



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO EN LA INDUSTRIA  
MINERA: ENFOQUES METODÓLOGICOS Y PROYECCIONES PARA  
CHILE

VICENTE JOAQUÍN PÉREZ MOLINA

PROFESOR(ES) GUÍA: HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD y LORENZO REYES  
BOZO, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER  
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS

SANTIAGO – CHILE  
2025



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

**INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO EN LA INDUSTRIA  
MINERA: ENFOQUES METODÓLOGICOS Y PROYECCIONES PARA  
CHILE**

Por: VICENTE JOAQUÍN PÉREZ MOLINA

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESOR GUÍA: LORENZO REYES BOZO, PHD**

**PROFESOR INTEGRANTE 1: JUAN CARLOS VIDAL, PHD**

**PROFESOR INTEGRANTE 2: EDUARDO VILLAROEL, PHD**

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y  
Sistemas en la Universidad del Desarrollo de Chile

Diciembre, 2025

Santiago, Chile

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado **MODELO INTEGRADO DE GESTIÓN DE RIESGOS PARA DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y EL MARCO REGULATORIO**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo, a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



VICENTE JOAQUÍN PÉREZ MOLINA

Firma

*A mi padre, Luis  
Por enseñarme que la verdadera fuerza  
nace del silencio del esfuerzo  
y de la voluntad de avanzar sin temor.*

*A Javiera  
Por tu amor, tu paciencia y tu luz,  
que transforman cada desafío en propósito.*

*Y a mis futuros hijos  
Para que sueñen sin límites,  
caminen con valentía  
y recuerden siempre  
que en cada paso que demos juntos,  
somos invencibles...*

...

## AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este proceso académico, profesional y personal, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible esta etapa que hoy concluye, y que ha significado no solo la culminación de un magíster, sino también un crecimiento integral como persona y como profesional. Cada experiencia vivida, cada conversación y cada desafío superado fueron el resultado de un esfuerzo compartido que deja huellas imborrables en mi camino.

En primer lugar, extiendo mi gratitud a mis compañeros y compañeras del Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas (MIIS). Gracias por sus historias, anécdotas, conocimientos y puntos de vista que enriquecieron enormemente mi proceso de aprendizaje. Cada diálogo, trabajo grupal y jornada de estudio representó una oportunidad para crecer en conjunto, comprendiendo la importancia de la colaboración y la diversidad de experiencias dentro del mundo profesional. El compañerismo, la empatía y la disposición al apoyo mutuo que encontré en cada uno de ustedes marcaron esta etapa de manera profunda y significativa.

A mi pareja, Javiera, le debo un agradecimiento muy especial. Su apoyo incondicional, su paciencia en los momentos más demandantes y su constante motivación fueron fundamentales para mantener el equilibrio entre la exigencia académica y la vida personal. Su presencia me recordó que los logros se construyen en compañía, con amor, confianza y comprensión mutua. Este resultado es tanto mío como suyo, reflejo del esfuerzo compartido y de la inspiración que su compañía me entrega día a día.

Quiero agradecer también al profesor Héctor Valdez, quien ha sido una guía clave en mi desarrollo académico y profesional. Su orientación, consejos y acompañamiento a lo largo de este proceso no solo fortalecieron mi capacidad analítica, sino también mi criterio para aplicar la ingeniería desde una mirada humana, ética y estratégica. A través de su enseñanza comprendí la relevancia de conectar los conocimientos técnicos con la gestión organizacional, la innovación y la sostenibilidad, promoviendo un enfoque integral de la ingeniería aplicada a los desafíos actuales.

A mis padres, Luis y Mónica, les dedico este logro con gratitud infinita. Ellos han sido mi base y mi mayor ejemplo de constancia, trabajo y compromiso. Gracias por su apoyo incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por estar presentes en cada paso que he dado. Este logro es también de ustedes, porque sin su amor, confianza y enseñanzas, nada de esto habría sido posible. Todo lo que soy y todo lo que logro se sustenta en los valores que ustedes me entregaron desde siempre.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todos los profesores y profesoras del Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas, quienes, con su vocación docente, su exigencia académica y su compromiso con la formación profesional, contribuyeron significativamente a mi desarrollo. Cada clase, proyecto y evaluación fue una oportunidad para adquirir nuevas perspectivas y fortalecer mis habilidades técnicas, analíticas y de liderazgo.

# INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO EN LA INDUSTRIA MINERA: ENFOQUES METODOLÓGICOS Y PROYECCIONES PARA CHILE

VICENTE JOAQUÍN PÉREZ MOLINA

Bajo la supervisión de los profesores Héctor Valdés-González, PhD y Lorenzo Reyes Bozo, PhD en la Universidad del Desarrollo de Chile

## Resumen

La industria minera constituye uno de los sectores productivos más relevantes a nivel global y, en particular, para Chile, país que concentra una proporción significativa de la producción mundial de cobre y litio, y que enfrenta crecientes desafíos asociados a productividad, sostenibilidad ambiental, legitimidad social y exigencias regulatorias. En este contexto, los indicadores clave de desempeño (KPIs) se han consolidado como herramientas estratégicas para apoyar la toma de decisiones, mejorar la eficiencia operativa y fortalecer la transparencia organizacional; sin embargo, su aplicación presenta altos niveles de heterogeneidad metodológica entre países y operaciones. El objetivo de esta investigación es analizar la aplicación de KPIs en la industria minera para comprender su impacto en la productividad, la sostenibilidad ambiental y la gestión social en distintos contextos internacionales. La investigación se desarrolló mediante un metaanálisis de corte transversal que consideró 50 artículos científicos publicados entre los años 2009 y 2025 en Europa, América, Asia y África, incluyendo estudios con metodologías cualitativas, cuantitativas y mixtas. Los artículos fueron sistematizados según variables como país de origen, enfoque metodológico, tipo de indicadores, área minera de aplicación y principales resultados. Los resultados evidencian convergencias en el uso de KPIs para medir productividad, seguridad y desempeño ambiental, así como beneficios operativos asociados a la digitalización, el análisis multicriterio y el uso de inteligencia artificial, no obstante, persisten brechas relevantes en estandarización, integración de indicadores sociales y de gobernanza, y evaluación longitudinal del desempeño. Este estudio vislumbra la necesidad de avanzar hacia marcos metodológicos integradores y estandarizados, apoyados en plataformas digitales y programas de formación especializada, que permitan fortalecer la competitividad, sostenibilidad y legitimidad social de la minería chilena en el largo plazo.

**Palabras claves:** Indicadores de desempeño, minería sostenible, productividad, innovación tecnológica, desempeño operativo

## HIGHLIGHTS

# INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO EN LA INDUSTRIA MINERA: ENFOQUES METODÓLOGICOS Y PROYECCIONES PARA CHILE

VICENTE JOAQUÍN PÉREZ MOLINA

- Analizar la aplicación de KPIs en minería e impacto en productividad y sostenibilidad.
- Metaanálisis transversal de estudios globales sobre desempeño y gestión minera.
- Cincuenta artículos científicos entre 2008 y 2025 aplicados a la industria minera.
- Los KPIs mejoran eficiencia, reducen impactos y fortalecen la gestión social minera.
- Chile debe adaptar marcos de KPIs globales hacia minería más sostenible e innovadora

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	8
1.1	Modelo metodológico de indicadores clave de desempeño: Novedad, propuesta y contribución.....	10
1.2	Objetivos de la investigación.....	11
2	Metodología.....	11
3	Resultados.....	12
3.1	Análisis de resultados.....	15
3.2	Discusión de resultados.....	23
4	Conclusiones.....	24
5	Referencias.....	26
6	Anexo: Revisión de plagio.....	31

# 1 Introducción

La minería constituye uno de los pilares productivos más relevantes a nivel global y en Chile, donde representa un motor de desarrollo económico, tecnológico y social. Su complejidad proviene de la convergencia de elementos técnicos, ambientales y sociales que abarcan desde la exploración geológica, la extracción y el procesamiento de minerales, hasta la gestión de flotas, el mantenimiento de equipos y la relación con comunidades aledañas. En este escenario, los KPIs se han consolidado como instrumentos estratégicos para evaluar productividad, sostenibilidad y legitimidad social. Sin embargo, la falta de estandarización internacional y la heterogeneidad en su aplicación dificultan la comparación entre países y limitan su potencial para orientar políticas públicas y estrategias empresariales. La literatura especializada muestra que marcos como Balanced Scorecard, AHP o metodologías de economía circular permiten articular eficiencia operativa con responsabilidad socioambiental, pero aún existen vacíos en la integración de datos técnicos y sociales.

