sin labrar ni enmendar), TL (Labranza superficial), MW (Labranza superficial y aplicación de residuos de mármol), PS (Labranza superficial y aplicación de purín de cerdo) y MW+PS (Labranza superficial y aplicación combinada de residuos de mármol y purín de cerdo). Tomado de *Phytoremediation of mine tailings with Atriplex halimus and organic/inorganic amendments: A five-year field case study* (Acosta et al., 2018).



Figura 4. 27. Área remediada y con crecimiento de vegetación cinco años después a la aplicación de los tratamientos. Tomado de *Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study* (Acosta et al., 2018).

Un aspecto de vital importancia que está siendo estudiado y aplicado es la remediación de suelos contaminados con cianuro, un ejemplo claro es el que describen *White y Markwiese (2008)* que evaluaron el potencial de biorremediación in situ de la contaminación por cianuro y nitrato en las pilas de lixiviación en Nuevo México, demostrando que la aplicación de sacarosa aumenta la degradación de cianuro y la inmovilización sin aumentar la acidez del medio.

De igual forma, en la mina “El Cubo” en Guanajuato, México se aisló un consorcio bacteriano nativo degradador de cianuro a partir de sedimentos de jales y se comprobó que este fue capaz de degradar la concentración inicial de cianuro de sodio en un 98%, con ello el consorcio bacteriano se convirtió en una alternativa adecuada para el tratamiento de suelos contaminados y residuos mineros con altas concentraciones de cianuro (*Alvarado et al., 2023*).

La remediación de suelos contaminados por cianuro ha sido implementada mediante diversas técnicas en condiciones reales; sin embargo, las técnicas aplicadas se enfocan principalmente al tratamiento y estabilización de jales que contienen cianuro. Para el tratamiento de suelos las técnicas se enfocan principalmente en la contención, remoción y tratamiento bacteriano que son métodos de remediación a largo plazo y que requieren un mayor estudio sobre su viabilidad y mecanismo para dejar de aplicarse a escala de laboratorio y comenzar a aplicarlo a escala industrial para atenuar la concentración de cianuro en el medio físico.

En conjunto, la remediación de suelos representa un componente esencial para la gestión ambiental y el cierre de operaciones, al permitir reducir la movilidad de contaminantes, restaurar las funciones ecológicas del suelo y mitigar riesgos en los ecosistemas y la salud humana. Los casos presentados anteriormente muestran que no existe una técnica universal



aplicable a todos los escenarios, sino que, evidencian que la combinación y uso de las estrategias dependen de las características del contaminante, las condiciones del sitio y los objetivos que se prevean.

#### 4.5 Gestión hídrica y fuentes alternas de abastecimiento de agua

La gestión hídrica en la industria minera representa uno de los ejes más sensibles y estratégicos de la sostenibilidad, ya que, el agua es un recurso vital tanto para los procesos productivos como para las comunidades y ecosistemas que comparten el mismo territorio.

La actividad extractiva en nuestro país se desarrolla en diversas regiones con climas contrastantes, lo que genera distintos grados de presión sobre el recurso hídrico. Cerca del 70% de la extracción de minerales metálicos y no metálicos se concentra en estados del norte y centro del país, caracterizados por climas áridos y semiáridos, baja recarga de acuíferos y precipitaciones menores a 500 mm/año. Aunado a ello, la percepción social del consumo de agua por parte de la minería es alta, ya que gran parte de las operaciones dependen de acuíferos ubicados en zonas de elevado estrés hídrico.

Se conoce que el mayor requerimiento hídrico dentro de la operación se encuentra en la etapa de beneficio, en actividades como perforación y supresión de polvo y servicios en campamentos; este proviene de acuíferos locales, cuerpos de agua superficiales y agua residual tratada en menor medida. En la actualidad gran parte de las compañías mineras en México han encaminado esfuerzos hacia el incremento de la recirculación del agua de proceso y plantas de beneficio con espesadores y filtros que logran circuitos casi cerrados para tener un mayor control sobre la gestión del recurso en sus operaciones.

Frente a este panorama, resulta evidente que la sostenibilidad en la minería no depende únicamente de reducir el consumo de agua o incrementar su recirculación, sino también de replantear las formas en que se almacena y gestiona el recurso dentro y fuera de las operaciones. Las principales fuentes de agua alterna usadas dentro de la industria son:

- Agua residual tratada.
- Desalinización.
- Recuperación de agua de jales.
- Captación de agua de lluvia.

En el caso de México, diversas operaciones mineras ya han incorporado el uso de **agua residual tratada** en sus procesos tal es el ejemplo de los complejos Met-Mex y Madero pertenecientes a Peñoles y el distrito minero de Fresnillo que comprende las unidades Fresnillo, Saucito y Juancipio; millones de litros de agua residual al día proveniente de la ciudades o regiones cercanas a las operaciones son tratadas mediante ósmosis inversa (Figura 4.28) y el uso que se le brinda a esta es como agua de proceso, para torres de enfriamiento, calderas y para el proceso electrolítico del zinc (*Ramos et al., 2010*).



Figura 4. 28. Planta de tratamiento de aguas residuales de Met-Mex Peñoles. Fuente: Peñoles, pionera en el tratamiento del agua residual (MILENIO, 2017).

Un caso similar ocurre en la mina Onça Puma ubicada en Brasil que realiza una sustitución parcial del agua fresca por agua residual tratada (aproximadamente el 37%) en el proceso de producción de ferróníquel; adicionalmente desde 2017 existe un sistema de reutilización de agua tratada más drenaje pluvial para regar caminos internos y accesos de la mina (VALE, 2023).

El uso de agua residual tratada en México es un hecho enfocado hacia la reducción de extracción de fuentes naturales; sin embargo, persisten áreas de mejora relacionadas a la estabilidad en la calidad del tratamiento, la infraestructura de conducción, la integración en el balance hídrico total y la transparencia en indicadores de desempeño. El reto más allá de ampliar la adopción consiste en consolidar una gestión hídrica integral que articule monitoreo continuo, recirculación y vinculación con economía circular dentro de un enfoque de sostenibilidad.

Por otra parte, se encuentra la **desalinización** que consiste en el proceso de eliminar la sal y otros minerales del agua de mar o salobre, a través de ósmosis inversa o tecnologías térmicas para producir agua apta para uso industrial. Un caso documentado es la planta de desalinización de agua de mar (Figura 4.29) inaugurada en 2018 que está vinculada al sitio de la mina La Escondida en Perú, a más de 3100 metros sobre el nivel del mar a través del desierto de Atacama y que trata 2,500 litros por segundo (BHP, 2021).



Figura 4. 29. Planta desalinizadora de agua de mar "La Escondida". Fuente: BHP Billiton Approves Escondida Water Supply Project (BHP, 2021).

Asimismo, Antofagasta en Chile inauguró en 2023 una planta desalinizadora para la mina de cobre Los Pelambres (Figura 4.30), en la que se planea bombear 440 litros de agua por segundo en una segunda fase cuya finalización está prevista para 2027 (Ramos & Villegas, 2024). Además, en el desierto de Atacama en Chile se planea poner en marcha una segunda fase de la planta desalinizadora Quebrada Blanca con una capacidad de 102,360 m<sup>3</sup>/día (IDE Technologies, 2023).



Figura 4. 30. Planta desalinizadora de la unidad Los Pelambres, Chile. Fuente: Los Pelambres desalination plant (Ramos & Villegas, 2024).

En México se conocen algunos posibles prospectos de desalinización de agua para una futura producción en el proyecto minero Metates en Durango, que de acuerdo con, la empresa Chesapeake consistiría en construir y operar una planta desalinizadora de 55 millones de



---

litros diarios (636.574 L/s) para abastecer de agua las operaciones mineras; este proyecto aún se encuentra en fase de desarrollo y por lo tanto no se ha construido ninguna planta desalinizadora (Reifel, 2015). Fuera de este ejemplo aún no hay casos verificados en el país.

Este tratamiento se ha posicionado como una alternativa prometedora que garantiza el suministro en regiones mineras con elevado estrés hídrico, particularmente en zonas áridas del norte del país. Sin embargo, su viabilidad sostenible se debe analizar con cautela, ya que este proceso genera como residuo la salmuera que, si no se gestiona adecuadamente, puede ocasionar afectaciones en los ecosistemas marinos y costeros. Por tal motivo Cruz et al. (2022) realizaron una investigación sobre el uso potencial de la salmuera residual tratada, descargada del proceso de ósmosis inversa, como fuente de agua en el proceso de recuperación del cobre, teniendo un excelente resultado al compararla con el uso de agua fresca.

A pesar de lo que arroja la investigación, la incorporación de la desalinización al sector como una fuente de agua alterna debe acompañarse de tecnologías y normativas que aseguren un manejo responsable del residuo.

Otras medidas relevantes incluyen la *captación de agua de lluvia*; cabe aclarar que en México representa una alternativa viable, pero su captación y uso requiere una concesión por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en la que se incluya la cantidad y el fin para el que será utilizada. Esta alternativa se ha llevado a cabo únicamente dentro de los depósitos de jales, para ello, se aprovecha la estacionalidad de las precipitaciones para almacenarla y posteriormente darle uso, a través de la recuperación de agua contenida en los mismos permitiendo reincorporar grandes volúmenes al ciclo operativo y conseguir una estabilidad física mayor y una disminución del nivel freático en la cortina del depósito.

Existen casos documentados sobre unidades que usan captación de agua de lluvia dentro de sus depósitos de jales como parte de sus fuentes alternas de agua, entre ellas se encuentra Mina San José en Oaxaca, México que del 100% de agua que requiere el proceso, el 90% proviene de la recirculación del agua de proceso y el 10% restante proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales y de un sistema de captación de agua de lluvia que fue desarrollado dentro del depósito de jales (Figura 4.31), además de que ha implementado sistemas de captación de agua en escuelas para ahorrar al menos 10,000 litros de agua en un año (Minería Pan-Americana, 2024).



Figura 4. 31. Sistema de captación de agua de lluvia en depósito de jales de mina San José. Fuente: Unidad Minera San José opera con normalidad ante lluvias (México Minero, 2025).

Por otra parte, se han realizado estudios sobre el área minera Wuda en China en la que se implementó un sistema de recolección de agua de lluvia combinada con riego “RWHI” (Figura 4.32) para la hidratación de la zona que fue reforestada mejorando significativamente la cobertura vegetal y la tasa de supervivencia de las especies (Liu et al., 2022).



Figura 4. 32. Sistema RWHI en Wuda, China. Fuente: A new small-scale system of rainwater harvesting combined with irrigation for afforestation in mine area: Optimizing design and Application (Liu et al., 2022).

Algunas empresas han implementado otras acciones para capturar el agua lluvia, tal es el caso de Vikram Cement Works en India que ha modificado la planificación de sus tajos para acumular y aprovechar la lluvia en los bancos inferiores del mismo como se observa en la Figura 4.33 (GCCA, 2021).



Figura 4. 33. Captación de agua de lluvia en Vikram Cement Works. Fuente: Rainwater Harvesting at UltraTech's Vikram Cement Works – Case Study (GCCA, 2021).

Si bien la captación de agua de lluvia representa una alternativa valiosa su aplicación en la industria mexicana se encuentra condicionada a las especificaciones de la CONAGUA y a la marcada variación climática del territorio. En estados del norte donde existe un mayor estrés hídrico, predominan los climas áridos y las precipitaciones anuales son muy bajas, esta alternativa difícilmente puede sustituirse y pasar a ser la fuente principal de abastecimiento. No obstante, su integración bajo un esquema híbrido y en zonas con mayores precipitaciones puede aportar beneficios significativos y contribuir a un manejo más resiliente y sostenible del recurso.

En conclusión, la minería mexicana ha dado pasos importantes hacia la sostenibilidad mediante la implementación de sistemas de recirculación de agua, el uso de agua residual tratada y la recuperación de agua de lluvia de los depósitos de jales. Sin embargo, persisten áreas de mejora como la implementación de plantas desalinizadoras de agua y la captación y uso de agua de lluvia dentro de las operaciones que requieren mayor innovación, regulación y colaboración multidisciplinaria para que la industria transite a una mejor gestión y regulación de los recursos hídricos de los que hace uso.

#### 4.6 Cierre de minas y planes de restauración integral

La última etapa en el ciclo de vida de una mina es la etapa de *cierre de mina* y es esencial, consiste en la ejecución de medidas y actividades contempladas en el *plan de cierre* que de acuerdo con ICMM (2025), es un instrumento de gestión ambiental que comprende todas las

acciones técnicas y legales requeridas para garantizar el logro de los objetivos de cierre de la mina y es un documento dinámico que requiere ser reevaluado y preparado. Se integra conforme a lo señalado en la Figura 4.34.

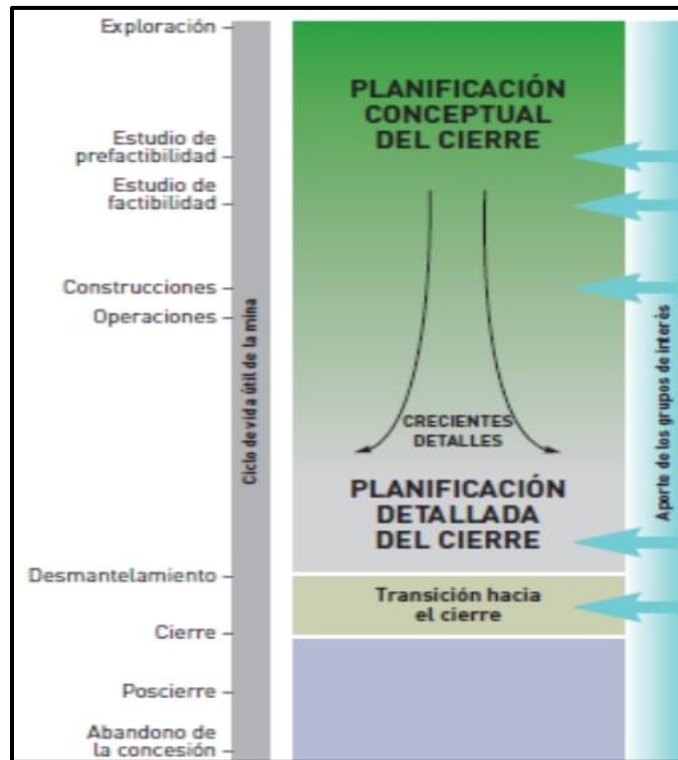


Figura 4. 34. Planificación del Cierre Integrado de Minas. Fuente: Integrated Mine Closure (ICMM,2025).

En México, los planes de cierre anteriormente se elaboraban con el objetivo de cumplir un requisito impuesto internacionalmente; a partir de la reforma de 2023 tanto la Ley de Minería como la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) indican que es obligación de todas las unidades mineras presentar un plan de cierre ante las autoridades competentes. Si bien, es un cumplimiento corporativo para continuar operando, las empresas y unidades tienen el deber de llevar a cabo las acciones allí descritas, además, se pueden utilizar como referencias las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) y auditorías que si bien no son una serie de pasos a seguir para un exitoso cierre permiten regular las actividades que se llevan a cabo.

Un plan de cierre de operaciones mineras parte de un diagnóstico ambiental, social y económico previo sobre el área en que se encuentra la operación con la finalidad de enfocar cada una de las acciones hacia una gestión preventiva, progresiva y adaptativa, incorporando la gestión de riesgos, la participación de las partes involucradas y la integración de criterios ambientales y sociales. Los rubros que se atienden principalmente en un plan de cierre son:

1. Estabilidad física.
2. Estabilidad geoquímica.
3. Gestión hídrica y recuperación de patrones de escurrimiento.



4. Remediación de suelos, acuíferos y ecosistemas.
5. Gestión de residuos mineros.
6. Infraestructura y desmantelamiento.
7. Desarrollo socio-cultural.
8. Monitoreo post cierre.
9. Aspectos económicos.

Integrar planes de cierre en las operaciones ha traído consigo beneficios como el fortalecimiento de la licencia social para operar en otros sitios, la oportunidad de perfeccionar las actividades de cierre antes de la implementación final, la reducción de costos en la etapa final de la vida de la mina siempre que se tenga una buena planificación y la reducción de pasivos ambientales o tierras perturbadas.

El cierre de minas en México no sólo se gestiona con los lineamientos nacionales, sino que también se enmarca dentro de una serie de buenas prácticas internacionales, realizadas por diversos organismos que promueven la planificación temprana del cierre y la rehabilitación progresiva, la participación comunitaria, el monitoreo postcierre y la búsqueda de que las áreas intervenidas recuperen su estabilidad y funcionalidad a largo plazo. Entre ellos, se encuentran:

- Environmental Guidelines for Mining (UNEP, 1991).
- APELL for Mining (UNEP, 1996).
- Strategic Framework for Mine Closure (2000).
- Good Practice Mining and Metals (ICMM, 2003).
- Towards Sustainable Mining - Mine Closure Protocol (MAC, 2004).
- Leading Practice Sustainable Development Program (Australia, 2006).
- Mine Closure Guidelines (South Africa, 2011).
- Strategic Framework for Mine Closure (MCA, 2012).
- Mining Project Rehabilitation and Closure Guidelines (IGF, 2019).
- Mine Closure Guidelines (Western Australia, 2020).
- Guía metodológica de cierre de minas (CEPAL, 2020).
- Integrated Mine Closure: Good Practice Guide (ICMM, 2025).

Las unidades mineras en la elaboración de sus planes de cierre deben considerar tres ejes que son fundamentales y en los cuales se deben basar las acciones que se pretendan realizar; en primera instancia la dimensión ambiental constituye uno de los ejes principales dentro del proceso de cierre de operaciones y comprenderlo depende de diversos factores como la ubicación, el uso de suelo antes de la minería y las alteraciones realizadas al paisaje, sin embargo, las unidades podrían identificar y evaluar diversas opciones mediante la implementación de evaluación temprana, evaluaciones sobre qué tan afectada está la capacidad del terreno y realizando mapeos para identificar las opciones potenciales de uso. Con ello podrían adaptar métodos de recuperación ambiental considerando los factores que



realmente corresponden a la zona en la que se ubicó la operación; ambientalmente el cierre debe verse con la responsabilidad y conocimientos debidos sobre especies nativas, flujos de escorrentía, comportamiento de depósitos de residuos mineros y tratamientos pasivos para cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Mientras que la dimensión económica y social, requiere una adecuada planificación financiera para cubrir los costos de remediación, monitoreo y obligaciones postcierre, además de la gestión del empleo, la diversificación económica local y la participación comunitaria. Se debe tener en cuenta que ambos componentes van de la mano y contribuyen a fortalecer la sostenibilidad del territorio y con ello asegurar un cierre exitoso de mina con la nula generación de dependencia a la minería y que a su vez logran conformar una base integral que permite que la industria minera sea aceptada por todos los actores.

#### **4.6.1 Casos de éxito y buenas prácticas**

Considerando la importancia de una correcta planificación y ejecución de planes de cierre en las etapas iniciales y finales de un proyecto minero, resulta primordial destacar experiencias que han demostrado no solo que está habiendo una transición entre lo que se conocía como **abandono de minas** y el término actual de **cierre de minas**, sino que también, ha tenido resultados positivos en los tres ejes estratégicos que definen una industria minera sostenible.

Por tal motivo, en este apartado se expondrán algunos casos de éxito y buenas prácticas que han demostrado resultados positivos en materia de rehabilitación ambiental, integración social y recuperación económica del sitio. A través de su revisión se busca comprender cómo la innovación tecnológica, planificación temprana y la participación de los interesados contribuyen a un cierre sostenible.

Las buenas prácticas son un conjunto de procedimientos, reglas o criterios desarrollados a partir de la experiencia acumulada de la industria y han sido estandarizados internacionalmente para gestionar de manera controlada el cierre de una operación minera y con ello reducir incertidumbres y promover resultados. Entre las buenas prácticas se encuentran (ICMM, 2025):

- Se debe considerar la aplicación de requisitos de cierre que sean coherentes con entornos regulatorios más consolidados; además se debe colaborar con los reguladores desde el principio del proceso para mejorar la coherencia con las expectativas.
- Las empresas deben colaborar con sus pares del sector para desarrollar mensajes coherentes sobre los impactos y las oportunidades de la minería, así como su compromiso con la sostenibilidad tras el cierre.
- La gestión del agua debe tener un enfoque más holístico que considere las necesidades más amplias de la cuenca hidrográfica circundante, su ecosistema, las comunidades dependientes y otros usuarios.

- La gestión de jales debe tener objetivos comunes, facilitar el intercambio de conocimientos y colaborar con las partes interesadas externas para fomentar comprensión y confianza en el proceso de implementación.
- Las empresas deben construir relaciones sólidas y mutuamente beneficiosas con las comunidades aledañas y los pueblos indígenas.
- Implementar el cierre progresivo, mediante prácticas o acciones de cierre durante la vida operativa de la mina.
- Desarrollar indicadores cuantitativos del éxito de las actividades de cierre.
- Considerar el uso del suelo tras el cierre en el desarrollo tanto de la visión de cierre como de los objetivos específicos del sitio.
- Elaborar mapas del paisaje posterior al cierre y evaluar el uso del suelo tras el cierre en áreas con capacidad común.

Por su parte, los casos de éxito permiten identificar experiencias reales que se desarrollan bajo contextos regulatorios y operativos diferentes pero que bien pueden servir como base o contexto para la industria minera en México. Tal es el caso de, la mina Sullivan en Columbia Británica, Canadá que operó durante casi 100 años y de la cual se cedieron terrenos propiedad de Teck para ampliar la estación de esquí local y los centros recreativos (Figura 4.35 y 4.36, respectivamente), además, se completó una planta de energía solar comunitaria que opera desde 2015 (ICMM, 2025).



Figura 4. 35. Proyecto solar en la mina recuperada de Sullivan, Canadá. Fuente: *Integrated Mine Closure: Good practice guide, 3rd edition* (ICMM, 2025).



Figura 4. 36. Pista de esquí en la mina recuperada de Sullivan, Canadá. Fuente: *Integrated Mine Closure: Good practice guide, 3rd edition (ICMM, 2025)*.

De manera similar, un ejemplo destacable es la zona minera PT Newmont Minahasa Raya (PTNMR) ubicada en Indonesia que fue convertida en jardín botánico, logrando que a la fecha sea un bosque próspero de caoba, teca, nyatoh y sengon (Figura 4.37) (ICMM, 2025).



Figura 4. 37. La rehabilitación del PTNMR en Indonesia ahora es un jardín botánico. Fuente: *Integrated Mine Closure: Good practice guide, 3rd edition (ICMM, 2025)*.

De igual modo, se encuentra el caso de un lago que se creó mediante el embalse de la antigua mina a cielo abierto llamada Puy de l'Age en Francia (Figura 4.38), con obras de reperfilado

para satisfacer las necesidades de desove de los peces introducidos y se ha revegetado como pastizal (ICMM, 2025).



Figura 4. 38. Puy de l'Age antes y después del cierre de operaciones. Fuente: *Integrated Mine Closure: Good practice guide, 3<sup>rd</sup> edition* (ICMM, 2025).

En la misma línea, destaca la operación de la mina Golden Pride en Tanzania; es un caso documentado de cierre exitoso con enfoque en inclusión social, uso de fondo de legado y transición económica local, un ejemplo de cierre planificado con resultados positivos para la comunidad (Figura 4.39 y 4.40, respectivamente), además se implementaron técnicas de relleno de tajo, revegetación y reincorporación de especies animales (IISD, 2022).



Figura 4. 39. Vista del yacimiento a cielo abierto parcialmente relleno y de las pilas de desmonte recuperadas, aproximadamente un año después del final de la producción de oro en diciembre de 2014. Fuente: *Inclusive Closure and Post-Mining Transition at the Golden Pride Mine, Tanzania* (IISD, 2022).



Figura 4. 40. Vista del lago de la mina hacia el este en febrero de 2022. Las partes rellenadas del lago se encuentran en el extremo opuesto de esta foto. Fuente: *Inclusive Closure and Post-Mining Transition at the Golden Pride Mine, Tanzania* (IISD, 2022).

Finalmente, es pertinente mencionar que operaciones en México ya han comenzado a adoptar acciones de cierre y cierre progresivo, actualmente un caso de estudio es el de la Mina Álamo Dorado, Sonora, la cual comenzó su etapa de cierre activo en 2016 con la implementación de acciones como revegetación, para restablecer la cobertura vegetal (Figura 4.41), se capacitó a ejidatarios en obras como impermeabilización de superficies, canales de derivación pluvial, y tratamiento de agua en laguna del tajo; en su último informe de sostenibilidad reporta que se encuentra en fase de monitoreo y mantenimiento postcierre (*Pan American Silver, 2025*).



Figura 4. 41. Reforestación como eje prioritario para el cierre de Mina Álamo Dorado, Sonora. Fuente: *Plan de cierre de Álamo Dorado* (El Imparcial, 2022).

De manera adicional, la mina “La Choya” ubicada en Sonora representa un exitoso caso de cierre alcanzado por la implementación de acciones para el cierre de las pilas de lixiviación y concentrado al tiempo que se rellenaron las diversas áreas de explotación y el alcance de reforestación del 50% de las pilas de lixiviación (ENGENERA, 2021).

Otro referente ubicado en el mismo estado es el caso de la operación Santa Rita (El Chanate), que mediante un cierre progresivo desde 2014 se encuentra reforestando las áreas que ya no ocupaban, el cese de operaciones fue en 2018 y desde entonces a la fecha, se han llevado a cabo acciones como el suavizamiento de las pendientes de los taludes, la reincorporación de las especies animales y vegetales (Figura 4.42) y en los patios de lixiviación se está lavando el mineral agotado para reducir la concentración de cianuro en el agua por debajo del límite que indica la NOM-155-SEMARNAT-2007 (Mundo Minero, 2023).

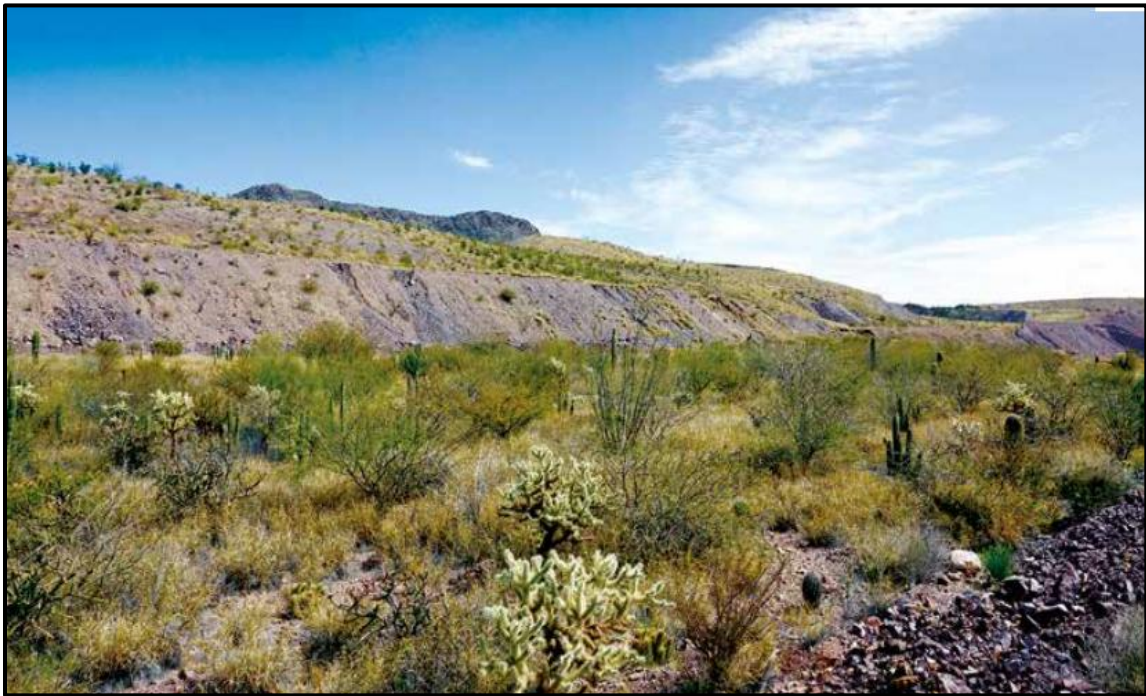


Figura 4. 42. Vista de la revegetación que se ha realizado en la tepetatera norte de la mina El Chanate, Sonora. Fuente: “Cierre de Minas” (Mundo Minero, 2025).

En conjunto, las buenas prácticas y los casos de éxito revisados permiten comprender los elementos clave que garantizan un cierre responsable. A partir de estas experiencias nacionales e internacionales, resulta pertinente analizar cómo dichos principios y acciones pueden incorporarse dentro del marco regulatorio y operativo de México.

Hablar de los retos y áreas de mejora en el cierre de minas en México permite conectar la teoría con la realidad nacional; el cierre de minas enfrenta retos estructurales y operativos que limitan la consolidación de un modelo realmente sostenible. A pesar de los avances en materia ambiental, México aún carece de un marco normativo que establezca criterios obligatorios, estándares técnicos y responsabilidades postcierre claramente definidos, por ello, se dificulta la incorporación del plan de cierre desde las etapas tempranas en algunas



operaciones, incrementando así los costos de rehabilitación y reducción de la efectividad de las medidas de mitigación; la ausencia de lineamientos específicos nos obliga a recurrir a los estándares internacionales y a revisar los casos de éxito en el mundo que nos permitan tener mejor conocimiento sobre los ejes fundamentales de un cierre de operaciones exitoso.

Por otro lado, no existe un sistema nacional robusto que tenga por objetivo verificar el cumplimiento, la estabilidad ambiental o el desempeño postcierre a largo plazo, además, solo las grandes empresas establecen estrategias claras para la transición socioeconómica o la reconversión laboral. Por su parte, la gestión de los pasivos ambientales representa un foco alarmante dada la existencia de sitios abandonados o mal rehabilitados.

Lo mencionado anteriormente refleja que el principal desafío para el sector en el país radica en la transición de una visión correctiva a una preventiva e integral, además, evidencia las áreas de mejora prioritarias para fortalecer la gestión responsable e incorporación del cierre de minas como parte real y tangible del ciclo de vida de la operación.

## **4.7 Diversidad e inclusión en la fuerza laboral**

La diversidad e inclusión en la fuerza laboral, son dos conceptos diferentes que podrían confundirse; en primera instancia la diversidad significa reconocer y aceptar las diferencias individuales entre los trabajadores y que con ello exista una representación amplia y equitativa de distintos grupos dentro de la empresa minera; en segundo lugar la inclusión implica crear un ambiente laboral donde todo el personal sea valorado, respetado, escuchado y con las mismas oportunidades de crecimiento y desarrollo profesional; ambos términos han tomado gran relevancia y se han convertido en un indicador de sostenibilidad social dentro del sector.

Tradicionalmente la industria minera se ha considerado de predominio masculino, sin embargo, en las últimas décadas ha iniciado un proceso de transformación hacia entornos laborales más equitativos y representativos, enfocados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente con el ODS 5, 8 y 10, logrando con ello promover entornos laborales en los que se garantice la igualdad de oportunidades, se elimine la discriminación y se fomenten las condiciones de trabajo justas para todos.

### **4.7.1 Situación actual en México**

En esta transición México no ha sido la excepción, ya que, la diversidad e inclusión laboral dentro del sector minero han ganado fuerza a través de los años mediante de la implementación de políticas en los centros de trabajo. En la actualidad es bien sabido que el personal femenino prevalece y tiende a un crecimiento sostenido en años futuros, sin embargo, llegar a este punto no fue sencillo, requirió de años de desafiar y enfrentar ideas estigmatizadas como las que aseguran que, la minería era un “trabajo exclusivo de hombres”, la presencia femenina “traía mala suerte o afectaba la producción”, se pensaba que las mujeres no estaban preparadas para manejar maquinaria, liderar equipos o tomar decisiones



y se asumía que no podrían adaptarse a las condiciones exigentes del trabajo ni conciliarlo con la vida familiar. La transición de estas ideas a lo que actualmente conocemos queda representada por la brecha temporal que existe entre cada hito sobre la participación femenina dentro del sector como se muestra en la siguiente línea de tiempo.



Figura 4. 43. Línea del tiempo de la incorporación de las mujeres en la minería mexicana. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Women in Mining México (2023), Grupo Peñoles (2022) e INEGI (2020).

Estas percepciones se han modificado de manera gradual pero significativa. La creciente incorporación de mujeres en la minería ha impulsado un cambio cultural, estructural y de perspectiva dentro del sector, esto se sustenta con los informes de sostenibilidad de cada una de las empresas y con el informe de sostenibilidad de la Cámara Minera de México que considera en sus evaluaciones a todas las empresas que están afiliadas. A continuación, se presenta un gráfico que demuestra que la participación femenina se ha mantenido en todas las áreas, con algunas variaciones, pero no se observa un crecimiento exponencial en los últimos años. Una realidad innegable es que hubo un incremento del personal femenino en lo que va de este siglo.

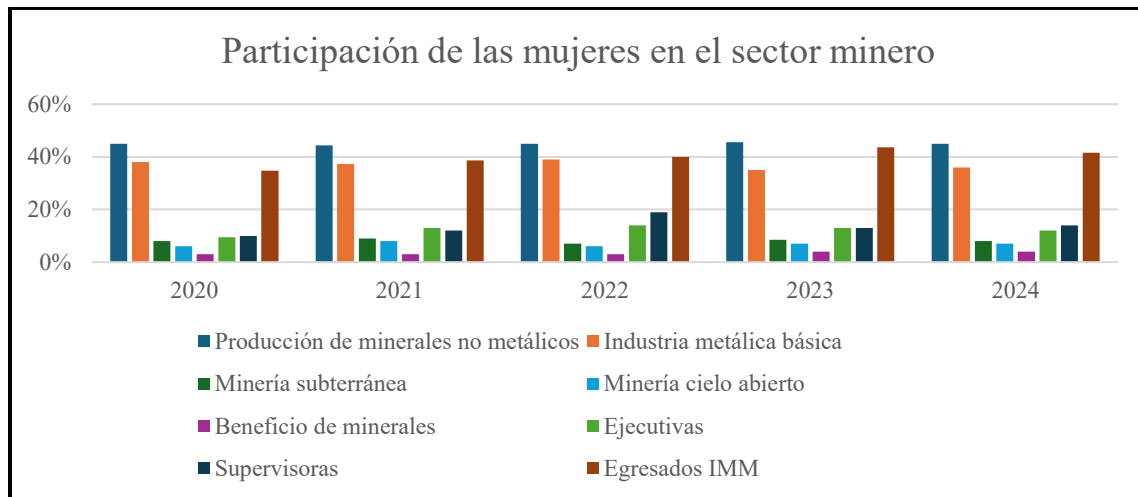


Figura 4. 44. Participación de las mujeres en el sector minero, respecto al total de colaboradores. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Informe de Sostenibilidad (2020, 2021, 2022, 2023, 2024).

Cabe mencionar que la inclusión de las mujeres en el sector minero no solo representa un avance hacia la equidad de género, sino también un cambio estructural con efectos positivos en las comunidades cercanas donde esta actividad es una de las principales fuentes de empleo formal contribuyendo a la diversificación de la fuerza laboral, incrementando los ingresos familiares y fortaleciendo el tejido social. A su vez, la presencia de mujeres en distintos niveles dentro de una empresa minera impulsa una cultura más inclusiva, segura y orientada al bienestar comunitario, reforzando con ello la sostenibilidad social de la minería.

#### 4.7.2 *Iniciativas y políticas de inclusión*

En respuesta a los retos históricos de desigualdad de género en el sector minero, en los últimos años han surgido diversas iniciativas y políticas orientadas a promover la inclusión y la equidad laboral. A continuación, se mencionarán algunas políticas e iniciativas que comparten las empresas en México (CAMIMEX, 2025):

- Implementación de políticas de representación inclusiva en todos los niveles jerárquicos y áreas de la organización.
- Políticas contra el acoso sexual y la discriminación de género.
- Procesos inclusivos de reclutamiento y selección que promueven la diversidad.
- Revisión de las políticas de compensación para la reducción de la brecha salarial de género.
- Establecimiento de comités, grupos de trabajo o grupos de afinidad dedicados a la diversidad e inclusión.
- Permisos de maternidad y paternidad homoparentales y por adopción.
- Contratación de personal con alguna discapacidad o necesidades especiales.
- Implementación de espacios adecuados para la lactancia materna.
- Programa de inversión comunitaria Mujeres de Acero: Iniciativa que promueve la participación y desarrollo de las mujeres en la comunidad.



- Implementación de política de contratación local, aplicable para contrataciones en las comunidades aledañas.

Las acciones enlistadas buscan garantizar condiciones justas, seguras y libres de discriminación para las trabajadoras, además de fomentar su participación en todos los niveles jerárquicos mediante la implementación de programas de capacitación y redes de mentoría. Con ello el sector minero mexicano ha comenzado su transición a una industria con perspectiva de género.

#### **4.7.3 Retos y perspectivas**

La transición que ha tenido el sector minero en México dentro del ámbito de diversidad e inclusión en la fuerza laboral ha traído beneficios tanto para las mujeres que se incorporan a la plantilla laboral como para las empresas, ya que con ello se impulsa la innovación al integrar distintas perspectivas, mejora la productividad y competitividad, fortalece la colaboración respetuosa y equitativa dentro de los centros de trabajo, reduce la rotación y ausentismo del personal y demuestra con hechos no solo con palabras su compromiso con la sociedad al ofrecer igualdad de oportunidades de crecimiento y desarrollo profesional dentro de los centros de trabajo.

Sin embargo, a pesar de los evidentes pasos que ha dado el sector aún persisten brechas para alcanzar una igualdad de oportunidades en posiciones de liderazgo, técnico-operativas e incluso en profesionales en ciencias de la tierra e ingeniería de minas y/o metalurgia, esto debido principalmente a la persistencia de sesgos culturales y estereotipos de género, la resistencia al cambio organizacional, la necesidad de establecer y dar seguimiento a políticas más robustas y efectivas de inclusión y las brechas salariales e infraestructura no acondicionada para el personal femenino.

Superar estas disparidades requiere compromiso no sólo de parte del marco normativo y su seguimiento, sino de las empresas, del personal que labora en los centros de trabajo, de las personas encargadas de la formación de los futuros profesionales del sector, de los recién egresados, egresadas y estudiantes, además de capacitación continua, mentalidad abierta, cambio de perspectiva y liderazgo consciente para construir el entorno laboral que llevará a México a una transición realmente equitativa y sostenible.

## **4.8 Cambio climático y huella de carbono**

Un tema de gran relevancia dentro del sector minero es el cambio climático que se define como las variaciones a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos; de acuerdo con ICMM representa un desafío global crítico que requiere una respuesta global urgente, y su enfoque se debe centralizar en la descarbonización y adaptación.

Si lo analizamos bien, sus efectos se manifiestan tanto en los procesos productivos como en las comunidades y ecosistemas donde se encuentra la operación, ya que, las variaciones de



temperatura, las sequías y las lluvias extremas afectan la disponibilidad de agua, la estabilidad del terreno y de los taludes o depósitos de residuos, además de la infraestructura, generando riesgos operativos y mayores costos. A la par, la minería es una actividad que hace uso intensivo de energía y con ello se incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que enfrenta un gran desafío hacia la transición de esquemas de producción descarbonizados y sostenibles.

En el contexto industrial existe un indicador clave que a su vez es muy relevante en la minería; se conoce como **huella de carbono**, la cual consiste en medir la cantidad total de gases de efecto invernadero (principalmente CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) e identificar las principales fuentes de emisiones directas e indirectas.

Las empresas que tienen operaciones en México han tomado este indicador como base para la implementación de acciones que se alineen con estándares globales, entre las que se encuentran:

- Generación de energía eléctrica de fuentes renovables.
- Reconversión o sustitución de equipos para uso más eficiente de la energía.
- Programas y campañas de reforestación para coadyuvar a la captura de carbono.

La medición de la huella de carbono y la descarbonización reflejan la creciente responsabilidad ambiental que enfrenta la industria frente al cambio climático.

#### **4.8.1 Fuentes de emisiones**

Comprender las principales fuentes de emisiones resulta fundamental para establecer estrategias de mitigación efectivas y alineadas con los compromisos climáticos nacionales. En el caso del sector minero, estas emisiones se derivan de actividades que demandan gran cantidad de energía y recursos, lo que refuerza la necesidad de avanzar hacia modelos productivos más eficientes y sostenibles. Las principales fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) en la minería son:

- Quema de combustibles fósiles.
- Consumo de electricidad.
- Emisiones fugitivas.
- Procesamiento y tratamiento de minerales.

Internacionalmente se ha estandarizado una clasificación que permite entender en mayor medida los distintos tipos de emisiones directas e indirectas, además de medir, reportar y gestionar las emisiones GEI de empresas, instituciones y gobiernos. Esta clasificación se realiza en *alcances "scopes"* (Figura 4.45) y fue establecida por el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (*GHG Protocol, n.d.*).

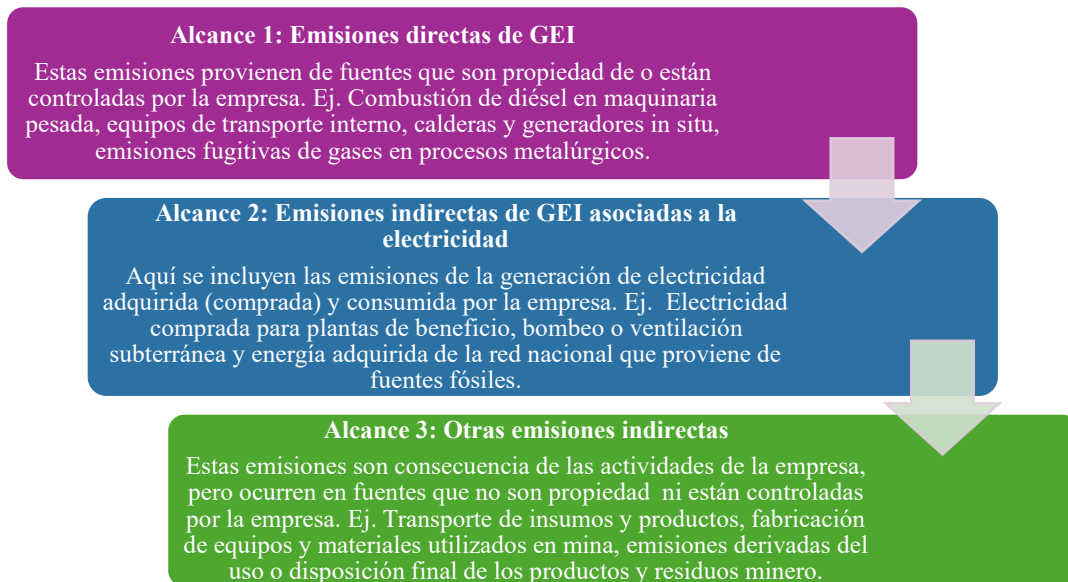


Figura 4. 45. Clasificación de los alcances de emisiones GEI. Fuente: Elaboración propia a partir de Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG Protocol, n.d.).

A partir de este conocimiento, las empresas mineras han clasificado y gestionado sus emisiones, permitiendo establecer acciones más efectivas de mitigación y llevando la operación a una gestión ambiental sostenible.