La problemática se acentúa ante la disminución de leyes minerales, el alza de costos energéticos e hídricos y las mayores exigencias sociales y regulatorias. Estos factores presionan a la industria a diseñar modelos de gestión más resilientes y sostenibles. En este contexto, los KPIs trascienden la función de simples métricas, pues permiten anticipar riesgos, optimizar recursos críticos y fortalecer la transparencia hacia actores internos y externos. Estudios recientes en Australia, Canadá y Chile destacan el valor de incorporar metodologías avanzadas como minería de datos, inteligencia artificial y análisis multicriterio, capaces de generar marcos robustos para la toma de decisiones estratégicas. Este giro metodológico revela la necesidad de adaptar estándares internacionales a realidades locales, considerando tanto la eficiencia técnica como la gobernanza y la legitimidad.

La posición de liderazgo de Chile en la producción de cobre y litio otorga a su minería un rol estratégico en la transición energética mundial, lo que refuerza la urgencia de un marco metodológico integrador. La articulación de KPIs técnicos, ambientales y sociales, apoyada en plataformas digitales basadas en Big Data y monitoreo en tiempo real, permitiría avanzar hacia modelos más productivos y responsables. A su vez, la capacitación del capital humano y la cooperación universidad–empresa–comunidad son componentes esenciales para consolidar un sector competitivo y socialmente legitimado. De esta manera, el desarrollo de indicadores coherentes y adaptados a las particularidades nacionales aparece no solo como un desafío académico, sino también como una condición indispensable para asegurar la sostenibilidad de la industria minera en el largo plazo.

## **Indicadores clave de desempeño (KPIs)**

Los KPIs constituyen herramientas fundamentales para la gestión organizacional, al permitir traducir los objetivos estratégicos en métricas operativas cuantificables y comparables. Su desarrollo ha evolucionado desde enfoques tradicionales centrados en productividad y control de costos hacia modelos integrales que incorporan dimensiones ambientales, sociales y de gobernanza. Esta evolución responde a la creciente complejidad de los sistemas productivos y a la necesidad de alinear el desempeño operativo con criterios de sostenibilidad y legitimidad social, especialmente en industrias intensivas en recursos como la minería.

Desde la literatura especializada, la definición y priorización de KPIs se apoya en diversas metodologías consolidadas. Entre las más utilizadas se encuentran el Balanced Scorecard, que articula indicadores financieros y no financieros en torno a la estrategia organizacional el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que permite jerarquizar indicadores mediante criterios multicriterio y juicios expertos y los enfoques Lean y Lean Six Sigma, orientados a la mejora continua, reducción de desperdicios y control de la variabilidad. En contextos más recientes, estas metodologías se han complementado con herramientas de minería de datos, inteligencia artificial y sistemas IIoT, que posibilitan la captura y análisis de información en tiempo real, fortaleciendo la capacidad predictiva y la trazabilidad de los indicadores.

En la industria minera, los KPIs adquieren una relevancia particular debido a la necesidad de gestionar simultáneamente eficiencia técnica, seguridad operacional, sostenibilidad ambiental y relaciones comunitarias. La literatura evidencia que la aplicación de marcos metodológicos estructurados para definir KPIs permite mejorar la toma de decisiones estratégicas, optimizar el uso de recursos críticos como energía y agua, reducir riesgos operacionales y fortalecer la transparencia frente a actores internos y externos. Asimismo, los beneficios asociados a una correcta implementación de KPIs incluyen mayor comparabilidad entre operaciones y países, alineación entre objetivos corporativos y desempeño operativo, y generación de información confiable para el diseño de políticas públicas y estrategias empresariales. No obstante, persisten desafíos relevantes en la estandarización de indicadores y en la integración efectiva de dimensiones sociales y ambientales, lo que refuerza la necesidad de avanzar hacia marcos metodológicos integradores y adaptados a las particularidades de cada contexto nacional.