#### **4.8.2 Estrategias y acciones de mitigación internacional**

El sector minero se alinea con los compromisos del Acuerdo de París, la Agenda 2030 y los principios establecidos por ICMM mediante la adopción de estrategias orientadas a la reducción de emisiones, eficiencia de recursos, responsabilidad social y ambiental.

La minería en el marco del Acuerdo de París busca contribuir a mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C, a través de acciones como el uso de energías renovables, optimización del recurso energético, incorporación de tecnologías de baja emisión y gestión mejorada de residuos para lograr la descarbonización de sus operaciones.

Por su lado, la Agenda 2030 encuentra en la minería un actor clave para el cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los que destacan ODS 7, 12 y 13. Por último, pero no menos importante se encuentran los principios que se encuentran establecidos en las declaraciones de posición del ICMM (Figura 4.46).

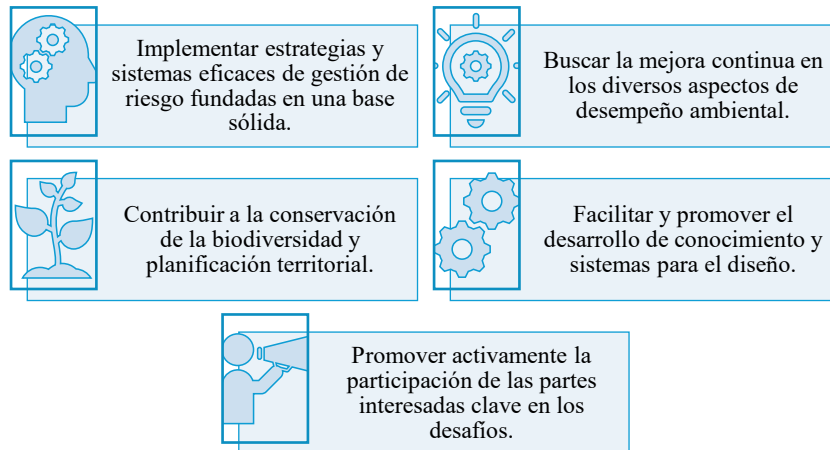


Figura 4. 46. Principios de minería del ICMM relevantes para cambio climático. Fuente: Elaboración propia a partir de Declaraciones de Posición (ICMM, 2021).

Al basarse en los compromisos y principios establecidos el sector minero contribuye a construir una industria más inclusiva, eficiente y ambientalmente responsable, que se alinea con las expectativas internacionales de sostenibilidad y resiliencia climática.

Tomando estos principios como un parte aguas, diversas operaciones en otras naciones del mundo han aplicado con éxito acciones de descarbonización, tal es el caso de la mina Diavik ubicada en Canadá que opera actualmente la mayor planta de energía híbrida eólica-diésel (Figura 4.47), la cual opera a  $-40^{\circ}\text{C}$  y abastece el 52% de las necesidades energéticas de la operación desde septiembre de 2012 reduciendo en un 6% las emisiones de gases efecto invernadero (Natural Resources Canada, 2014).



Figura 4. 47. Planta de energía híbrida eólica-diésel para suministro de la mina Diavik, Canadá. Fuente: Diavik Diamond (Natural Resources Canada, 2014).



Por su parte, en Finlandia se han llevado a cabo estrategias como en la unidad Terrafame, Sotkamo que llevó a cabo una reestructuración de operaciones, optimización de procesos y enfoque orientado hacia la producción de químicos para baterías con baja huella de carbono, logrando una reducción de 9,000 toneladas de CO<sub>2</sub>eq (Terrafame, 2025).

En la misma línea, unidades mineras en Australia se han sumado a los estándares globales, tal es el caso de Fortescue en Pilbara que adquirirá más de 100 unidades de maquinaria pesada (cargadoras de ruedas eléctricas a batería, bulldozers de ruedas, camiones cisterna, tractores de plataforma flotante y motoniveladoras) de cero emisiones con el fabricante XCMG para iniciar el despliegue a partir de 2026, alcanzando con ello la descarbonización de las operaciones de hierro y la eliminación de emisiones de alcance 1 y 2 (Fortescue, 2024). A su vez, la empresa Liontown Resources en el proyecto de Kathleen Valley puso en marcha la central eléctrica híbrida de 95 MW (Figura 4.48), de los cuales 30 MW provienen de cinco turbinas eólicas, un campo solar fotovoltaico de eje fijo de 16 MW, un sistema de almacenamiento de energía en baterías de 17 MW/ 19MW, 27 MW de generación de gas y 5 MW de generación diésel de reserva; con ello, 67% del total de energía requerida provino de energías renovables; consolidándose así como un referente en la implementación de energía renovable en minería (Liontown, 2024).



Figura 4. 48. Se observa al fondo las turbinas eólicas, a la izquierda el campo de energía solar fotovoltaica y las instalaciones del proyecto de litio Kathleen Valley. Fuente: FY24 ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE REPORT (Liontown, 2024).

Cabe destacar que, en América Latina también se han implementado técnicas de descarbonización, tal es el caso de Perú específicamente en la operación Quellaveco perteneciente al grupo Anglo American que en 2023 alcanzó el abastecimiento total de su electricidad desde fuentes renovables mediante un acuerdo de suministro (PPA Verde) con

Engie, la energía proviene de la Central Eólica Punta Lomitas (Figura 4.49) con capacidad nominal de 260 MW (*Anglo American, 2024*).



*Figura 4. 49. Central Eólica Punta Lomitas que abastece de energía a la operación Quellaveco. Fuente: Central Eólica Punta Lomitas entra en operación comercial (ENGIE, 2023).*

Al mismo tiempo, la operación Cerro Verde, Perú tiene acuerdos de compra de energía renovable con Engie Energía Perú S.A. y Electroperú S.A. que le permitirá cubrir su demanda eléctrica a partir de 2026 logrando la reducción de las emisiones de alcance 2, a su vez, para alcanzar sus objetivos de emisiones cero han comenzado a transitar mediante la implementación de equipo eléctrico autónomo y móvil, equipos de apoyo híbridos, entre otros (*Cerro Verde, 2024*).

Por su parte, Codelco y Antofagasta ambas con operaciones en Chile han incorporado tecnologías en sus equipos con el fin de reducir emisiones de alcance 1, esto se ha conseguido mediante soluciones como la carga dinámica, baterías eléctricas, hidrogeno verde y combustible sintético; además todas las operaciones cuentan con contratos de energía renovable desde 2022 (*Antofagasta, 2021*). De manera complementaria, la mina Collahuasi en Chile y el productor de energía solar de Sonnedix firmaron un acuerdo vinculado a la construcción de un parque solar fotovoltaico (Figura 4.50) que suministrará 150 GWh completando una matriz a 100% renovable (*COLLAHUASI, 2020*).



Figura 4. 50. Parque solar fotovoltaico que suministra energía a Collahuasi. Tomada de Collahuasi y Sonnedix firman contrato por 150 GWh de energía solar y el primero en Chile con respaldo de baterías (COLLAHUASI, 2020).

Tras analizar las prácticas internacionales en materia de cambio climático y descarbonización, se reconoce la adopción de políticas climáticas claras como un factor determinante para impulsar la transición hacia operaciones más sostenibles.

#### **4.8.3 Estrategias y acciones de mitigación en México**

En el caso específico de México, este compromiso se refleja en la existencia de marcos normativos y estratégicos como la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), los cuales sirven para orientar a los sectores productivos, incluida la minería, hacia la reducción de emisiones y la adaptación a los efectos del cambio climático. Si bien se habla de acciones llevadas a cabo internacionalmente como:

- Transición a energías renovables.
- Electrificación de flotas mineras (vehículos BEV).
- Sistemas de ventilación inteligente y eficiencia energética.
- Recuperación y aprovechamiento de calor residual.
- Programas de compensación de carbono y reforestación.

En el país sólo algunas empresas mineras han implementado acciones de mitigación, tal es el caso de Peñoles que ha migrado las cargas de Termoeléctrica Peñoles al mercado eléctrico mayorista (MEM), además sus operaciones La Herradura, Fresnillo flotación de hierro y Juanicipio migraron al MEM con un contrato de cobertura del campo eólico Mesa La Paz (Peñoles S.A.B. de C.V., 2024). A la par, se encuentra la Refinería Electrolítica de Zinc perteneciente a Grupo México en San Luis Potosí, que hizo una transición energética, entre

energía eólica proveniente del parque Fenicias (Figura 4.51) y otras fuentes alternas (*Grupo México, 2025*).



Figura 4. 51. Parque eólico Fenicias, que abastece la Refinería Electrolítica de Zinc en SLP. Fuente: Informe de sostenibilidad (*Grupo México, 2025*).

Por otro lado, en operaciones como Media Luna perteneciente a Torex Gold Resources se ha implementado el uso de equipos eléctricos de batería y el sistema RopeCon (Figura 4.52) que además de transportar mineral de un punto a otro también regenera y reutiliza energía eléctrica (*Torex Gold Resources, 2025*).



Figura 4. 52. Sistema RopeCon implementado en las operaciones de Torex Gold Resources en México. Fuente: 2024 RESPONSIBLE GOLD MINING REPORT (*Torex Gold Resources, 2025*).



Otro ejemplo, se desarrolla en operaciones como Santa Elena y La Encantada de First Majestic Silver en las que se logró la transición del uso de gasóleo al uso de gas natural licuado; por su parte la operación San Dimas cubre entre el 60%- 70% de los requerimientos eléctricos de la operación minera a través de la energía proveniente de la Planta Hidroeléctrica Las Truchas (Figura 4.53) (*First Majestic Silver, 2024*).



Figura 4. 53. Planta Hidroeléctrica Las Truchas, que abastece de energía la operación San Dimas en Durango. Fuente: Central Hidroeléctrica “Las Truchas” (SESELEC, 2009).

La finalidad de conocer y analizar las acciones implementadas evidencia que existe un cambio de paradigma dentro del sector minero mexicano, en el que el concepto de descarbonización de operaciones y sostenibilidad han pasado a formar parte de un eje estratégico de competitividad y legitimidad ambiental y social.

Pesé a los avances observados y analizados, el proceso de descarbonización del sector minero en México enfrenta importantes desafíos estructurales, entre los que destacan la alta dependencia de la energía fósil, la limitada infraestructura eléctrica en regiones mineras y los costos elevados que implica hacer una transición a energías renovables o limpias. No obstante, el contexto actual ofrece oportunidades favorables impulsadas por la presión de los mercados internacionales, la incorporación de criterios ESG y la creciente alineación con los estándares internacionales, entre las que destacan la integración de modelos económicos con bajas emisiones en carbono, innovación en materiales, gestión energética y la necesidad de incorporar estas acciones a nivel nacional para consolidar una industria minera baja en emisiones capaz de equilibrar las esferas de la sostenibilidad.

Este tema tan relevante no debe entenderse como una meta ambiental, más bien, se le debe dar la importancia de ser una transformación estructural hacia un modelo energético resiliente



y competitivo, el cual requiere de responsabilidad y compromiso coordinado entre las partes interesadas.

## 4.9 Innovación tecnológica para la sostenibilidad

La innovación tecnológica actualmente es un pilar base para alcanzar la sostenibilidad en la industria minera; la adopción y adaptación de nuevas tecnologías permite entre otras cosas tener un mejor desempeño y eficiencia en los procesos productivos, reducir el impacto ambiental y mejorar la relación con las comunidades y los grupos de interés. En esta dirección, la automatización y digitalización de procesos no solo incrementan la producción, sino que se alinean permitiendo la recolección y análisis de datos en tiempo real facilitando la toma de decisiones y a su vez, fortalecen el compromiso del sector con los principios y estándares globales.

### 4.9.1 Áreas de aplicación

En el sector minero, la innovación tecnológica no se centra ni se desarrolla en un solo frente, sino que se manifiesta en múltiples frentes y se adapta a las condiciones de factibilidad de la unidad sobre la que se lleve a cabo. Los rubros sobre los que la innovación tecnológica ha avanzado de acuerdo con la página web *HSE Tools (2024)* se enlistan a continuación:

- **Automatización y digitalización:** Es uno de los avances más notables, se puede observar materializado en maquinaria autónoma, reducción de emisiones GEI, monitoreo en tiempo real, recolección y análisis de datos de forma precisa y reducción de accidentes graves o fatales.
- **Minería de precisión:** Utiliza tecnologías avanzadas como drones, sensores y sistemas de posicionamiento global (GPS) para mapear y analizar yacimientos con gran exactitud, además de optimizar la extracción de minerales.
- **Energías renovables:** En las últimas décadas las empresas han estado incorporando fuentes de energía renovable para reducir la dependencia de combustibles fósiles, además de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.
- **Recuperación y reciclaje de minerales:** A través de esta práctica se maximiza la extracción de minerales de valor económico presentes en depósitos de residuos mineros aliviando la presión sobre los ecosistemas y disminuyendo la cantidad de pasivos ambientales.
- **Preservación ambiental:** Gestada por la implementación de tecnologías de tratamiento de agua, disposición segura de materiales tóxicos y peligrosos, incorporación de los jales a la economía circular y la rehabilitación de ecosistemas afectados por las operaciones.
- **Monitoreo ambiental continuo:** Gestionado a través de sensores y tecnologías de monitoreo en tiempo real (IoT) que permiten una acción inmediata ante cualquier afectación.



- Software especializado: Soluciones integrales que pueden ir desde la automatización en procesos de extracción y beneficio hasta el monitoreo ambiental y social, permitiendo que las operaciones operen con máxima eficiencia y sostenibilidad.
- Inteligencia Artificial (IA) para análisis predictivo: La IA apoya a través de la identificación de patrones de desgaste y fallas mecánicas antes de que estas sucedan.
- Simuladores de operación para capacitación: Estos entrenan al personal en entornos virtuales realistas sin interrumpir la producción ni arriesgar al personal o los equipos.

Estas tecnologías optimizan los procesos productivos y permiten que las operaciones sigan evolucionando y respondiendo a los principios de seguridad, rentabilidad y sostenibilidad.

#### 4.9.2 Avances en México

En el contexto nacional, diversas empresas mineras han comenzado a implementar innovaciones tecnológicas para fortalecer su desempeño ambiental y social, tal es el caso de la unidad minera Peñasquito en Zacatecas que implementó un centro de control de mina (Figura 4.54), conocido como *dispatch*, con el que se busca coordinar en tiempo real las operaciones de palas, camiones y cargadores; usa GPS y conexión Wi-Fi para supervisar cada equipo (*MINERÍA EN MÉXICO, 2025*).

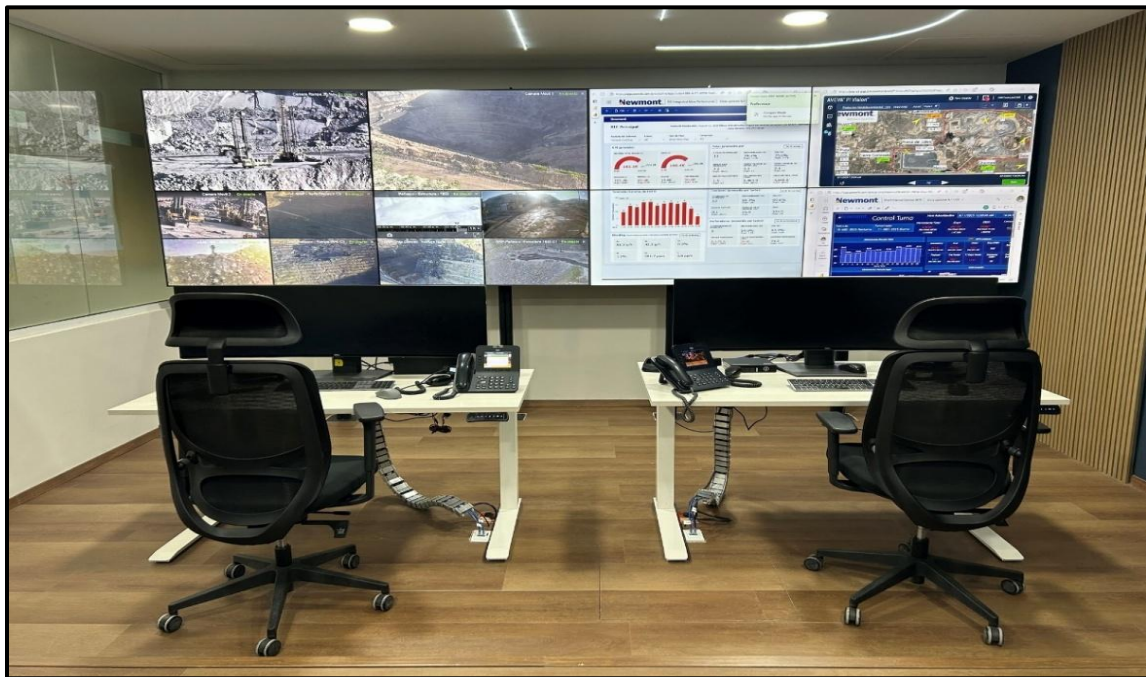


Figura 4. 54. Centro de control de operaciones de unidad minera Peñasquito. Fuente: Minera Peñasquito inaugura nuevo Centro de Control (Mundo Minero, 2025).

Por su parte, en las operaciones de Peñoles y Fresnillo Plc se extendió la instalación de sistemas de voladura remota (Figura 4.55), telemetría de camiones de acarreo de mineral y sensores de somnolencia y fatiga en los equipos de transporte; también se continúa con la exploración de tecnologías emergentes libres de emisiones, como el hidrógeno y amoniaco

verde; además de la adopción de inteligencia artificial, machine learning y ubicaciones en tiempo real de los colaboradores en turno en algunas de sus unidades (Peñoles, 2024).



Figura 4. 55. Voladura remota en la unidad Fresnillo, Zacatecas. Fuente: Fotografía por Danna Sánchez.

Cabe destacar también que, en las operaciones mineras de Grupo México se han adoptado prácticas como el sistema LTE que permite una mejor comunicación dentro y fuera de las minas, el uso de maquinaria y vehículos autónomos para reducir los riesgos laborales y aumentar la producción; se desarrollan sistemas automatizados de perforación y centros de operaciones remotos, la incorporación de la tecnología InSAR (Interferometría radar de apertura sintética) para monitoreo de los desplazamientos de las cortinas de los depósitos de jales, tajos, terreros y tepetateras y actualmente usan herramientas de IA (Inteligencia Artificial) para la detección de problemas, prevención de accidentes y optimización de recursos (Grupo México, 2025).

Los casos presentados anteriormente muestran que el sector minero en México ha dado pasos importantes en el sentido de innovación tecnológica, sin embargo, este avance ha sido desigual, debido principalmente a las limitaciones que tiene la mediana y pequeña minería para adoptar tecnologías de punta; esto deja en evidencia la necesidad de ampliar la adopción tecnológica a más unidades mineras y fortalecer los marcos colaborativos.

#### **4.9.3 Retos y perspectivas**

Su implementación enfrenta desafíos vinculados a la operación como los grandes costos, falta de personal capacitado, inversión en infraestructura específica que requiera la tecnología que se desea adoptar, transformación de las enormes cantidades de datos en información útil en tiempo real para una toma de decisiones rápida y efectiva, brecha entre las grandes corporaciones y medianas o pequeñas operaciones mineras y el posible riesgo de



obsolescencia rápida de equipos; pero también se vinculan a cuestiones culturales del sector como la mentalidad conservadora, estructuras verticales y burocracia de la industria que ralentizan la innovación, esto sumado a la falta de colaboración entre las empresas mineras, los proveedores de tecnología y los centros de investigación.

Pese a esto, las oportunidades que ofrece el panorama son sustanciales, desde la optimización de procesos productivos, la reducción de la huella ambiental, el aprovechamiento eficiente de residuos mineros, hasta el fortalecimiento de la seguridad y salud ocupacional, en estricto sentido se requiere de colaboración entre todas las unidades mineras grandes, medianas o pequeñas para implementar, fortalecer y consolidar una minería innovadora.

#### **4.10 Transparencia y acceso a la información**

Este eje se considera un pilar en el concepto de minería sostenible, ya que, se relaciona con la capacidad de las personas para obtener y defender derechos fundamentales con respecto a los recursos y al mismo tiempo permite que las empresas generen confianza con las comunidades y las autoridades, a la par de que las operaciones se desarrollen bajo principios de respeto y rendición de cuentas.

De acuerdo con *Breaking New Ground: Mining, Minerals and Development (2002)* el acceso a la información es instrumento de educación y empoderamiento, debido a que:

- Los empleados necesitan información para ejercer sus derechos y contribuir de manera segura y productiva al progreso de la empresa.
- La industria necesita información para educar a los empleados y a la gerencia en las nuevas tendencias, salud y seguridad y en las limitaciones y oportunidades dentro de las empresas.
- Las empresas y otros actores sociales anteponen la información ambiental para decidir si se puede o no iniciar una mina.
- Las comunidades tienen necesidades de información especialmente decisivas sobre otros actores involucrados en todas las etapas del ciclo de los minerales, debido a los desequilibrios de poder existentes entre las comunidades y otros actores.
- Las ONG y otros grupos de la sociedad civil también requieren información para poder educar a otros acerca de las actividades de los proyectos mineros, las empresas y los gobiernos.

La información que brindan las empresas es utilizada por una amplia gama de sectores, esto se hace habitualmente por medio de procedimientos basados en indicadores definidos y técnicas de medición y trae consigo tanto para quien las brinda como para quien hace uso de ellas una serie de responsabilidades sociales, económicas, legales y políticas; no obstante esta acción no implica una comunicación intersectorial, esta depende de diversos factores que van desde las creencias de las comunidades hasta la restricción financiera que tienen las operaciones. Por tal motivo, la transparencia, acceso a la información y la correcta



comunicación debe verse desde la perspectiva empresarial como un punto clave para generar mayor confianza, reducción de costos, mejor retroalimentación, menores riesgos, uso más eficaz de recursos y creciente prestigio (IIED, 2002).

#### **4.10.1 Avances en México**

En los últimos años, México ha mostrado avances significativos en este rubro, impulsados por la necesidad de fortalecer la rendición de cuentas y la confianza pública dentro del sector minero. Tomando como referencia los lineamientos internacionales, el sector minero mexicano ha tenido iniciativas de colaboración a través de la publicación de los informes anuales e informes de sostenibilidad que gestionan los ejes ambiental, social y económico. En México la gestión de la información se realiza en grandes y medianas empresas a través de:

- *Informes anuales*: Enfocados en el desempeño financiero y corporativo, incluyen información sobre producción, ventas, inversiones, proyectos en desarrollo, estrategias de crecimiento y competitividad, gestión de riesgos, cumplimiento normativo, indicadores de productividad, costos y rentabilidad; se publican en sus portales electrónicos oficiales durante el primer trimestre del año corriente.
- *Informes de sostenibilidad*: Enfocados en el desempeño ambiental, social y de gobernanza, incluye información sobre gestión ambiental (agua, energía, emisiones y residuos), huella de carbono y estrategias de descarbonización, seguridad y salud ocupacional, derechos humanos y relaciones laborales, inclusión, y diversidad laboral, relación con las comunidades, cumplimiento y avance en los ODS, transparencia, ética y rendición de cuentas; se publican en sus portales electrónicos oficiales a la par del informe anual.
- *Informe Anual de la Cámara Minera de México*: Este documento contiene una visión sectorial y datos agregados de la minería nacional metálica y no metálica, contiene información acerca del panorama económico y la producción minera nacional, aportación del sector al PIB, inversión extranjera y nacional, indicadores ambientales (emisiones, energía y agua), avances en seguridad industrial y capacitación, acciones de responsabilidad social y comunitaria, entre otros.

Además, las unidades mineras informan de manera previa y fundamentada sobre los impactos sociales, económicos y ambientales a las comunidades afectadas antes de otorgar títulos o iniciar operaciones, a través de foros de consulta o audiencias públicas, entrega de informes comunitarios, reuniones de transparencia y rendición de cuentas.

No obstante, en México existen múltiples empresas mineras artesanales y pequeñas, las cuales no cuentan con capacidad de inversión y por lo tanto su estructura de gobernanza suele ser inestable o nula, consiguiendo que la transparencia y acceso a la información no sea favorable para las comunidades en que se desarrolla. Aunque, durante la última década se han implementado esfuerzos y avances puntuales impulsados por el gobierno, organismos



internacionales, ONG y asociaciones locales para formalizar y transparentar acciones, como (*EITI, 2023*):

- Registro y regularización ante la Secretaría de Economía (SE).
- Cumplimiento de normativas ambientales y laborales básicas, en casos de formalización parcial.
- Conocimiento y participación en proyectos piloto de formalización y sostenibilidad, en los que se incluyan mecanismos de transparencia en ingresos, trazabilidad de minerales y reportes comunitarios.
- Realización de asambleas abiertas o reportes comunitarios sobre la producción y los beneficios sociales de la actividad.
- Adopción de principios del EITI (Iniciativa para la Transparencia en las Industrias Extractivas por sus siglas en inglés), en regiones en las que se busca integrar la MAPE (Minería Artesanal y de Pequeña Escala) a cadenas de valor formales.

En este sentido, se espera la correcta integración de la MAPE en los marcos productivos y legales formales para que la transparencia y rendición de cuentas sean equitativas en todos los niveles de la industria minera y así se fortalezcan como pilares de la sostenibilidad.

#### **4.10.2 Retos y perspectivas**

Diseñar y mejorar políticas, procedimientos, procesos e instituciones para tratar efectivamente la creciente demanda de las sociedades para obtener información es uno de los principales desafíos que enfrenta la industria minera nacional, no obstante no es el único, otros desafíos son la falta de confianza en la investigación generada por la industria, con frecuencia considerada parcial y diseñada para destacar los beneficios de un proyecto (*IIED 2002*), en segundo lugar, la divulgación conlleva riesgos como las repercusiones legales y financieras para las empresas y otros interesados, en tercer lugar, los actores de la sociedad civil pueden sentirse indefensos económicamente para generar información del nivel que manejan empresas y gobiernos, a su vez, la sociedad civil puede carecer de recursos para abordar temas o participar de manera significativa en debates largos y verificar información, además empresas y gobiernos deben generar la capacidad para mejorar la calidad de los datos de evaluación, estos deben superar debilidades como la comparabilidad, verificación, costo y reconocimiento del liderazgo.

Sin embargo, debe considerarse que México ha tenido un buen avance en este sentido y que si bien existen algunos puntos por atacar completamente, también existen grandes oportunidades a las que el mismo avance ha permitido el paso, tal como el fortalecimiento del marco normativo, implementación y enseñanza de tecnologías emergentes, mayor integración entre gobierno, empresas y sociedad civil, fortalecimiento de la confianza social a través de una rendición de cuentas más clara y tendencia hacia el desarrollo de capacidades institucionales y comunitarias para interpretar la información pública.



Cabe destacar que, al existir mayor disponibilidad de información y medios de difusión adecuados al alcance de todos, existen mayores posibilidades de atacar los problemas y robustecer las bases con las que actualmente se cuenta; generando mayor confianza y legitimidad de parte de los interesados y habilitando mejores procesos de toma de decisiones y participación informada.

## **4.11 Gobernanza y cumplimiento regulatorio**

De acuerdo con *CEPAL (2021)* la gobernanza se entiende como la realización de relaciones entre diversos actores involucrados en el proceso de decidir, ejecutar y evaluar asuntos de interés público, por tal razón, el hecho de que una empresa minera cuente con un sistema de gobernanza eficiente es un reto en el cual la industria ha avanzado en las últimas décadas y que, si bien no es el ideal, se encuentra en constante cambio para lograr una mejora en los ejes estratégicos de la sostenibilidad.

La gobernanza y el cumplimiento regulatorio son elementos centrales que permiten que la industria se desarrolle bajo criterios de sostenibilidad y responsabilidad. Las crecientes exigencias sociales y regulatorias han llevado a que las empresas dentro del sector tengan la responsabilidad de adoptar sistemas más robustos, transparentes y alineados con estándares nacionales e internacionales.

### ***4.11.1 Evolución del marco regulatorio en México***

La gobernanza en México es caracterizada por el avance gradual que ha tenido; actualmente el país cuenta con mecanismos relativamente sólidos para la gestión pública, entre los principales se encuentran:

1. Legislación: Funge como un nivelador entre el comportamiento responsable de las empresas y los derechos de la minoría. Requieren de organismos eficaces que las monitoreen. Relacionadas al sector minero se encuentran:
  - Ley de Minería.
  - Ley de Inversión Extranjera.
  - Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
  - Ley de Aguas Nacionales.
  - Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
  - Ley General de Desarrollo Forestal.
  - Normas Oficiales Mexicanas (NOM).
  - Normas Mexicanas (NMX).
  - Ley Federal del Trabajo.
  - Ley Federal de Derechos.
  - Ley del Impuesto Sobre la Renta (ISR).



- Ley de Consulta Previa, Libre e Informada (no consolidada como ley federal).
  - Ley General de Derechos Humanos.
  - Ley General de Cambio Climático.
2. Convenios internacionales: Documentos que abordan temas específicos globales que, si bien tienen objetivos legales, no disponen de mecanismos para asegurar que se lleven a cabo. En el contexto minero internacional se encuentran (*IIED, 2002*):
- Convenio de Aarhus (1998).
  - Convenio de Lucha Contra la Corrupción de Agentes Públicos Extranjeros en las Transacciones Comerciales Internacionales, (OCDE) (1997).
  - Convenio sobre Seguridad y Salud en las Minas de la OIT (1995).
  - Convenio de las Naciones Unidas Sobre Diversidad Biológica (1992).
  - Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992).
  - Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación (1989).
  - Convenio N° 169 sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes de la OIT (1989).
  - Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (1987).
  - Convenio sobre Patrimonio Mundial (1972).
3. Estándares y criterios: Son una herramienta útil para quienes desean un enfoque de orden y control. En México, la industria ha adaptado los siguientes:
- Global Reporting Initiative (GRI).
  - ISO 14001 Sistemas de Gestión Ambiental.
  - ISO 14064 Cuantificación de emisiones GEI.
  - ISO 45001 Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo.
  - International Council on Mining and Metals (ICMM).
  - Towards Sustainable Mining (TSM).
  - Estándar Global de Gestión de Jales.
  - Extractive Industries Transparency Initiative (EITI).
  - Agenda 2030.
4. Acuerdos voluntarios: Pactos realizados entre los interesados dentro del sector, tienden a ser flexibles, pero también en muchas ocasiones no todas las empresas los cumplen.

En México la implementación de los convenios y estándares ha sido desigual, ya que cada empresa los adapta de acuerdo con sus necesidades, tamaño de operación y al estatus que quiera proyectar, por lo tanto, no existe una fecha exacta del momento de su adopción; sin embargo, en el caso del marco normativo mexicano, la pauta sobre el cumplimiento por parte del sector es a partir de la promulgación del mismo, como se observa en la Figura 4.56.

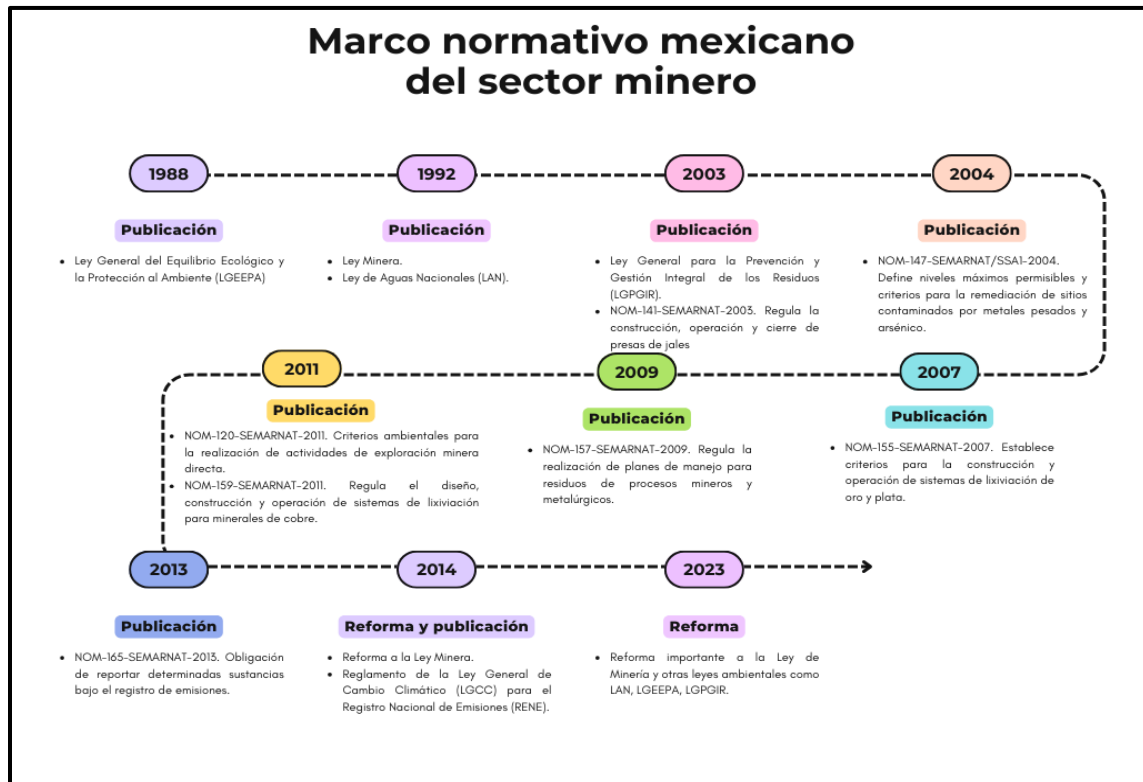


Figura 4. 56. Marco normativo aplicable al sector minero. Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida del DOF.

Si bien existen leyes, convenios y estándares de los que la industria minera mexicana hace uso, existe una gran interrogante, ¿realmente hay un mecanismo que vigile, monitoree y controle las acciones que realiza la industria?, esta surge a partir de la percepción que se tiene sobre la implementación desigual, consecuencia de las brechas de coordinación entre niveles de gobierno, las capacidades financieras y de conocimiento limitadas a nivel local y la fragmentación multidisciplinaria.

En este sentido, la minería a gran y mediana escala ha tenido un avance significativo, adoptando enfoques más sólidos que garantizan la transparencia, la rendición de cuentas y la gestión de impactos socioambientales. Entre los avances más comunes destacan:

- Implementación de sistemas de gestión ambiental.
- Identificación de los procesos que provocan mayor huella de carbono.
- Evaluación de escenarios de descarbonización y análisis de sensibilidad.
- Procedimientos de relaciones con el gobierno.
- Políticas de Igualdad Laboral y no Discriminación.
- Códigos de conducta y talleres de integridad.
- Mecanismos de consulta y participación ciudadana.
- Adopción de estándares internacionales.
- Sistemas de evaluación de riesgos, cumplimiento normativo y reportes de sostenibilidad.



- Mecanismos de atención de quejas y reclamaciones.
- Códigos de ética y políticas anticorrupción.
- Sistemas de ciberseguridad.
- Gestión de auditorías internas o externas.
- Políticas de gestión de jales, seguridad y salud en el trabajo.
- Políticas de protección de datos personales.
- Políticas de cambio climático.
- Iniciativas de cierre y postcierre de operaciones.

Por otro lado, debemos hablar de la minería artesanal y en pequeña escala, ya que la implementación y adopción de criterios de gobernanza no ha sido la misma que en las mineras grandes y medianas, las principales acciones de las que se tiene conocimiento se centran en:

- Transición gradual hacia procesos de formalización.
- Mecanismos locales de organización colectiva.
- Sistemas de trazabilidad y certificación responsable.
- Mecanismos comunitarios de monitoreo ambiental.
- Sistemas de seguridad y prácticas laborales.
- Procesos de diálogo entre comunidades, autoridades y pequeños mineros.

Estos avances señalan la transición hacia una minería artesanal y en pequeña escala más organizada, visible, regulada, social y ambientalmente responsable. Sin embargo, esto depende del fortalecimiento en las políticas públicas y el reconocimiento del sector.

Finalmente, existen dos aspectos importantes que se deben señalar, el primero de ellos es que la participación de las comunidades y la sociedad civil son un componente fundamental de la gobernanza porque asegura que las decisiones se tomen de forma legítima e informada, además, se incorporan conocimientos que en muchas ocasiones son parte de la tradición y cultura de las poblaciones y que, por lo tanto, las empresas desconocen. El segundo, consiste en abrir el diálogo respecto a si la industria minera en nuestro país ¿realmente se encuentra alineada en todos los sentidos con los estándares internacionales? O más que una alineación total, ¿es una alineación parcial y en proceso de consolidación?, debido a que las soluciones estandarizadas no proveen un desempeño óptimo.

#### ***4.11.2 Retos y perspectivas***

La gobernanza y el cumplimiento regulatorio enfrentan desafíos que limitan la capacidad del estado y del sector productivo para garantizar operaciones responsables y alineadas con estándares internacionales. Entre los retos más persistentes destacan el marco regulatorio fragmentado, la desigualdad dentro del sector marcada entre la minería a grande y mediana escala y la minería artesanal y en pequeña escala, la falta de empatía por parte de las unidades para comunicar de manera libre y clara cualquier acción o decisión que se tome y que pueda



---

afectar a la comunidad, sociedad civil y al entorno, además de que la inestabilidad política afecta la viabilidad de los proyectos a largo plazo.

No obstante, también existen perspectivas favorables como la adopción de esquemas de certificación, pautas, códigos y políticas, informes corporativos, capacitación, participación de parte de los interesados, digitalización y monitoreo ambiental y social, actualización de buenas prácticas y normativa más acorde a las necesidades de la operación, del ambiente y de la sociedad.

Finalmente, la minería como un conjunto debe transitar al desarrollo sostenible siendo indispensable que exista una mayor simetría en la distribución de derechos y responsabilidades, riesgos y beneficios, entre otros. Para que teniendo algo más puntual se puedan tratar los problemas de interés nacional, con la comunidades, sociedad civil e interesados. En este sentido, analizar el avance dentro de la gobernanza permitió comprender cómo interactúan las disciplinas y los interesados que tienen por objetivo garantizar todas las etapas del proyecto de manera efectiva y así tener mejores bases para dar paso total a la minería moderna y sostenible.



---

## **CAPÍTULO 5**

# **OPORTUNIDADES PARA AVANZAR HACIA UNA MINERÍA SOSTENIBLE EN MÉXICO**

El presente apartado tiene por objetivo alejarse de la descripción de datos y resultados y en su lugar pretende adoptar un enfoque más reflexivo y prospectivo, desde una perspectiva que considera los hallazgos e innovaciones y el futuro de estos dentro del marco de sector minero sostenible.

Si bien, persisten aspectos que se deben abordar, es importante reconocer que el sector ha mostrado avances relevantes a través de la integración de estándares voluntarios, mejoras en transparencia y rendición de cuentas, inversión en tecnologías eficientes y seguras y sobre todo un creciente interés en el cierre responsable de operaciones. Estos pasos sólidos que ha dado la industria constituyen la base sobre la cual es posible transitar a cambios congruentes y de permanencia.

La transición hacia una minería sostenible es un proceso que constantemente cambia y debe adaptarse a partir de las necesidades de los ejes principales de la sostenibilidad (ambiente, sociedad y economía), por ello, no es exclusiva ni depende de un solo actor; exige la responsabilidad conjunta de empresas, autoridades, academia, sociedad, inversionistas, organización no gubernamental (ONGs) y organizaciones gremiales. Cada uno de los interesados juega un rol en la participación y creación de prácticas responsables, políticas efectivas y el fortalecimiento del conocimiento para la prevención de riesgos.

Además, en este capítulo se mencionan las áreas de mejora y los retos pendientes para transitar en su totalidad del compromiso a la acción dentro de la sostenibilidad. Desde una crítica constructiva que identifica los puntos que requieren fortalecimiento, los retos que emergen y las acciones que deben potenciarse para que el sector minero evolucione hacia modelos sostenibles y alineados a las expectativas sociales, ambientales y económicas contemporáneas.

### **5.1 Áreas de mejora en las prácticas empresariales**

En los últimos años ha habido cambios en el sector privado como los que se muestran en la Figura 5.1.



Figura 5. 1. Cambios dentro de la industria minera mexicana. Fuente: Elaboración propia.

Estas acciones guiadas inicialmente por cumplir con un requisito estratégico para sobrevivir, competir y mantener acceso a financiamiento, talento, comunidades y permisos han demostrado nacional e internacionalmente el interés que tienen las empresas por ser parte de un cambio dinámico que refleje su compromiso con el medio ambiente y la sociedad, a través de la innovación, consistencia y la cultura organizacional.

Por tal motivo, el sector privado tiene un papel central en la transición hacia una minería sostenible. Si bien, existen regulaciones mínimas con las que la industria cumple.

El verdadero cambio proviene de la capacidad de cada una de las empresas para ir más allá del cumplimiento normativo y la adopción de prácticas que permitan generar confianza, reducir riesgos y abrir caminos hacia formas más amigables de llevar a cabo la operación.




Debe tenerse claro que la transición hacia una minería sostenible no es uniforme en todo el sector, ya que es un proceso dinámico y adaptable de acuerdo con las condiciones de cada operación, sin embargo, así como existen criterios globales que se implementan dependiendo del contexto de cada operación, también existen áreas de mejora que se pueden adaptar o modificar, estas son propuestas desde una perspectiva crítica y con miras a lograr una transición total y efectiva del sector.

Una de las principales oportunidades está en transitar de una lógica que reacciona automáticamente a lo estrictamente requerido sin planificación mínima a una gestión proactiva que se base en la mejora continua y la prevención e identificación de riesgos a través de una planificación con antelación.

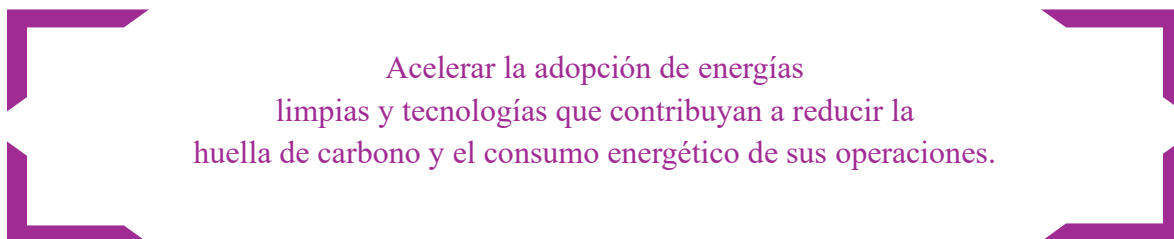


Por ello, en la Tabla 1 se presentan acciones estratégicas, junto con sus beneficios y posibles indicadores de evaluación, que las empresas mineras pueden considerar para avanzar hacia una gestión más proactiva de la sostenibilidad.

Tabla 1. Acciones, beneficios e indicadores propuestos para una transición hacia una gestión proactiva.