### **Industria minera**

La industria minera presenta particularidades que la diferencian de otros sectores productivos. Sus procesos abarcan exploración, extracción, procesamiento, transporte y cierre de faenas, todos ellos condicionados por factores geológicos y ambientales. Al mismo tiempo, enfrenta desafíos crecientes vinculados a altos costos energéticos, uso intensivo de agua, fluctuación de leyes minerales y presión social de comunidades que demandan legitimidad y beneficios compartidos. En este contexto, los KPIs surgen como instrumentos indispensables para gestionar simultáneamente productividad, sostenibilidad y confianza social.

### **Experiencias y aprendizajes internacionales**

La experiencia internacional ofrece aprendizajes significativos. Australia y Canadá han implementado sistemas avanzados de KPIs integrados en plataformas digitales, combinando inteligencia artificial y monitoreo en tiempo real, lo que ha permitido mejorar seguridad, eficiencia energética y legitimidad social. Estas prácticas, sumadas a modelos de gobernanza participativa en países nórdicos, evidencian que la estandarización de indicadores, junto con la inversión en innovación tecnológica y capital humano, son condiciones críticas para alcanzar niveles superiores de competitividad y sostenibilidad.

### **Proyecciones para Chile**

Las proyecciones para Chile apuntan a la necesidad de articular un marco metodológico que combine productividad, sostenibilidad ambiental, legitimidad social y digitalización. La incorporación de Big Data, IoT e inteligencia artificial se perfila como una oportunidad para

estandarizar KPIs bajo criterios globales y adaptarlos a las particularidades del sector local. Esto no solo permitiría cerrar brechas de comparabilidad, sino también consolidar a la minería chilena como referente en eficiencia y sostenibilidad, contribuyendo al liderazgo global en cobre y litio en la transición energética.

Entendida esta realidad, y considerando la revisión bibliográfica presentada, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿Cómo contribuye la aplicación de KPIs a mejorar la productividad, sostenibilidad y competitividad en la industria minera a nivel global y en el contexto chileno?

En la industria minera chilena se hace necesario un estudio que dé cuenta del estado del arte y de las mejores prácticas internacionales para el cumplimiento de procesos productivos bajo criterios de eficiencia, sostenibilidad ambiental y legitimidad social. La complejidad de este sector exige marcos comparativos que permitan evaluar no solo el desempeño técnico, sino también la capacidad de adaptación frente a los desafíos económicos, ambientales y sociales que enfrenta la minería contemporánea.

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales, cabe destacar que la principal motivación de este estudio surge del exigente marco regulatorio, de los crecientes costos energéticos, de la escasez hídrica y de las presiones sociales vinculadas a la aceptación de los proyectos mineros. Frente a este escenario, se propone consolidar herramientas y análisis clave a partir de un metaanálisis de literatura internacional sobre KPIs, integrando metodologías multicriterio, enfoques Lean y tecnologías digitales basadas en Big Data e inteligencia artificial.

Este enfoque permite identificar patrones, beneficios operativos y tendencias globales, aportando evidencia comparativa sobre productividad, sostenibilidad y competitividad, y generando lineamientos prácticos para su implementación en contextos productivos diversos. En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar, mediante un metaanálisis de 50 artículos internacionales, la aplicación de KPIs en la minería, identificando enfoques metodológicos, beneficios alcanzados y desafíos emergentes vinculados a sostenibilidad, competitividad y digitalización.

## 1.1 Modelo metodológico de indicadores clave de desempeño: Novedad, propuesta y contribución

La propuesta de este estudio radica en la construcción de un marco metodológico integrador para la aplicación de KPIs en la industria minera, articulando dimensiones técnicas, ambientales y sociales bajo criterios internacionales de estandarización. La novedad del modelo reside en combinar enfoques de minería de datos, análisis multicriterio y aprendizaje automático con principios de sostenibilidad y gobernanza, permitiendo una evaluación dinámica y predictiva del desempeño minero. Las preguntas que orientan la investigación son: ¿cómo contribuye la aplicación de los KPIs a mejorar la productividad, sostenibilidad y competitividad de la industria minera a nivel global y nacional?, ¿qué brechas metodológicas y de estandarización persisten entre distintos países en la implementación de KPIs? y ¿de qué manera pueden los enfoques tecnológicos y de gestión actuales adaptarse al contexto chileno para fortalecer su eficiencia y legitimidad social? La contribución principal del estudio es ofrecer un modelo replicable y adaptable al contexto chileno, alineado con las tendencias globales de digitalización, economía circular y transición energética, que permita no

solo medir el desempeño, sino también anticipar riesgos, optimizar la gestión de recursos y fortalecer la sostenibilidad y transparencia del sector minero.