Acciones 	Beneficios 	Indicadores 
<p>Identificar y anticipar posibles eventos críticos antes de que generen un cambio significativo o irreversible, mediante evaluaciones socioambientales robustas y sistemas de monitoreo continuo, permitiendo una supervisión constante y una gestión preventiva durante todas las etapas del ciclo minero.</p>	<p>Las empresas fortalecen su resiliencia operativa, reducen costos a largo plazo o inesperados, protegen su reputación corporativa y gestionan de manera más uniforme su relación con las partes interesadas.</p>	<p><i>Índice de gestión proactiva de riesgos</i></p> <p>En el cual se haga una evaluación conjunta de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Porcentaje de anticipación ante un riesgo o problema.</li> <li>- Porcentaje de unidades operativas que cuenten con planificación preventiva.</li> <li>- Porcentaje de personal involucrado en procesos de mejora continua.</li> <li>- Número de mejoras operativas implementadas antes de incidentes.</li> <li>- Número de incidentes registrados por periodo.</li> </ul>




Por otra parte, la industria minera es un actor fundamental en la transición energética debido a su papel en la producción y transformación de minerales críticos, tiene la oportunidad de:


  
**Acercar la adopción de energías  
 limpias y tecnologías que contribuyan a reducir la  
 huella de carbono y el consumo energético de sus operaciones.**



En la Tabla 2 se presentan acciones, beneficios e indicadores que pueden contribuir a la transición hacia el uso de energías limpias y tecnologías más eficientes en la industria minera.

Tabla 2. Acciones, beneficios e indicadores pensados para la transición hacia energías y tecnologías limpias.

Acciones 	Beneficios 	Indicadores 
<p>Incrementar la electrificación de equipos móviles (BEV's), implementar sensores, y sistemas de automatización con inteligencia artificial, y sustituir progresivamente la energía convencional por fuentes renovables adaptadas a las condiciones de la región en la que se ubique el proyecto.</p>	<p>Se reduce la emisión de gases efecto invernadero y la huella de carbono energética de la operación. Asimismo, se mejora la eficiencia operativa, se fortalecen las capacidades de monitoreo y se incrementa la resiliencia de la unidad minera a largo plazo.</p>	<p><i>Índice de transición tecnológica y energética</i></p> <p>Este debe integrar la evaluación de la adopción de tecnologías limpias, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de equipos automatizados, eléctricos o híbridos por unidad operativa.</li> <li>- Reducción de emisiones por tonelada producida (tCO<sub>2</sub>e/t).</li> <li>- Porcentaje de procesos operativos digitalizados o automatizados.</li> <li>- Cobertura de sensores en infraestructura o sitios críticos.</li> <li>- Porcentaje de energía proveniente de fuentes renovables.</li> </ul>

Además de la transición hacia tecnologías más limpias, otro aspecto al que no debe restársele importancia es la gestión responsable de los residuos generados en el proceso productivo, particularmente los jales.

La gestión y valorización de jales constituye un tema central en la transición hacia una minería sostenible. En este contexto, las empresas tienen la responsabilidad de garantizar



la estabilidad física y química  
de los depósitos a lo largo de todo su ciclo de vida, así como  
de explorar alternativas más seguras y amigables para  
su almacenamiento y posible valorización.

Desde una visión proactiva, se propone que las empresas adopten un modelo de acciones orientado a mejorar la gestión de los jales, como se ilustra en la Figura 5.2.

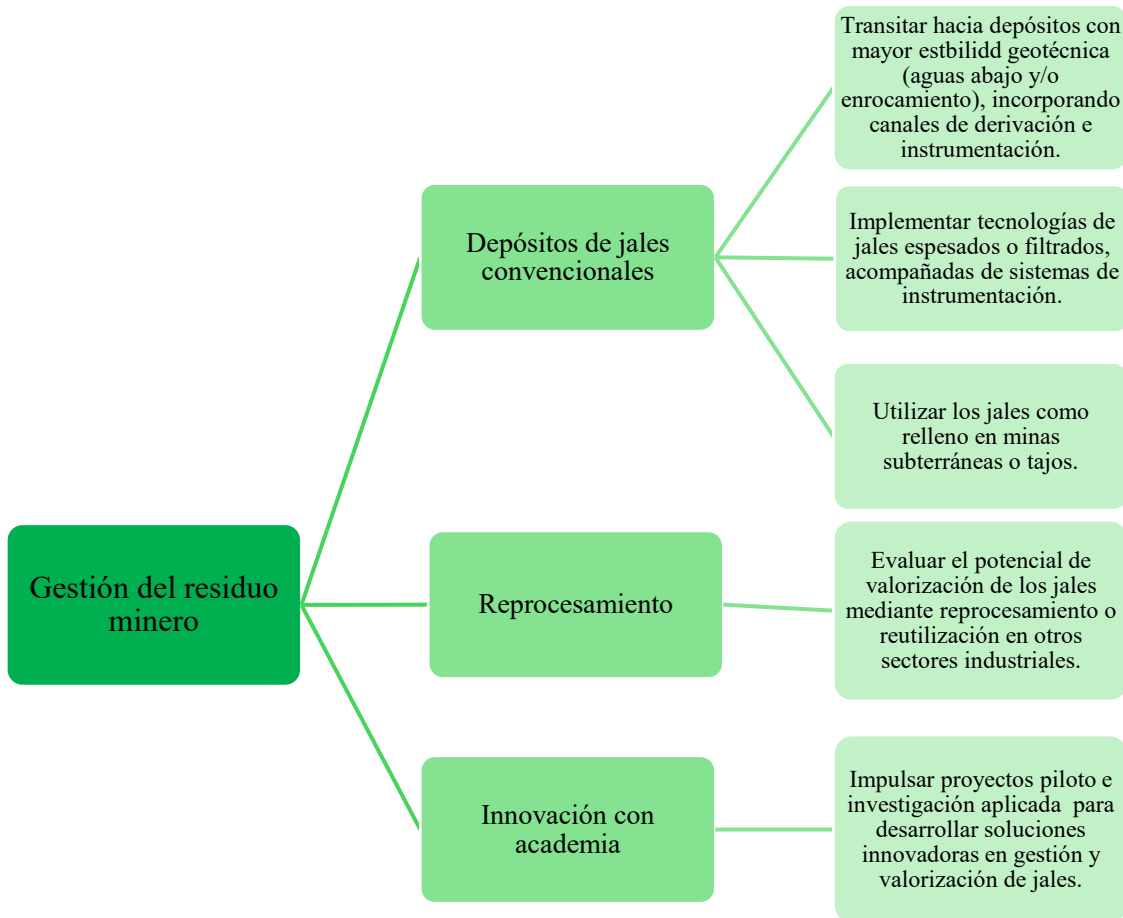




Figura 5. 2 Acciones estratégicas para la gestión sostenible y valorización de los jales en la industria minera. Fuente: Elaboración propia.

Estas acciones traen consigo beneficios a la empresa, los cuales pueden evaluarse a través de indicadores como los que se proponen en la Tabla 3.



Tabla 3. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones en la gestión de jales.

Beneficios 	Indicadores 
<p>Mediante la implementación de estas acciones, las empresas pueden reducir riesgos operativos y ambientales, optimizar costos asociados a la gestión de residuos, mejorar su competitividad en el mercado y fortalecer su relación con las comunidades.</p>	<p><i>Índice de gestión sostenible de jales</i></p> <p>En el cual se evalúen acciones como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toneladas de jales producidas anualmente que se usen como relleno de tajos o minas subterráneas.</li> <li>- Número de depósitos convencionales que han transitado a otra alternativa de almacenamiento o disposición.</li> <li>- Porcentaje de depósitos de jales abandonados que están siendo reprocesados o valorizados.</li> <li>- Reducción de volumen total de pasivos ambientales asociados a jales.</li> <li>- Porcentaje de inversión anual destinado a innovación, investigación y proyectos piloto en gestión de jales.</li> <li>- Porcentaje de recuperación adicional de metales a partir de jales.</li> </ul>

En los últimos años, diversas empresas en México...

Han adoptado lineamientos internacionales sobre gestión hídrica y remediación de suelos; su implementación marca una diferencia significativa. No obstante, aún no se cuenta con regulaciones específicas que permitan su valoración, por este motivo persisten brechas como las que se presenta en el siguiente recuadro las cuales requieren ser atendidas.

No se reporta de manera sistemática:

- El impacto social generado por el uso de suelo y consumo de agua.

- El impacto que se genera en el/los acuíferos y suelos durante y después de la vida útil de una operación minera.
- Escenarios de estrés hídrico a futuro en las regiones donde se desarrollan los proyectos.
- Estrategias de planeación hídrica de largo plazo a nivel de cuenca.

Este tipo de brechas requieren ser gestionadas mediante la implementación de acciones como las que se describen en la Figura 5.3.

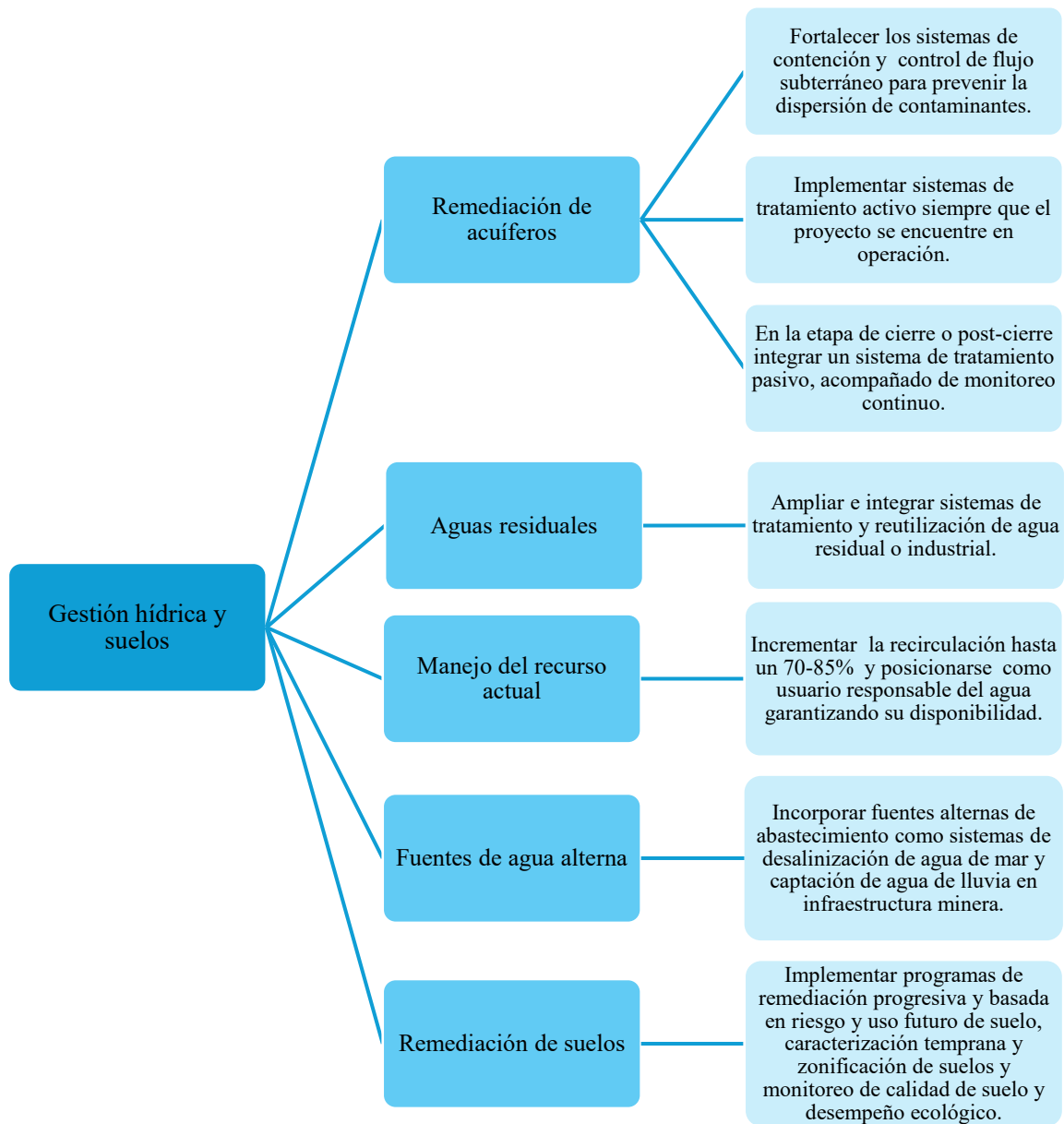




Figura 5. 3. Acciones estratégicas para fortalecer la gestión hídrica en las operaciones mineras. Fuente: Elaboración propia.



Los beneficios que la empresa obtiene de ello se resumen en la Tabla 4 y, a su vez, se proponen indicadores para evaluar la eficacia de las acciones implementadas.

Tabla 4. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones referentes a la gestión hídrica.



Beneficios 	Indicadores 
<p>La empresa fortalece una gestión hídrica preventiva mediante la optimización del recurso, la reducción de riesgos ambientales y la mejora del desempeño operativo asociado al uso y manejo del recurso; además la remediación de suelos permite reducir superficie impactada, diseñar con antelación estrategias para su uso posterior y dirigir esfuerzos hacia objetivos funcionales y realistas.</p>	<p><i>Índice de desempeño en gestión hídrica y de suelos</i></p> <p>En el cual además de las condiciones que actualmente se evalúan, también se considere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Incremento del agua del acuífero que recibe tratamiento (activo o pasivo).</li> <li>- Eficiencia de tratamiento o remoción de contaminantes.</li> <li>- Volumen de uso de agua residual tratada en comparación con el volumen requerido para los procesos.</li> <li>- Volumen de agua fresca extraída al año de fuentes naturales.</li> <li>- Volumen de agua proveniente de fuentes alternas.</li> <li>- Porcentaje de superficie remediada respecto al área total perturbada.</li> <li>- Número de sitios críticos identificados y atendidos.</li> <li>- Porcentaje de áreas remediadas con criterios de uso futuro.</li> </ul>

A su vez, el sector privado debe considerar que la cultura organizacional va más allá de un trámite administrativo; no debe limitarse a discursos corporativos, sino reflejar una coherencia real entre las políticas institucionales y las prácticas operativas.



Esta cultura organizacional se cimenta en dos ejes estratégicos que requieren acciones concretas, las cuales se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Acciones estratégicas para fortalecer la cultura organizacional de las operaciones mineras.

Eje 	Acciones 
<b>Diversidad e inclusión en la fuerza laboral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acciones institucionales que aborden procesos de reclutamiento, planes de carrera equitativos, infraestructura adecuada, licencias parentales equitativas, capacitación en cultura inclusiva, además, todos los empleados se deben sentir valorados, respetados, seguros y tomados en cuenta por igual para la toma de decisiones.</li> </ul>
<b>Confianza pública y transparencia de la información</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar sistemas accesibles para todos los involucrados, mediante plataformas públicas, reportes mensuales voluntarios, mesas de diálogo permanente, monitoreo participativo, encuestas y carteles que sean concretos y que contengan información realmente valiosa y sea interpretada correctamente por todos.</li> <li>- Incrementar el número de programas económicos locales que trasciendan al correr los años evitando con esto que las comunidades creen una dependencia hacia la industria minera.</li> </ul>

Si el sector privado considera la implementación de este tipo de acciones, puede evaluar su eficiencia mediante indicadores como los que se muestran en la Figura 5.4; sin embargo, no quiere decir que un porcentaje bajo en dichas evaluaciones sea precisamente algo que afecte a la organización porque es claro que existen beneficios. Un porcentaje bajo implica que como organización se debe buscar qué áreas de oportunidad o cambio existen y hacer una reestructuración para cambiar el plan más no el objetivo.

## Diversidad e inclusión en la fuerza laboral

### Beneficios

Favorece la innovación organizacional, mejora el rendimiento operativo y financiero, contribuye a atraer y retener talento, estimula relaciones comunitarias más estables, mejora la toma de decisiones y el posicionamiento frente a inversionistas.

### Índice de gestión inclusiva de talento

Evaluación en la que se consideren aspectos como:

- Porcentaje de personal femenino en la plantilla de trabajo total y en puestos de liderazgo.
- Cantidad de áreas acondicionadas para el personal femenino o con condiciones físicas diferentes.
- Horas y personal capacitado en temas de diversidad e inclusión.
- Porcentaje de licencia parental solicitada por mujeres operadoras, ingenieras y líderes.
- Porcentaje de atracción y retención de talento femenino y recién egresado.

## Confianza pública y transparencia de la información

### BENEFICIOS

Se previenen conflictos sociales, reduce la incertidumbre y los interesados perciben a la empresa como un ente que permite que sus prácticas sean evaluadas y que acepta que los puntos de vista pueden diferir.

### Índice de gobernanza informativa

Debe ser un indicador compuesto que incluya:

- Disponibilidad pública y actualización de información relevante para la comunidad.
- Porcentaje de comprensión por parte de la población.
- Cantidad de espacios para mesas de diálogo comunitario.
- Percepción de transparencia de la información divulgada.
- Porcentaje de cumplimiento de compromisos hechos en los diálogos.

Figura 5. 4. Beneficios e indicadores propuestos para evaluar la implementación de acciones referentes a la cultura organizacional de las empresas mineras. Fuente: Elaboración propia.

El apoyo de este tipo de iniciativas en un principio pudiera verse como un mero trámite con el que el sector privado gane crédito ante los organismos internacionales y la sociedad civil, sin embargo, al dársele la reivindicación correcta las empresas se posicionan como entes que no sólo se preocupan sino que se ocupan en el bienestar social, ambiental y económico en cada una de las etapas del proyecto y a su vez, abren camino hacia nuevas líneas de negocio y fortalecen su competitividad a nivel global.



## 5.2 Áreas de mejora para fortalecimiento institucional

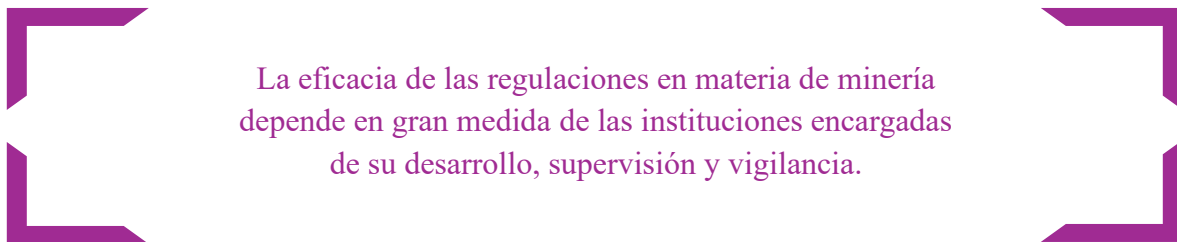
El Estado dentro de la transición hacia una minería sostenible debe jugar un papel fundamental que no sólo cumpla con su función punitiva, sino que tenga un enfoque orientado al fortalecimiento institucional, a la certidumbre jurídica y la vigilancia efectiva logrando así la reducción de riesgos socioambientales, pero sin frenar la innovación e inversión dentro del sector.

A lo largo de esta década en México ha habido cambios y modificaciones dentro del marco regulatorio (Ley de Minería) que rige la industria minera como los que se señalan en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Modificaciones que se han realizado a la Ley de Minería en la última década. Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia podría cuestionarse que los cambios son limitados en número, pero representan una reconfiguración en la industria minera que comienza a darle mayor peso a los criterios de sostenibilidad. A pesar de los avances aún existen brechas que pueden trabajarse, los cuales se mencionarán a continuación y van más allá de un cambio dentro del marco regulatorio, exigen un cambio estratégico y compaginado.



Esto puede gestionarse a través de acciones estratégicas, como las que se mencionan en la Figura 5.6.

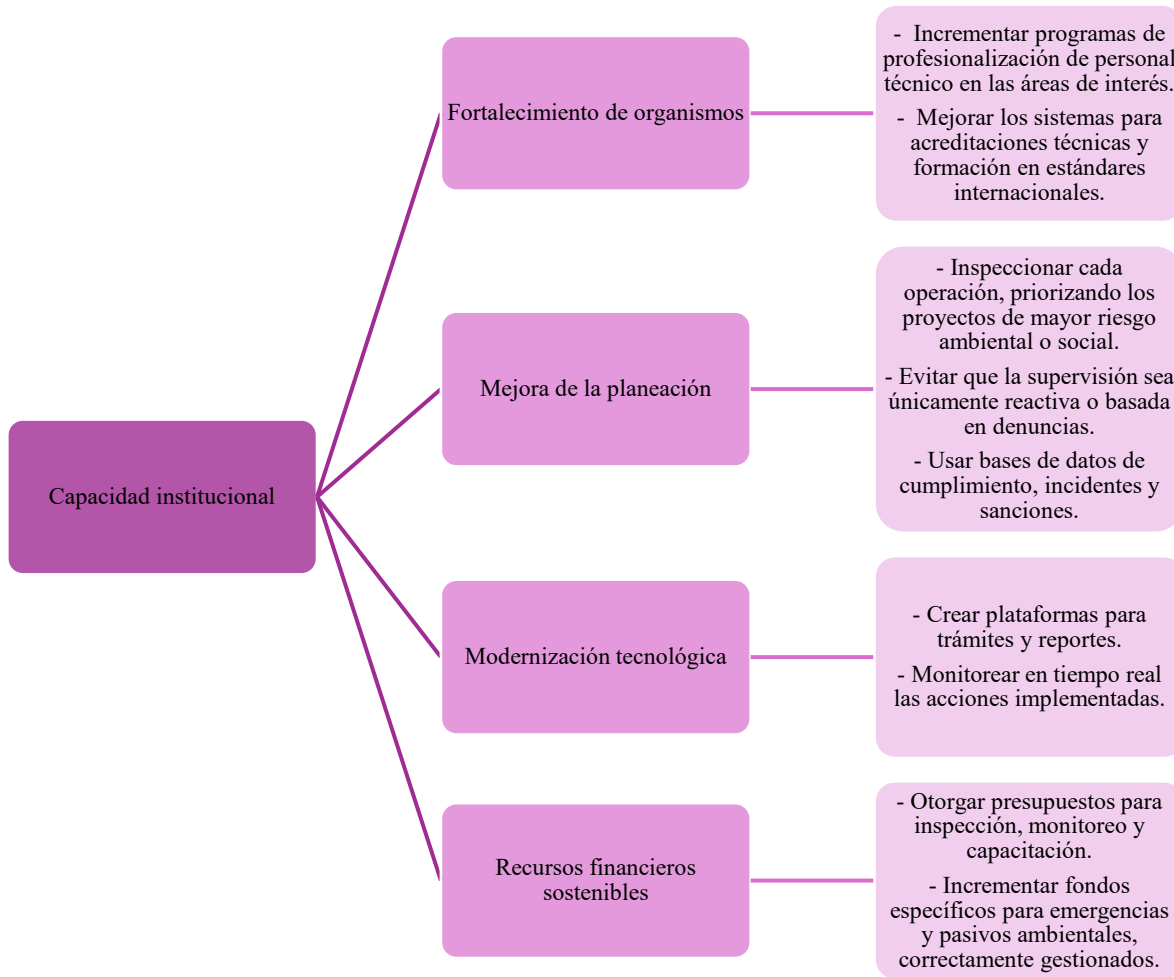




Figura 5. 6 Acciones estratégicas a implementar para mejorar la capacidad institucional. Fuente: Elaboración propia.

Estas acciones estratégicas requieren ser evaluadas mediante indicadores que permitan identificar los beneficios derivados de su implementación, como se analiza en la Tabla 6.

Tabla 6. Indicadores y beneficios de la implementación de las acciones estratégicas propuestas para el fortalecimiento institucional.

Indicadores 	Beneficios 
<p><i>Índice de Fortalecimiento Regulatorio</i></p> <p>Indicador compuesto que considere los siguientes elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Número de operaciones supervisadas y reguladas.</li></ul>	<p>La implementación de estas acciones mejora la calidad técnica de evaluaciones, inspecciones y resoluciones. Asimismo, contribuye a reducir errores, optimizar el uso de recursos financieros y humanos, y</p>



<ul style="list-style-type: none"><li>- Porcentaje de inspecciones planificadas respecto a inspecciones reactivas.</li><li>- Número de inspecciones realizadas en sitios de alto riesgo.</li><li>- Porcentaje de trámites digitalizados.</li><li>- Cobertura de monitoreo en tiempo real.</li><li>- Presupuesto y uso del mismo asignado a supervisión y vigilancia.</li></ul>	fortalecer la detección temprana de posibles riesgos.
--	---

Otra área de oportunidad a la cual debe prestarse inmediata atención es la ambigüedad del marco regulatorio aplicable a la actividad minera y con ello, que su actualización este alineada a los estándares internacionales.

Para atacar este vacío en la Figura 5.7 se propone una serie de acciones que las autoridades pueden implementar para mejorar y esclarecer el marco regulatorio que pretende no ser una serie de pasos, sino más bien factores clave para armonizar los criterios técnicos y las metodologías.

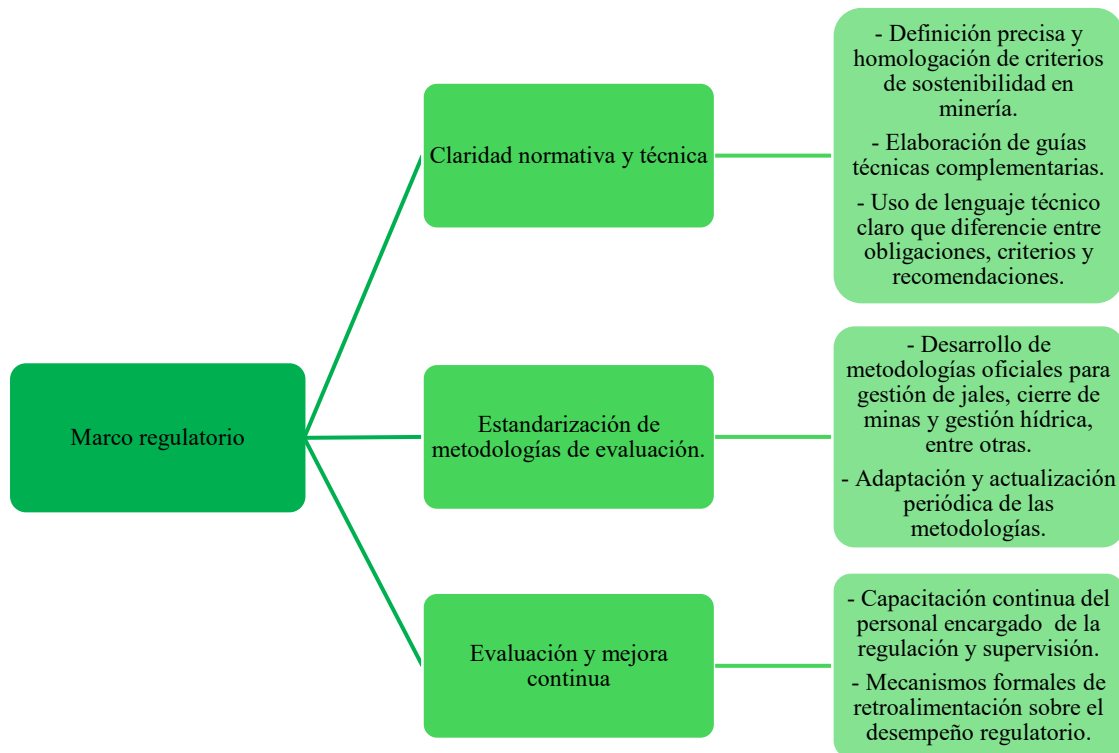




Figura 5. 7. Acciones estratégicas que las autoridades pueden implementar para homologar los criterios técnicos. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presentan los indicadores y beneficios propuestos para evaluar la implementación de estas acciones.

Tabla 7. Indicadores y beneficios propuestos para la implementación de las acciones estratégicas desarrolladas para alineación regulatoria.

Indicadores 	Beneficios 
<p><i>Índice de Alineación Regulatoria</i></p> <p>Un indicador compuesto que considere principalmente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Porcentaje de criterios técnicos definidos y publicados.</li> <li>- Grado de homologación de criterios entre autoridades.</li> <li>- Frecuencia de actualización del marco regulatorio aplicable.</li> <li>- Número de manuales o guías de interpretación normativa publicados.</li> </ul>	<p>La implementación de estas acciones contribuye a reducir la discrecionalidad en los procesos regulatorios y fortalece la certeza jurídica. Asimismo, permite evaluar la calidad técnica de los estudios presentados y facilita la detección y corrección temprana a los vacíos o ambigüedades en el marco normativo.</p>






- Porcentaje de adopción por parte de las unidades sobre las metodologías oficiales publicadas.

Los organismos gubernamentales deben desempeñar un papel como facilitadores de inversión extranjera condicionada e innovación que permita acelerar la transición hacia modelos alineados a la sostenibilidad.

En la Tabla 8 se describen las acciones estratégicas que el Estado y las autoridades pueden implementar para fortalecer su papel como facilitadores de la inversión, así como los beneficios esperados de su implementación.

Tabla 8. Acciones propuestas para fortalecer el papel del Estado como facilitador de la inversión y sus beneficios esperados.

Eje 	Acciones 	Beneficios 
<b>Inversión condicionada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir y homologar requisitos ambientales, sociales y de gobernanza.</li> <li>- Vincular incentivos y autorizaciones al cumplimiento de metas medibles y verificables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Atracción de inversión de mayor calidad y menor riesgo.</li> <li>- Fortalecimiento de estándares regulatorios en beneficio de la sociedad.</li> </ul>
<b>Incentivos para la innovación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilitar proyectos piloto bajo supervisión técnica.</li> <li>- Otorgar financiamiento para la transferencia tecnológica y su escalamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incrementar y mejorar la competitividad internacional.</li> <li>- Acelerar la transición tecnológica del sector.</li> </ul>
<b>Financiamiento verde</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilitar acceso a fondos verdes y financiamiento climático.</li> <li>- Establecer esquemas de financiamiento público-privado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor flujo de inversión extranjera responsable.</li> <li>- Menor costo de capital para proyectos sostenibles.</li> </ul>

Las acciones estratégicas propuestas se pueden evaluar a través de indicadores como los que se proponen en la Figura 5. 8, los cuales fueron pensados y visualizados para medir la eficiencia de su implementación.

**Indicadores**

*Índice de Financiamiento*

Indicador compuesto que evalúe:

- Porcentaje de proyectos con criterios ESG.
- Número de autorizaciones condicionadas a metas medibles y verificables.
- Porcentaje de proyectos piloto que avanzan a fase operativa.
- Porcentaje de proyectos piloto que cuentan con supervisión técnica por parte de las autoridades.
- Número de proyectos mineros con acceso a financiamiento verde.
- Número y actualizaciones de los esquemas de financiamiento público-privado.

Figura 5. 8. Indicadores propuestos para evaluar las acciones estratégicas implementadas para mejorar el papel del Estado como facilitador. Fuente: Elaboración propia.

El Estado debe asumir como prioridad nacional su papel dentro de la gestión de pasivos ambientales y minas abandonadas.

En la Tabla 9 se exponen los ejes de acción que las autoridades pueden adoptar para asumir un mejor papel en la gestión de pasivos ambientales.

Tabla 9. Acciones estratégicas que puede implementar el Estado para mejorar la gestión de pasivos ambientales y sus beneficios.

Eje	Acciones	Beneficios
<b>Priorización y regulación de pasivos ambientales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Crear y actualizar un inventario de pasivos ambientales y minas abandonadas.</li> <li>- Desarrollar un marco regulatorio claro para la atención de pasivos ambientales sin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Certeza jurídica e institucional.</li> <li>- Planificación estratégica a largo plazo.</li> <li>- Mejor uso de los recursos públicos, al priorizar con criterios técnicos.</li> </ul>



<b>Intervención estatal directa y transparencia en la gestión de pasivos</b>	responsables identificados.	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Clasificar los sitios con base en su nivel de riesgo y definir las responsabilidades propias del Estado.</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ejecutar y supervisar proyectos en pasivos ambientales y minas abandonadas.</li> <li>- Publicar información clara y accesible sobre las acciones ejecutadas.</li> <li>- Fortalecer, actualizar y volver verificable el marco regulatorio en materia de gestión de pasivos ambientales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fortalecimiento de la confianza pública.</li> <li>- Mejora de la legitimidad del Estado.</li> <li>- Disminución inmediata de riesgos en sitios abandonados.</li> <li>- Pasar de una gestión declarativa a una gestión basada en evidencias.</li> </ul>

Para evaluar su eficiencia en la Figura 5. 9 se propone un índice compuesto que evalúa las acciones estratégicas descritas anteriormente, es importante mencionar que este índice no es exclusivo y cada autoridad reguladora puede añadir aspectos dependiendo de las acciones que lleven a cabo.

**Indicadores**

*Índice de Gestión de Pasivos Ambientales*

Indicador conjunto que evalúe:

- Porcentaje de pasivos ambientales y minas abandonadas.
- Número de operaciones clasificadas de alto riesgo.
- Número de regulaciones específicas para pasivos ambientales sin responsable.
- Porcentaje de pasivos ambientales o minas abandonadas intervenidas anualmente.
- Porcentaje de proyectos de remediación con información pública y accesible que se encuentre disponible.

Figura 5. 9. Indicadores que puede evaluar la eficiencia en la implementación de las acciones estratégicas para mejorar la gestión de pasivos ambientales. Fuente: Elaboración propia.

Tomar conciencia y acción sobre las brechas existentes posicionan a los organismos gubernamentales como un ente técnico y estratégico capaz de homologar términos, establecer



condiciones, promover la innovación tecnológica y mejora continua. A su vez, al trabajar en conjunto con las partes interesadas se fortalece la gobernanza del sector y la confianza pública de los proyectos mineros. Un marco regulatorio sólido, normas precisas y vigilancia constante además de reducir riesgos, generan un medio propicio para una industria alineada a los desafíos de sostenibilidad.

### 5.3 Áreas de mejora en la academia

Complementariamente, las universidades y los centros de investigación desempeñan un papel de gran relevancia dentro de esta transición no como entes responsables de la implementación, sino como generadores de conocimiento técnico y científico, formación de capital humano especializado y aportación de soluciones que puedan ser adoptadas por las empresas. Además, el enfoque con que se desempeñen debe ser preventivo, innovador y alineado con los estándares internacionales.

En el contexto académico mexicano se han cimentado bases como las que se muestran en la Figura 5.10.

1. Incremento del capital humano con formación de habilidades técnicas con sentido ambiental y social.
2. Desarrollo de bases científicas para conservación y recuperación de los elementos ambientales afectados.
3. Incorporación de temas ambientales, sociales y de sostenibilidad en los programas de estudio.
4. Desarrollo de proyectos de investigación en temas de contaminación, residuos mineros, drenaje ácido, etc.
5. Desarrollo de tesis y/o tesinas y participación en congresos, foros y en cuerpos colegiados sobre temas de sostenibilidad.
6. Participación activa y asesorías en la modificación y creación de normas técnicas.

*Figura 5. 10. Acciones que ha implementado la academia en su transición hacia una minería sostenible. Fuente: Elaboración propia.*

Estas acciones evidencian la existencia de un creciente movimiento dentro de la academia, impulsado tanto por la demanda de la sociedad como por las necesidades de la industria, orientado a concebir la minería como un sector ambiental, social y económicamente responsable. No obstante, aún persisten puntos estratégicos que requieren un reajuste de perspectiva y un redireccionamiento que considere la posición actual del mismo y las metas a las que aspira. Dichos elementos serán analizados a continuación.

La academia debe tener como prioridad incrementar  
la formación de profesionales capaces de abordar



la minería desde una perspectiva integral y que cada egresado/egresada sea capaz de ponerse en diversos contextos para que los proyectos que se desarrollen contemplen los temas de interés de todas las partes interesadas.

Esto se puede gestionar a través de acciones como las que se proponen en la Figura 5. 11; además, a través de estos ejes de acción se obtienen beneficios para las entidades académicas y los centros de investigación.

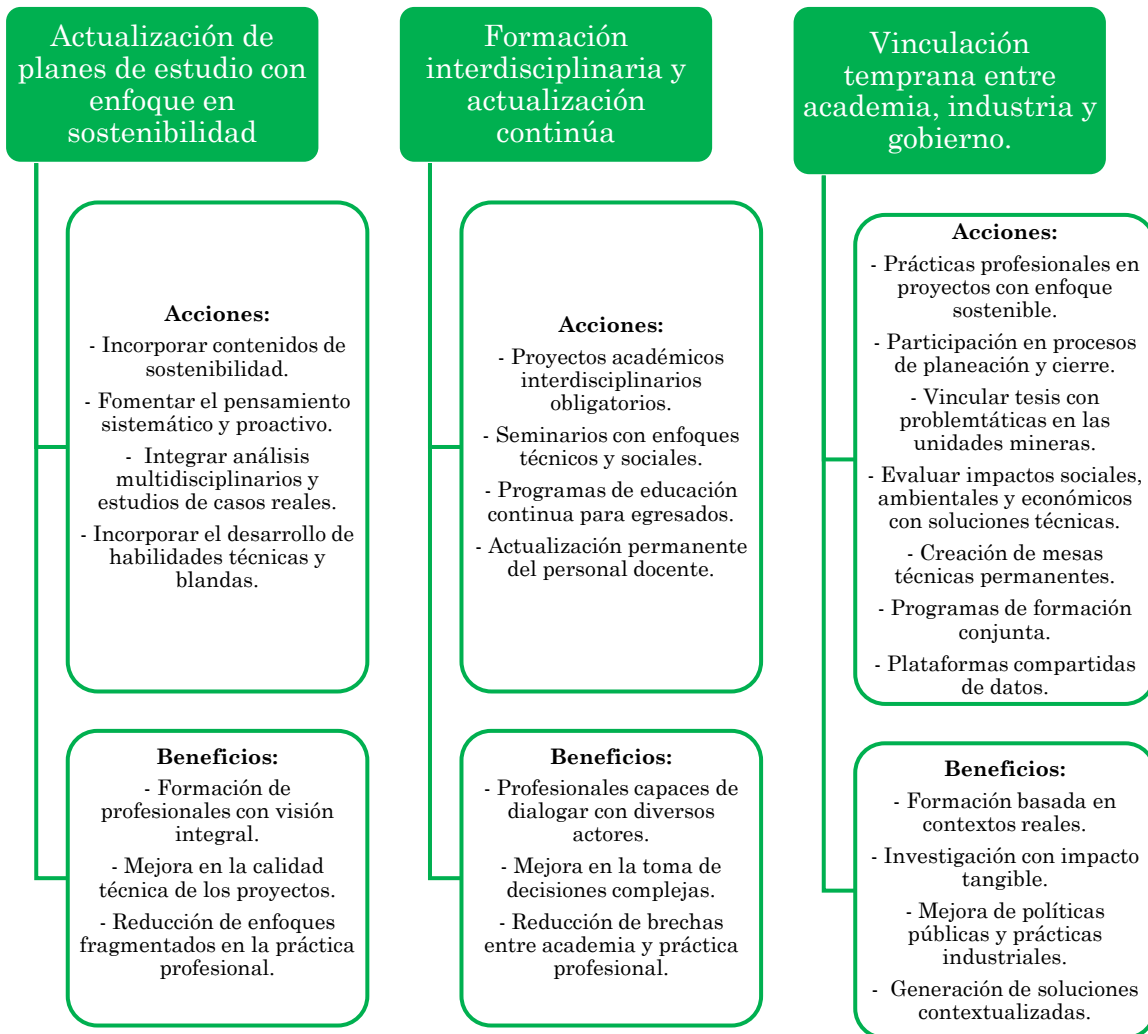


Figura 5. 11. Acciones estratégicas que puede implementar la academia y sus beneficios en la integración como ente en la minería sostenible. Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de estas acciones estratégicas se puede evaluar a través de indicadores, por ello, en la Figura 5.12 se propone un índice compuesto que puede aplicarse, sin embargo, se pueden añadir aspectos dependiendo del criterio del personal que evalué.

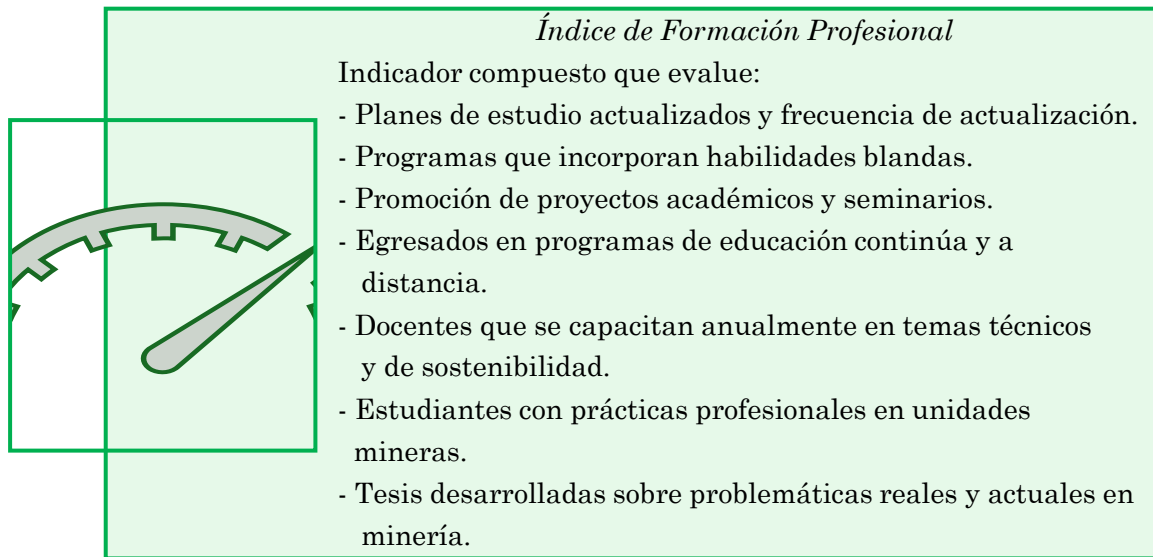


Figura 5. 12. Indicadores para evaluar la implementación de las acciones estratégicas en el afianzamiento de la formación profesional.  
Fuente: Elaboración propia.

Otra oportunidad para la academia es el desarrollo de laboratorios regionales especializados y certificados para análisis seguros y confiables de las muestras que se envíen (agua, suelo, etc.).

Esto se puede gestionar a través de acciones estratégicas como las que se proponen en la Figura 5.13, que además incluye beneficios si estas son implementadas.