## 1.2 Objetivos de la investigación

El objetivo general de esta investigación es analizar la aplicación de KPIs en la industria minera, con el propósito de identificar su contribución a la eficiencia operativa, la sostenibilidad de los recursos y la generación de valor social, tanto a nivel internacional como en el contexto chileno. Este análisis busca consolidar una comprensión integral sobre cómo los KPIs pueden convertirse en herramientas estratégicas que fortalezcan la productividad, la transparencia y la legitimidad del sector minero frente a los desafíos de competitividad global y transición energética.

Los objetivos específicos son:

- Examinar las principales metodologías aplicadas internacionalmente en la gestión de KPIs dentro de la industria minera, considerando sus enfoques técnicos, ambientales y sociales.
- Evaluar los beneficios operativos, económicos y sostenibles derivados de la implementación de modelos y tecnologías asociadas a los KPIs.
- Comparar experiencias, enfoques y resultados entre distintos países para determinar la transferibilidad y aplicabilidad de sus prácticas al contexto chileno.
- Proyectar lineamientos estratégicos que orienten la toma de decisiones en torno a la innovación, la eficiencia energética y la legitimidad social del sector minero chileno.

## 2 Metodología

Se trata de un estudio de corte transversal, del tipo metaanálisis, en el que se analizaron 50 artículos originales de investigación publicados en revistas científicas y conferencias internacionales de Europa, Norteamérica, Sudamérica, Asia y África, entre enero de 2005 y junio de 2025. Los criterios de selección fueron: acceso virtual a artículos originales completos en inglés y español, pertinencia directa con la industria minera o con metodologías aplicables a ella (Lean, Six Sigma, Balanced Scorecard, IIoT, inteligencia artificial, minería de datos), y la inclusión de KPIs como variable central de análisis. Se excluyeron editoriales, cartas al editor y revisiones narrativas sin evidencia empírica.

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos académicas de alto impacto, entre las que se incluyeron Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore y Google Scholar. Para ello, se utilizaron combinaciones de palabras clave estructuradas mediante operadores booleanos, tales como: "Key Performance Indicators AND mining, KPIs AND productivity AND sustainability, Lean mining, IIoT AND mining, artificial intelligence AND mining performance y benchmarking AND mining operations", aplicadas tanto en inglés como en español. La aplicación inicial de estas queries generó un universo ampliado de publicaciones, las cuales fueron posteriormente depuradas mediante filtros por período temporal, tipo de documento, idioma y pertinencia temática. Como resultado de este proceso, un número significativo de artículos fue descartado por duplicidad, falta de acceso completo o escasa relación con el objeto de estudio, consolidándose finalmente una muestra definitiva de cincuenta artículos para el análisis en profundidad.

Todos los artículos que cumplieron los criterios de elegibilidad fueron sometidos a un análisis de contenido realizado por el investigador, utilizando como instrumento de recolección una hoja de registro estructurada. Esta incluyó los siguientes ítems: año de publicación, país de origen de la revista, filiación institucional de los autores, metodología aplicada, objetivos del estudio, sujetos de análisis, área minera específica, tipo de indicadores considerados y principales resultados. El análisis integró enfoques cualitativos, cuantitativos y mixtos, orientados a la excelencia operacional, sostenibilidad, productividad y gobernanza.