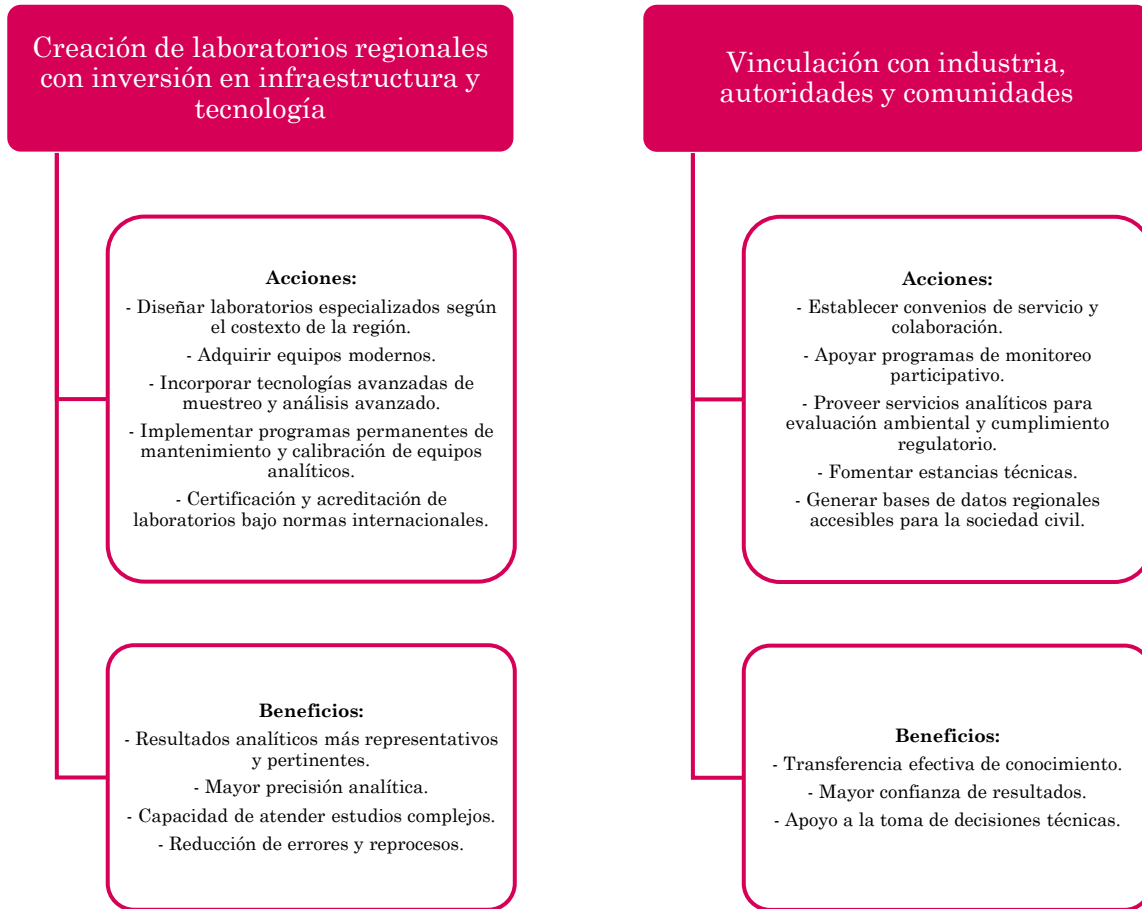


Figura 5. 13. Acciones estratégicas que puede implementar la academia para el desarrollo de laboratorios regionales y los beneficios que traen consigo. Fuente: Elaboración propia.

Acciones como estas requieren ser evaluadas a través de un índice compuesto que permita verificar su eficiencia como el que se muestra en la Figura 5.14.

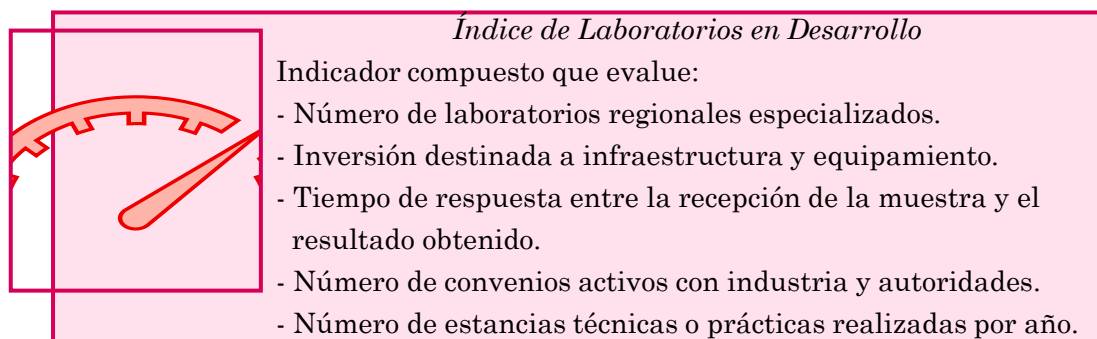


Figura 5. 14. Indicadores propuestos que permiten evaluar las acciones estratégicas implementadas para fortalecer el desarrollo de laboratorios regionales. Fuente: Elaboración propia.



En conjunto, la academia y los centros de investigación juegan un rol que va más allá de ofrecer soluciones técnicas; su papel estratégico consiste en fungir como formadora de profesionistas con una visión amplia e integral, que promueva la innovación y facilite las soluciones. Trabajar estos aspectos reducirá los vacíos entre la formación académica y las necesidades prioritarias del sector minero, fortaleciendo así la relación academia-industria y que su objetivo sea que ambas vayan en un sentido responsable y alineado con los estándares internacionales.

## 5.4 Áreas de mejora en la sociedad

Por su parte, la participación de la sociedad civil y las comunidades cercanas a la operación son un pilar estratégico para la gobernanza minera y la sostenibilidad de las unidades a largo plazo. La intervención de ambos actores ha mejorado la toma de decisiones, gestiona la aceptación y obligaciones de las empresas, además, permite construir confianza entre las partes interesadas. Su enfoque más allá de ser participativo, inclusivo y basado en derechos humanos debe ser resiliente, activo y de corresponsabilidad.

En México se han desarrollado mecanismos como el CLPI y espacios donde la sociedad civil y las comunidades pueden participar, respecto a la minería; en la actualidad las problemáticas se atienden a través de acciones como las que se incluyen en la Figura 5.15.

1. Sesiones mensuales informativas y talleres de consulta ciudadana.
2. Procesos organizativos y documentación colectiva.
3. Gestión a través de buzones de quejas y sugerencias.
4. Entrevistas entre pobladores de las comunidades cercanas sobre el desempeño de las empresas.
5. Movimientos que buscan defender los derechos de los ciudadanos.

*Figura 5. 15. Acciones que realiza la sociedad civil y las comunidades ante la presencia de la industria minera. Fuente: Elaboración propia.*

La creación e implementación de acciones como estas surgen principalmente por la necesidad que tienen las comunidades y la sociedad civil de velar por sus derechos, conservar las condiciones de su entorno y obtener una retribución económica, sin embargo, persisten las limitaciones estructurales, como la efectividad de la participación, el acceso oportuno e igualitario de información técnica de los proyectos, y condiciones habilitantes para la acción comunitaria. En el siguiente apartado se tratarán estas áreas con un enfoque que lleve a las comunidades a un rol más activo, informado y responsable.

Una de las principales brechas que enfrenta la sociedad civil  
y las comunidades radica en el consentimiento libre,

previo e informado no por la ausencia de este, sino por la manera parcial o tardía con la que suele abordarse, además de la participación no temprana y la desigualdad de las capacidades por parte de las comunidades, la accesibilidad de la información y los limitados mecanismos de seguimiento.

Para gestionar de manera correcta el CLPI en la Figura 5.16 se proponen acciones estratégicas para llevar a cabo y fortalecer el papel de las comunidades dentro del sector minero.

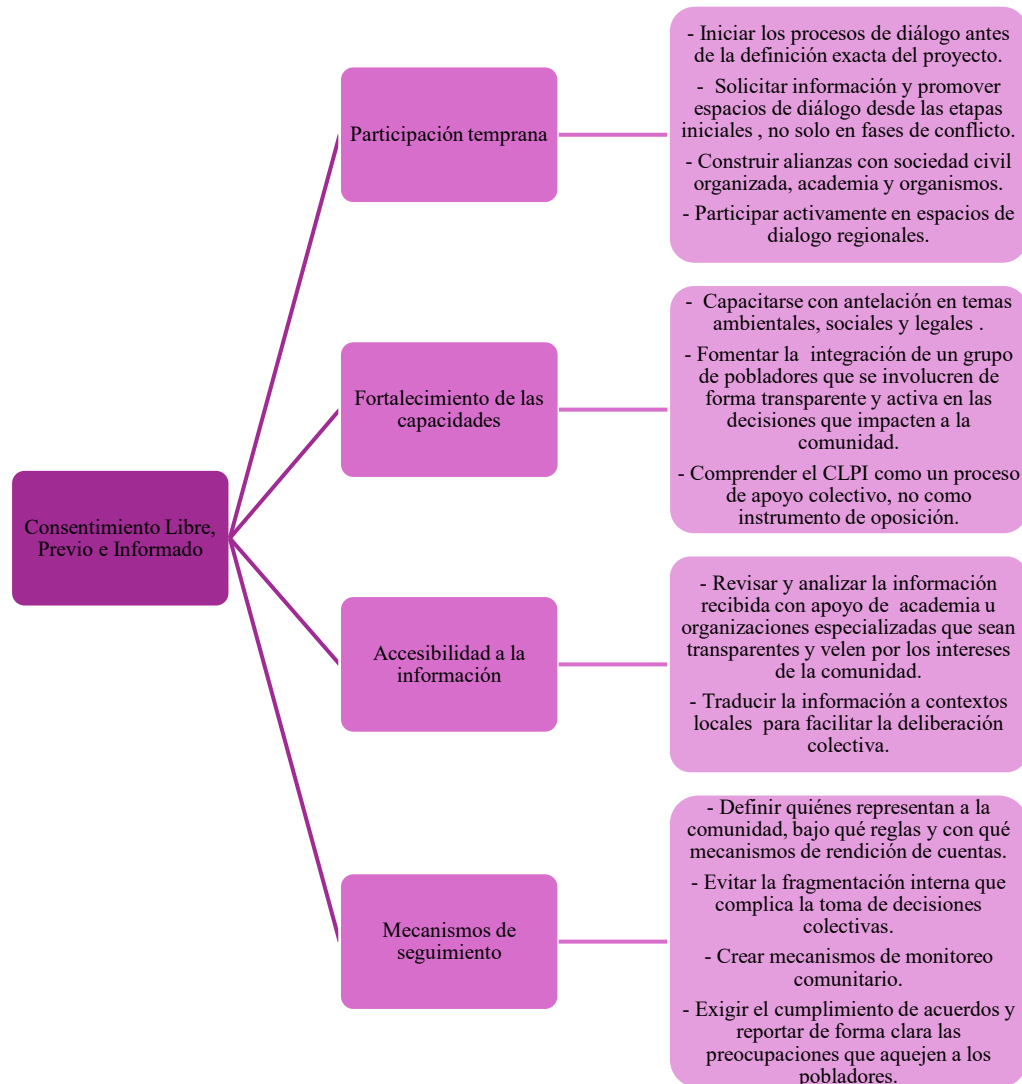




Figura 5.16. Acciones para fortalecer la implementación del consentimiento libre, previo e informado en comunidades y sociedad civil. Fuente: Elaboración propia.



Las acciones descritas anteriormente tienen beneficios y requieren ser evaluadas para conocer la eficiencia de su implementación. En la Tabla 10 se describen ambas de forma coherente y cohesiva.

Tabla 10. Indicadores para evaluar la eficiencia en la implementación de acciones para CLPI.

Indicadores 	Beneficios 
<p data-bbox="337 535 738 640"><i>Índice Regulatorio para el Consentimiento Libre, Previo e Informado</i></p> <p data-bbox="267 661 808 730">Un indicador compuesto que considere los siguientes elementos:</p> <ul data-bbox="284 751 808 1482" style="list-style-type: none"><li>- Número de capacitaciones dirigidas a las comunidades en temas ambientales, sociales y legales por año.</li><li>- Número de reuniones informativas y de diálogo realizadas antes de la aprobación de un proyecto.</li><li>- Porcentaje de pobladores involucrados activamente en los acuerdos y toma de decisiones.</li><li>- Número de acuerdos alcanzados mediante diálogo en asambleas comunitarias.</li><li>- Disponibilidad y comprensión de la información por parte de las comunidades y sociedad civil.</li><li>- Número de materiales de divulgación para la comunidad.</li><li>- Número de mecanismos de monitoreo comunitario.</li></ul>	<ul data-bbox="852 525 1354 1039" style="list-style-type: none"><li>- Decisiones colectivas más informadas y sólidas.</li><li>- Incremento en la autonomía de los procesos de diálogo.</li><li>- Reducción de conflictos internos.</li><li>- Procesos de CLPI más claros y verificables.</li><li>- Prevención temprana de afectaciones socioambientales.</li><li>- Mayor confianza y certidumbre sobre las decisiones colectivas.</li><li>- Incremento en el conocimiento sobre las acciones que afectan a las comunidades.</li></ul>

Trabajar en este sentido implica un fortalecimiento que además de técnico tiene que reorientarse y comprender que el trabajo debe ser colectivo, que las preocupaciones que aquejan a las comunidades no son problema de una sola parte de los interesados, que todos sin excepción alguna tienen derecho a externar sus dudas y que la disposición y el tiempo de respuesta debe estar al alcance de todos y sin distinción alguna. A su vez, se incita al diálogo multidisciplinario abierto y respetuoso con empresas, comunidades, organizaciones descentralizadas, academia y gobierno para que todos los términos y acciones que se lleven



a cabo sean cuestionadas, comprendidas y aprobadas por las regiones que pudieran verse afectadas en su entorno socioambiental.

## 5.5 Hacia la consolidación de un futuro minero sostenible

A lo largo de los temas desarrollados anteriormente se puede constatar que sí existe un cambio dentro del sector minero mexicano y que la transición hacia la sostenibilidad no parte de la ausencia de capacidades, sino de la voluntad de las empresas mineras, la academia, el gobierno y la sociedad civil para gestionar coherentemente los avances existentes con una visión a largo plazo.

Debe tenerse claro que la sostenibilidad dentro de la minería no representa un estado ideal o final, sino un proceso dinámico que exige evaluación constante, ajustes y aprendizaje institucional, el cual se acopla al entorno medioambiental, social y económico. Es decir, su viabilidad depende, entre otros factores, de la existencia de una red de corresponsabilidad entre la industria, el gobierno, la academia, las organizaciones no gubernamentales (ONGs) y las comunidades afectadas, a través del diálogo activo, las alianzas nacionales e internacionales, la gestión y regulación de los datos técnicos abiertos y la estandarización de acciones y lineamientos de mejora que atiendan tanto las temáticas pendientes como las emergentes.

Los pasos dentro de la trayectoria de sostenibilidad que ha realizado México demuestran que el país tiene oportunidades relevantes para seguir avanzando y buscar alinearse al máximo grado de estandarización internacional; estos avances y el conocimiento sobre aquellos aspectos que se pueden mejorar nos llevan a dejar de cuestionarnos sobre si es posible o no hacer un cambio, más bien ponen sobre la mesa cuestionamientos como ¿será posible disminuir considerablemente el consumo de agua fresca?, ¿se podrá recuperar un mayor volumen de agua?, ¿dejarán de contaminarse los cuerpos de agua subterráneos y superficiales?, ¿mediante qué acciones mejorara la disposición y valorización de los jales?, ¿las unidades mineras se integrarán a los principios de economía circular?, ¿los planes de cierre serán dinámicos, progresivos y estarán diseñados con las condiciones únicas de cada operación?, ¿las comunidades lograrán una integración total en la toma de decisiones?, ¿se llegará a un verdadero equilibrio entre el personal femenino y masculino en todos los niveles de trabajo?, ¿de qué manera la innovación tecnológica y la transición energética pueden convertirse en motores reales de sostenibilidad en la minería nacional? y la pregunta que debe acompañar de hoy en adelante a empresas, gobierno, academia, sociedad y demás interesados, ¿qué decisiones deben tomarse hoy para asegurar una minería responsable mañana?; la identificación de estas oportunidades y su aprovechamiento efectivo reflejan el compromiso real de cada uno de los actores involucrados.



---

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió identificar que la transición del sector minero mexicano hacia la sostenibilidad ha sido progresiva, aunque heterogénea y aún incompleta. Si bien se han estandarizado e implementado acciones orientadas a la mejora del desempeño ambiental, social y económico, persisten brechas estructurales, que van desde la concepción reduccionista de la sostenibilidad como un enfoque predominantemente ambiental hasta la aplicación asimétrica de las medidas para mitigar o atenuar los efectos ocasionados por la actividad minera.

Debe comprenderse siempre que la sostenibilidad es un proceso dinámico que se fundamenta en tres ejes, ambiental, social y económico y que su efectividad depende en gran medida de que los actores interesados del sector minero deben tener un panorama abierto a las problemáticas nuevas y emergentes relacionadas al uso y manejo de los recursos hídricos, gestión responsable de los residuos mineros, cambio climático, gobernanza territorial, conflictos socioambientales, transparencia y uso de tecnología e inteligencia artificial. Estas cuestiones demandan diagnósticos constantes y soluciones contextualizadas según las características de cada operación.

Más que promover una postura cautelosa, este análisis plantea la necesidad de un cambio de paradigma resiliente, regenerativo y proactivo. El futuro del sector minero no radica únicamente en qué acciones se deben adoptar y adaptar, sino en mejorar la consolidación de esquemas de corresponsabilidad entre actores interesados, la integración real y completa de academia, gobierno, comunidades y talento femenino en las operaciones mineras, el fortalecimiento institucional y la vigilancia del marco normativo. Asimismo, la transición energética que representa tanto un desafío como una oportunidad estratégica para redefinir el papel del sector minero en el desarrollo de la sociedad mexicana.

En consecuencia, la sostenibilidad en la minería mexicana no debe entenderse como un conjunto de prácticas aisladas, sino como un proceso de transformación sistémica que exige coherencia entre la planeación y ejecución, transparencia y visión a largo plazo y respeto por los intereses de la sociedad y la conservación del medio ambiental y cultural. México, como nación minera, cuenta con el potencial para seguir avanzando hacia este modelo siempre que exista un compromiso real de articulación entre los actores involucrados y la formación de ingenieros e ingenieras con una perspectiva dinámica, proactiva y ética, orientada al beneficio presente y futuro del medioambiente y la sociedad mexicana.



---

## REFERENCIAS

- Acosta, J., Abbaspour, A., Martínez, G., Martínez, S., Zarnozza, R., Gabarrón, M., & Faz, A. (2018). Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study. *Chemosphere*, 204, 71-78. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653518306696>
- Acuña, A., Naranjo, J., Salinas, N., Bustos, J., Soriano, J., Zetina, F., & López, M. (2025). Environmental Impact of Mining Activities on Water Availability, Quality and Sediments in the Sonora River, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-025-08150-4?utm.com>
- Agnico Eagle. (2025). *2024 Sustainability report*. Obtenido de [https://s205.q4cdn.com/243646470/files/doc\\_downloads/sd\\_reports/2024/2024-AgnicoEagle-SustainabilityReportEN.pdf](https://s205.q4cdn.com/243646470/files/doc_downloads/sd_reports/2024/2024-AgnicoEagle-SustainabilityReportEN.pdf)
- Agnico Eagle. (2025). *Responsible tailings management*. Obtenido de [https://s205.q4cdn.com/243646470/files/doc\\_downloads/sustainability/TM-Report/AgnicoEagle-TailingsSummaryReport\\_2025-Final-EN.pdf](https://s205.q4cdn.com/243646470/files/doc_downloads/sustainability/TM-Report/AgnicoEagle-TailingsSummaryReport_2025-Final-EN.pdf)
- Alvarado, M. J., Garrido, S., Raynal, M. E., Kassis, E., Luque, V., & Rosano, G. (2023). Cyanide Biodegradation by a Native Bacterial Consortium and Its Potential for Goldmine Tailing Biotreatment. *Water* 2023. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/8/1595>
- Anglo American. (2024). *Sustainability report 2023*. Obtenido de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/investors/annual-reporting/2023/sustainability-report-plc-2023.pdf>
- Antofagasta. (2021). *Climate resilience*. Obtenido de <https://sr.antofagasta.co.uk/documents/en/antofagasta-sustainability-report-2024-climate-resilience.pdf>
- Australian Government. (2016). *Tailings management*. Obtenido de <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-04/lpsdp-tailings-management-handbook-english.pdf>
- Basanta, S., Dwayne, T., Sam, P., Jeff, R., & Sarah, G. (2020). *Properties of cemented rockfill used in an open pit mine*. Obtenido de <https://members.cgs.ca/documents/conference2008/GEO2008/pdfs/89.pdf>
- BHP. (2021). *BHP Billiton Approves Escondida Water Supply Project*. Obtenido de BHP: <https://www.bhp.com/news/articles/2013/07/bhp-billiton-approves-escondida-water-supply-project.com>
- Cacciattolo, C., & Marinovic, A. (2023). Experiences of Underground Mine Backfilling Using Mine Tailings Developed in the Andean Region of Peru: A Green Mining Solution to Reduce Socio-Environmental Impacts. *Sustainability*, 15. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12912>
- Cacciattolo, C., & Marinovic, A. (2022). Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance. *Sustainability*, 14. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10901?.com>



- CAMIMEX. (2025). *Informe de sostenibilidad 2024*. Obtenido de [https://www.camimex.org.mx/application/files/7917/2963/4016/INFORME\\_DE\\_SOSTENIBILIDAD\\_2024.pdf](https://www.camimex.org.mx/application/files/7917/2963/4016/INFORME_DE_SOSTENIBILIDAD_2024.pdf)
- Capstone Gold. (2024). *2023 Sustainability report*. Obtenido de <https://capstonecopper.com/wp-content/uploads/2024/12/2023-Sustainability-Report.pdf?t=1734668463>
- Centro de Estudio de las Finanzas Públicas. (2024). *Situación Actual de la Industria Minera en México, 2020-2023*. Obtenido de <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2024/cefp0132024.pdf>
- CEPAL. (2021). *Gobernanza digital e interoperabilidad gubernamental*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/6a12e389-3dcb-4cba-830a-99f038835423/content>
- Cerro Verde. (2024). *2023 Sustainability report*. Obtenido de <https://www.cerroverde.pe/assets/img/publicaciones/Sustainability-Report-2023.pdf>
- Chen, K., Zhang, Q. L., Tao, Y., & Chen, K. L. (2022). The Slope Safety, Heavy Metal Leaching, and Pollutant Diffusion Prediction Properties under the Influence of Unclassified Cemented Paste Backfill in an Open Pit. *Environmental Research and Public Health*, 19. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/19/12772>
- Chen, Q., Niu, Y., & Chongchun, X. (2023). Study on the Influence of Wet Backfilling in Open Pit on Slope Stability. *Sustainability*, 15. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12492>
- Coal Authority & Mining Remediation Authority. (2020). Wheal Jane mine water treatment scheme. *GOV-UK*. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/case-studies/wheal-jane-mine-water-treatment-scheme.com>
- COLLAHUASI. (2020). *Collahuasi y Sonnedix firman contrato por 150 GWh de energía solar y el primero en Chile con respaldo de baterías*. Obtenido de COLLAHUASI: <https://www.collahuasi.cl/collahuasi-y-sonnedix-firman-contrato-por-150-gwh-de-energia-solar-y-el-primero-en-chile-con-respaldo-de-baterias/>
- Coll-Hurtado, A., Sánchez, T., & Morales, J. (2002). *LA MINERÍA EN MÉXICO*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Cruz, C., Herrera, S., Calisaya, D., Salazar, R., Cisternas, L., & Kraslawski, A. (2022). Using Waste Brine from Desalination Plant as a Source of Industrial Water in Copper Mining Industry. *Minerals*, 12. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2075-163X/12/9/1162>
- Delgado, J., Ayala, D., Brioso, C., Boski, T., Torres, S., Calderón, E., & López, F. (2019). Remediation experiment of Ecuadorian acid mine drainage: geochemical models of dissolved species and secondary minerals saturation. *Environmental Science and Pollution Research*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/336833163\\_Remediation\\_experiment\\_of\\_Ecuadorian\\_acid\\_mine\\_drainage\\_geochemical\\_models\\_of\\_dissolved\\_species\\_and\\_secondary\\_minerals\\_saturation](https://www.researchgate.net/publication/336833163_Remediation_experiment_of_Ecuadorian_acid_mine_drainage_geochemical_models_of_dissolved_species_and_secondary_minerals_saturation)
- Dinis, M. d., & Fiúza, A. (2021). Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies. *Geosciences*, 11. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/6/250>
- Domke, G., Oswalt, S., Walters, B., & Morin, R. (2020). Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. *PNAS NEXUS*. Obtenido de <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.2010840117>



- EITI. (2023). *Segundo piloto con mineros artesanales y en pequeña escala (MAPE)*. Obtenido de <https://eiti.org/sites/default/files/2023-09/INFORME%20MAPE%20VIG%202021.pdf>
- El Imparcial. (2022). *Plan de cierre de Álamo Dorado*. Obtenido de El Imparcial: <https://www.ecosdelanoticiason.com/noticias/16085/plan-de-cierre-de-alamo-dorado>
- ENGENERA. (2021). *Y DESPUÉS DE LA MINA ¿QUÉ? HACIA UNA POLÍTICA DE CIERRE DE MINAS*. Obtenido de [https://engenera.org/wp-content/uploads/2022/06/Informe\\_cierre\\_minas.pdf](https://engenera.org/wp-content/uploads/2022/06/Informe_cierre_minas.pdf)
- ENGIE. (2023). *Central Eólica Punta Lomitas entra en operación comercial*. Obtenido de ENGIE: <https://engie-energia.pe/notas-de-prensa/central-eolica-punta-lomitas-entra-en-operacion-comercial>
- Esteller, M., Domínguez-Mariani, E., & Garrido, S. (2015). Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 74, 2893-2906. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4315-9?utm>
- First Majestic Silver. (2024). *Informe de sostenibilidad 2023*. Obtenido de [https://firstmajestic.com/\\_resources/reports/FirstMajestic-2023-Informe-de-Sostenibilidad.pdf?v=060703](https://firstmajestic.com/_resources/reports/FirstMajestic-2023-Informe-de-Sostenibilidad.pdf?v=060703)
- Fitton Tailings Consultants. (2024). Avoiding dam failures: is filtration the best solution? *Paste 2024: Proceedings of the 26th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, 51-64. Obtenido de [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2455\\_03\\_Fitton/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2455_03_Fitton/)
- Fortescue. (2024). *Fortescue*. Obtenido de Fortescue awards US\$400 million contract to XCMG to supply zero emissions mining equipment: [https://www.fortescue.com/en/articles/fortescue-awards-us\\$400-million-contract-to-xcmg-to-supply-zero-emissions-mining-equipment](https://www.fortescue.com/en/articles/fortescue-awards-us$400-million-contract-to-xcmg-to-supply-zero-emissions-mining-equipment)
- Galhardi, J., & Bonnoto, D. (2016). Hydrogeochemical features of surface water and groundwater contaminated with acid mine drainage (AMD) in coal mining areas: a case study in southern Brazil. *Environmental science and pollution research international*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27335014/>
- GCCA. (2021). *Rainwater Harvesting at UltraTech's Vikram Cement Works – Case Study*. Obtenido de GCCA: <https://gccassociation.org/about-us/our-members/member-spotlight/rainwater-harvesting-at-ultratechs-vikram-cement-works-case-study/>
- GHG Protocol. (n.d.). *Protocolo de Gases Efecto Invernadero*. Obtenido de [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/protocolo\\_spanish.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/protocolo_spanish.pdf)
- Gibert, O., Rotting, T., Cortina, J. L., De Pablo, J., Ayora, C., Carrera, J., & Bolzicco, J. (2011). In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 191, 287-295. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411005206>
- Grupo México. (2025). *Informe de desarrollo sustentable 2024*. Obtenido de [https://www.gmexico.com/GMDocs/InformeSustentable/Folletos/ESP/IDS24\\_ESP.pdf](https://www.gmexico.com/GMDocs/InformeSustentable/Folletos/ESP/IDS24_ESP.pdf)
- Gupta, P., Roy, S., & Mahindrakar, A. (2015). Treatment of groundwater using phytoremediation technique at Kolar Gold Fields, India. *International Journal of Environmental Engineering*, 7. Obtenido de <https://www.inderscienceonline.com/doi/epdf/10.1504/IJEE.2015.069252>
- Hore, C., & Luppnow, D. (2015). *In-pit Tailings Disposal at Langer Heinrich – Tailings Storage Facilities in a Unique Hydrogeological Setting*. Obtenido de



- [https://dxi97tvbmhbca.cloudfront.net/upload/user/image/Hore-Luppnov-In-pit\\_Tailings\\_Disposal\\_201520200227210250573.pdf](https://dxi97tvbmhbca.cloudfront.net/upload/user/image/Hore-Luppnov-In-pit_Tailings_Disposal_201520200227210250573.pdf)
- HSETools. (2024). *Innovación en la minería: Avances en tecnología y preservación ambiental*. Obtenido de HSETools: <https://hse.software/2024/07/02/innovacion-en-la-mineria-avances-en-tecnologia-y-preservacion-ambiental/>
- IDE Technologies. (2023). *Quebrada Blanca (QB2) Phase 2 Plant (Chile)*. Obtenido de IDE Technologies: <https://ide-tech.com/es/project/planta-de-fase-2-quebrada-blanca-qb2-chile/>
- International Council on Mining & Metals. (2021). *Cambio Climático "Declaraciones de Posición"*. Obtenido de <https://pimcore.icmm.com/website/publications/pdfs/mining-principles/es/cambio-climatico.pdf?cb=59863>
- International Council on Mining & Metals. (2025). *Integrated Mine Closure*. Obtenido de [https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2025/guidance\\_mine-closure\\_update.pdf?cb=95109](https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2025/guidance_mine-closure_update.pdf?cb=95109)
- International Council on Mining & Metals. (2025). *Minería responsable*. Obtenido de ICMM: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles>
- International Institute for Environment and Development. (2002). *Breaking New Ground: Minerals, Mining and Development*. Obtenido de <https://www.iied.org/9084iied>
- International Institute for Environment and Development. (2012). *MMSD+10: Reflecting on a decade of mining and sustainable development*. Obtenido de <https://www.iied.org/16041iied>
- International Institute for Sustainable Development. (2022). *Inclusive Closure and Post-Mining Transition at the Golden Pride Mine, Tanzania*. Obtenido de <https://www.iisd.org/system/files/2022-11/igf-case-study-golden-pride-mine-tanzania.pdf>
- Jun, L., Wei, H., Aili, M., Juan, N., Hongyan, X., Jingson, H., . . . Cuiying, P. (2020). Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated. *Environmental Research*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120307817>
- Liontown. (2024). *FY24 ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE REPORT*. Obtenido de <https://www.ltresources.com.au/wp-content/uploads/2024/10/61229132.pdf>
- Liu, X., Zhang, L., Wu, P., & Deng, H. (2022). A new small-scale system of rainwater harvesting combined with irrigation for afforestation in mine area: Optimizing design and application. *Journal of Environmental Management*, 332. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722017029>
- López-Pamo, Aduvire, & Baretino. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113, 3-21. Obtenido de [https://info.igme.es/media/boletin/2002/113\\_1\\_2002/Articulo\\_1.pdf](https://info.igme.es/media/boletin/2002/113_1_2002/Articulo_1.pdf)
- MAC. (2021). *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities*. Obtenido de [https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2021/04/MAC-OMS-Guide-March-2021.pdf](https://mining.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/04/MAC-OMS-Guide-March-2021.pdf)
- Martorell, D. (2022). *WordPress.com*. Recuperado el 2025, de Que es el tecnosol: <https://ecosistemaglobal.wordpress.com/2022/12/22/que-es-el-tecnosol-o-tecnosuelos-o-tecnosoil/>
- Metalkol RTR. (2020). *A major tailings reprocessing operation*. Obtenido de Metalkol RTR: <https://www.ergafrica.com/cobalt-copper-division/metalkol-rtr/>



- México Minero. (2025). *Unidad Minera San José opera con normalidad ante lluvias*. Obtenido de México Minero: <https://mexicominero.org/unidad-minera-san-jose-opera-con-normalidad-ante-lluvias/>
- MILENIO. (2017). *Peñoles, pionera en el tratamiento del agua residual*. Obtenido de MILENIO: <https://www.milenio.com/estados/penoles-pionera-en-el-tratamiento-del-agua-residual>
- MINERÍA EN MÉXICO. (2025). *MINERÍA EN MÉXICO*. Obtenido de Newmont Peñasquito revoluciona la operación minera con su nuevo Centro de Control: <https://mineriaenmexico.com/mineria-en-mexico/newmont-penasquito/>
- Minería Pan-Americana. (2024). *México: Minera Cuzcatlán alcanza un nuevo hito en el uso eficiente del agua*. Obtenido de MINERÍA PAN-AMERICANA: <https://mineria-pa.com/2024/12/01/mexico-minera-cuzcatlan-alcanza-un-nuevo-hito-en-el-uso-eficiente-del-agua/>
- Miranda, E. (2020). *GEOMIMET*. Obtenido de Devenir histórico de la Minería Mexicana: <https://www.revistageomimet.mx/2020/10/devenir-historico-de-la-mineria-mexicana/>
- Mundo Minero. (2023). Obtenido de El Chanate reverdece. Un cierre de mina que avanza con éxito.: <https://mundominero.mx/el-chanate-reverdece-un-cierre-de-mina-que-avanza-con-exito/>
- Mundo Minero. (05 de Febrero de 2025). *"Cierre de minas", una de las medidas más importantes de la política ambiental mexicana. [Video]*. YouTube. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=d9y-0H-to-A>
- Mundo Minero. (2025). *Minera Peñasquito inaugura nuevo Centro de Control*. Obtenido de Mundo Minero: <https://mundominero.mx/noticias/minera-penasquito-inaugura-nuevo-centro-de-control>
- Naghoun, I., Edahbi, M., Herrera, A., Rodríguez, M., Durães, N., Pascual, B., & Salmoun, F. (2025). *Passive Treatment of Acid Mine Drainage Effluents Using Constructed Wetlands: Case of an Abandoned Mine, Morocco Iron*. *Water*, 17. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/5/687>
- Natural Resources Canada. (2014). *Diavik Diamond*. Obtenido de [https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/mineralsmetals/pdf/mms-smm/abor-auto/pdf/Diavik\\_factsheet\\_eng.pdf](https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/mineralsmetals/pdf/mms-smm/abor-auto/pdf/Diavik_factsheet_eng.pdf)
- Oke, J., Hawley, K., Belem, T., & Hashemi, A. (2021). *Paste backfill continuous pour: Red Lake operations case study*. *Paste 2021: Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, 381-396. Obtenido de [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2115\\_31\\_Oke/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2115_31_Oke/)
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., & Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Obtenido de [https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6\\_tecnicas\\_recuperacion\\_suelos\\_contaminados.pdf](https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf)
- Padhi, P., Bora, N., Sohtun, P., Athparia, M., Kumar, M., Kataki, R., & Kumar Sarangi, P. (2024). *Remediation of mine overburden and contaminated water with activated biochar derived from low-value biowaste*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 159. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107024001305>
- Pan American Silver. (2024). *Reporte de sostenibilidad 2023*. Obtenido de <https://panamericansilver.com/wp-content/uploads/2024/08/PAS-Reporte-de-Sostenibilidad-2023-Esp.pdf>



- Pan American Silver. (2025). *2024 Sustainability report*. Obtenido de <https://panamericansilver.com/wp-content/uploads/2025/05/PAS-Sustainability-Report-2024.pdf>
- Peñoles. (2024). *Informe anual 2023*. Obtenido de [https://www.penoles.com.mx/assets/files/reportes/Anuales/PEN\\_IA23-ESP.pdf](https://www.penoles.com.mx/assets/files/reportes/Anuales/PEN_IA23-ESP.pdf)
- Peñoles S.A.B. de C.V. (2024). *Informe de sostenibilidad 2023*. Obtenido de <https://www.penoles.com.mx/IDS23/pdf/Penoles-informe-sostenibilidad-2023.pdf>
- Pereira, A., Carvalho, M., Oliveira, F., Mendes, J., Ribeiro, A., Vasconcellos, L., & Mendes, R. (2019). Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*, 262. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820328889>
- Qin, J., Cui, X., Yan, H., Lu, W., & Lin, C. (2019). Active Treatment of Acidic Mine Water to Minimize Environmental Impacts in a Densely Populated Downstream Area. *Journal of Cleaner Production*, 210, 309-316. Obtenido de <https://salford-repository.worktribe.com/output/1376251/active-treatment-of-acidic-mine-water-to-minimize-environmental-impacts-in-a-densely-populated-downstream-area.com>
- Ramos, N., & Villegas, A. (2024). *Antofagasta launches desalination plant for Los Pelambres copper mine in Chile*. Obtenido de Reuters: <https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/antofagasta-launches-desalination-plant-los-pelambres-copper-mine-chile-2024-03-21/>
- Ramos, R., Aerts, P., Guzmán, E., & Pacheco, J. (2010). *Case study: Mining Company Reclaims Wastewater in Mexico*. Obtenido de Environmental Protection: <https://eponline.com/articles/2010/06/14/case-study-mining-company-reclaims-wastewater-in-mexico.aspx>
- Reifel, R. (2015). *Gold miner opts for desalination to supply planned Mexican mine*. Obtenido de Water, desalination + reuse: <https://www.desalination.biz/projects/gold-miner-opts-for-desalination-to-supply-planned-mexican-mine/>
- Responsible Mining Foundation. (2020). *Mining and the SDGs: Update on the situation in 2020*. Obtenido de <https://www.responsibleminingfoundation.org/es/mining-and-the-sdgs/>
- Romero, F., Mendoza, L., Meza, D., Martínez, M., Centeno, E., García, L., & Meza, M. (2019). Health Risk Assessment in Children by Arsenic and Mercury Pollution of Groundwater in a Mining Area in Sonora, Mexico. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7. Obtenido de <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=93227>
- Sarrazin, V., Moura, P., Pissarra, T., Junior, R., Silva, M., Valera, C., . . . Leal, F. (2024). Groundwater flow and transport of metals under deposits of mine tailings: A case study in Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424000847?via%3Dihub>
- Secretaría de economía. (2024). *Secretaría de economía*. Obtenido de Minería: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *NOM-141-SEMARNAT-2003*. Obtenido de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *NOM-157-SEMARNAT-2009*. Obtenido de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6665/1/nom-157-semarnat-2009.pdf>



- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021*. Obtenido de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- Secretaría de Salud. (2021). *NOM-127-SSA1-2021*. Obtenido de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5650705](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705)
- SESELEC. (2009). *Central Hidroeléctrica "Las Truchas"*. Obtenido de SESELEC: <https://seselec.com/proyectos/centrales-hidroelectricas/central-hidroelectrica-las-truchas-7-mw/>
- Siddique, S., & Gook Jang, J. (2020). Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. *Building Engineering*, 31. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219326567>
- Spitz, K., & Trudinger, J. (2019). *Mining and the Environment from Ore to Metal*. London: Taylor & Francis Group.
- Starcore International Mines Ltd. (2024). *Starcore's Dry Stack Tailings Approved for 10 More Years*. Obtenido de Mexico Mining Center: <https://www.mexicominingcenter.com/starcores-dry-stack-tailings-approved-for-10-more-years/>
- Tebogo, M., & Thandiwe, S. (2021). Clean production of sustainable backfill material from waste gold tailings and slag. *Journal of Cleaner Production*, 308. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621015766>
- Terrafame. (2025). *Sustainability report 2024*. Obtenido de [https://www.terrafame.com/media/mediamateriaali/raportointi/kestavan-kehityksen-katsaukset/eng/terrafame\\_sustainability\\_report\\_2024.pdf](https://www.terrafame.com/media/mediamateriaali/raportointi/kestavan-kehityksen-katsaukset/eng/terrafame_sustainability_report_2024.pdf)
- Torex Gold Resources. (2025). *2024 Responsible gold mining report*. Obtenido de [https://dlvqu5ynjuwmt0.cloudfront.net/assets/files/7238/torex\\_2024rgmr\\_final.pdf](https://dlvqu5ynjuwmt0.cloudfront.net/assets/files/7238/torex_2024rgmr_final.pdf)
- Ussiri, D., Lal, R., & Jacinthe, P. (2006). Soil Properties and Carbon Sequestration of Afforested Pastures in Reclaimed Minesoils of Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1797-1806. Obtenido de <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2005.0352>
- Uzarowicz, L., Wolińska, A., Błońska, E., Szafrank-Nakonieczna, A., Kuźniar, A., Słodczyk, Z., & Kwasowski, W. (2020). Technogenic soils (Technosols) developed from mine spoils containing Fe sulphides: Microbiological activity as an indicator of soil development following land reclamation. *Applied Soil Ecology*, 156. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139320306284>
- VALE. (2023). *Water and effluents*. Obtenido de <https://saladeimprensa.vale.com/ca/esg/water-and-effluents.com>
- Vilaça, A., Simão, L., Montedo, O., Novaes de Oliveira, A., & Raupp-Pereira, F. (2022). Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. *Resources Policy*, 75. Obtenido de <http://sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721004852>
- Wang, X.-g., Wan, W., Yao, Z.-l., Gao, R.-g., Lu, Z.-x., Tang, X. Y., & Bao-jie, F. (2023). Study on strength characteristics and thickening characteristics of classified-fine cemented backfill in gold mine. *scientific reports*, 13. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-023-35254-w>
- White, C., & Markwiese, J. (2008). Assessment of the potential for in situ bioremediation of cyanide and nitrate contamination at a heap leach mine in central new Mexico. *Soil Contamination*,



- 3, 271-283. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/15320389409383469?scroll=top&needAccess=true>
- Williamson, P. (2019). *Baseline Investigations and Preliminary Design for an In-Pit Tailings Storage Facility*. Obtenido de INTERA: <https://www.intera.com/baseline-investigations-and-preliminary-design-for-an-in-pit-tailings-storage-facility/>
- Wolkersdorfer, C. (2006). Flooded Underground Mines: Case Studies. En C. Wolkersdorfer, *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*.
- Wu, A., Miao, X., Liu, X., Wang, Y., Wang, C., & Zhang, J. (2015). Paste backfill system design and commissioning at Chambishi Copper Mine. *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 301-308. Obtenido de [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1504\\_22\\_Xiuxiu/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1504_22_Xiuxiu/)
- Wu, S., Liu, Y., Southam, G., Paterson, D., Robertson, L., Merinda, S., & Huang, L. (2023). Ecological engineering of iron ore tailings into useable soils for sustainable rehabilitation. *Science*, 7. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223011793>
- Yao, R., Liao, S. Y., Dai, C. L., Liu, Y. C., Chen, X., & Zheng, F. (2015). Preparation and characterization of novel glass-ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings. *Magnetism and Magnetic Materials*, 378, 367-375. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885314011858>
- Yoplac, E., Martínez, P., Avalo, O., & Uza, J. (2024). Aplicación de la Economía Circular en la Industria Metalúrgica Minera para la Recuperación de oro y la Producción de Ladrillos a partir de Relaves. *European Public & Social Innovation Review*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/384767079\\_Aplicacion\\_de\\_la\\_Economia\\_Circular\\_en\\_la\\_Industria\\_Metalurgica\\_Minera\\_para\\_la\\_Recuperacion\\_de\\_oro\\_y\\_la\\_Produccion\\_de\\_Ladrillos\\_a\\_partir\\_de\\_Relaves](https://www.researchgate.net/publication/384767079_Aplicacion_de_la_Economia_Circular_en_la_Industria_Metalurgica_Minera_para_la_Recuperacion_de_oro_y_la_Produccion_de_Ladrillos_a_partir_de_Relaves)
- Younger, P., Banwart, S., & Hedin, R. (2002). *Mine Water "Hydrology, Pollution, Remediation"*. SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA.
- Zhang, Q., Zhang, B., Qiusong, C., & Wang, D. G. (2021). Safety Analysis of Synergetic Operation of Backfilling the Open Pit Using Tailings and Excavating the Ore Deposit Underground. *Minerals*, 11. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/8/818>