Las variables del estudio se operacionalizaron de acuerdo con las siguientes categorías de respuesta:

- Año de publicación: 2005 al 2025, con acceso digital completo.
- Área temática: KPIs en minería y su impacto en productividad, sostenibilidad y aceptación social.
- Metodología: cualitativa, cuantitativa y mixta (AHP, programación por metas, minería de datos, simulación Monte Carlo, IIoT, aprendizaje automático, análisis de series temporales, benchmarking internacional).
- Sujetos de estudio: empresas mineras (Chile, Perú, India, Brasil, Australia, Canadá, EE. UU., Corea del Sur, Suecia), proveedores tecnológicos y comunidades locales.
- Filiación institucional de los autores: investigadores universitarios, consultores internacionales, ingenieros de compañías mineras y actores institucionales.
- Continente de origen de las revistas: Europa, América, Asia y África.

La revisión de los artículos se realizó mediante lectura completa de secciones de metodología y resultados, focalizando en la identificación de contribuciones metodológicas, convergencias y divergencias en el uso de KPIs. Los datos fueron registrados en una planilla Excel, organizados en matrices comparativas y analizados mediante medidas de asociación, síntesis temática y construcción de tablas de resumen, permitiendo elaborar un marco integrado de análisis aplicable a la industria minera chilena e internacional. Los datos fueron ingresados a una planilla Excel para realizar registro, medidas de asociación y tablas de resumen (Ahmed, 2022; Alarcón, 2023a; Ayswer, 2024; Bravo-Ortega & Muñoz, 2015; Comisión Nacional de Productividad, 2017; Cruz Villazón et al., 2020; De Solminihac et al., 2014; Đurić et al., 2010; Fernandes & Alves, 2023; Figueiredo et al., 2024; Franks et al., 2011; Gackowiec et al., 2020; Gaete Vielma, 2019; Gan et al., 2018; Huerta Ibañez et al., 2023; Hurtado-Martell, 2025; Ito et al., 2023; Johansson & Pettersson, 2019; Khorasgani et al., 2020; Knights & Oyanader, 2005; Latorre et al., 2010; Leiva González & Onederra, 2022; Leung et al., 2023; Lourenço & Pereira, 2023; Malo et al., 2019; Mesa et al., 2025; Milani & Maggi, 2018; Nguyen et al., 2016; OECD, 2023; Olsson & Franke, 2019; Ormevik et al., 2023; Ortega et al., 2016; Ortega et al., 2018; Parreira et al., 2009; Park et al., 2025; Pereira et al., 2023; PricewaterhouseCoopers Australia, 2014; Recabarren et al., 2022; Roa & Sánchez, 2022; Rødseth et al., 2023; Rodríguez-Luna et al., 2022; Ruiz del Solar, 2020; Shaabani et al., 2023; Shaw et al., 2022; Silva & Ayres da Silva, 2024; Smith & Mastorakos, 2023; Yorio et al., 2020; Zhang et al., 2023; Zis et al., 2023).

### 3 Resultados

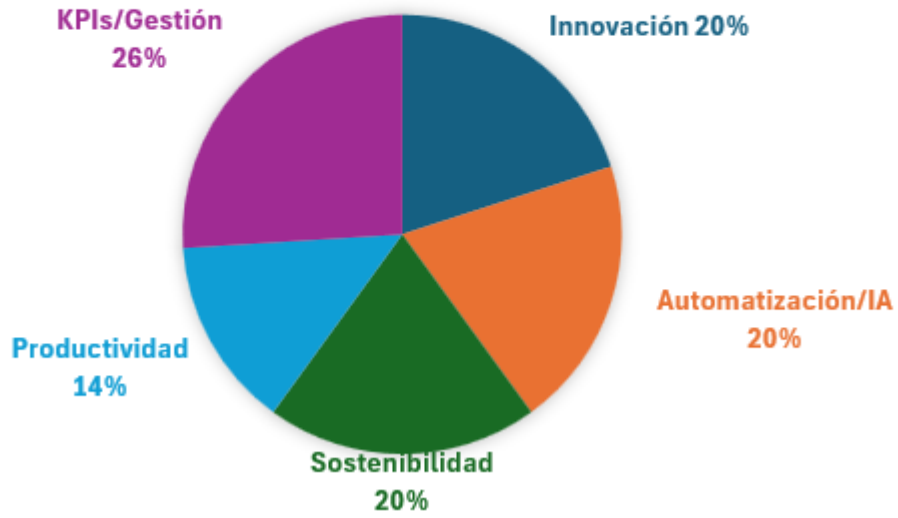
La distribución de los cincuenta artículos analizados muestra que América concentra la mayor producción (52%), seguida de Europa (20%), Asia (10%), Oceanía (12%) y África (6%), con un incremento sostenido a lo largo del tiempo y un peak en 2023 (30%). Chile lidera en número de

contribuciones, destacando en productividad y sostenibilidad, mientras que Australia y Canadá concentran esfuerzos en automatización y gestión de procesos. Estas tendencias, confirmadas por los gráficos de torta, barras y mapa de calor, reflejan la consolidación de los KPIs como herramienta central, con una creciente integración de dimensiones ambientales, sociales y tecnológicas.

**Tabla 1: Distribución de artículos según año de publicación y continente de procedencia**

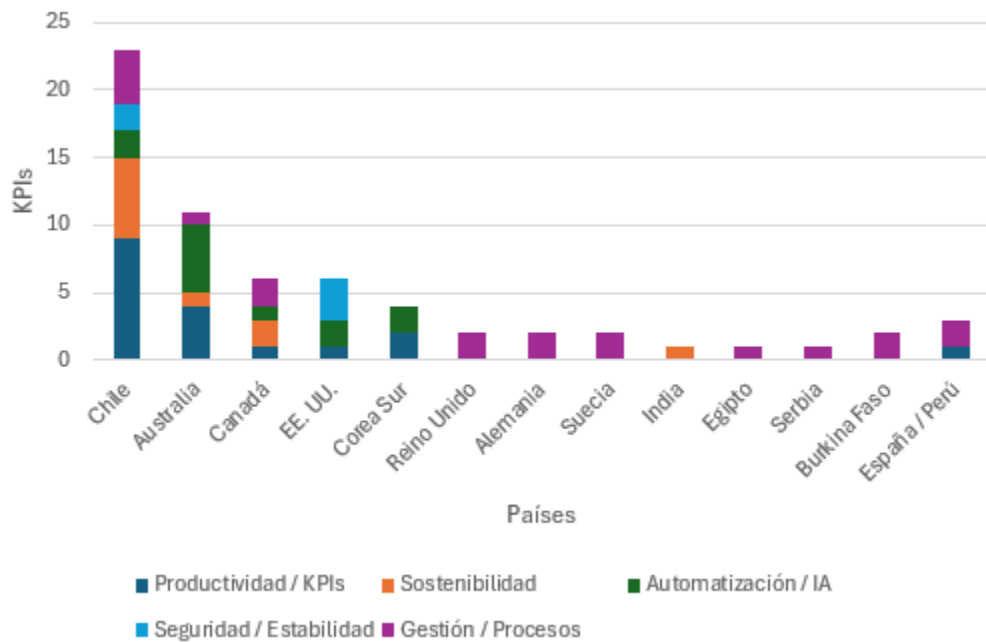
Año	África		Asia		Europa		Oceanía		América		Total n	Total %
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
2008	0	0%	0	0%	0	0%	2	4%	0	0%	2	4%
2009	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	2%	1	2%
2010	0	0%	0	0%	2	4%	0	0%	0	0%	2	4%
2014	0	0%	0	0%	1	2%	0	0%	2	4%	3	6%
2016	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	4%	2	4%
2018	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	4%	2	4%
2019	2	4%	0	0%	1	2%	0	0%	1	2%	4	8%
2020	0	0%	0	0%	1	2%	2	4%	5	10%	8	16%
2022	1	2%	0	0%	0	0%	0	0%	4	8%	5	10%
2023	0	0%	2	4%	3	6%	2	4%	8	16%	15	30%
2024	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	0	0%	1	2%
2025	0	0%	2	4%	2	4%	0	0%	1	2%	5	10%
<b>Total General</b>	<b>3</b>	<b>6%</b>	<b>5</b>	<b>10%</b>	<b>10</b>	<b>20%</b>	<b>6</b>	<b>12%</b>	<b>26</b>	<b>52%</b>	<b>50</b>	<b>100%</b>

## DISTRIBUCIÓN GLOBAL DE CONCEPTOS CLAVE



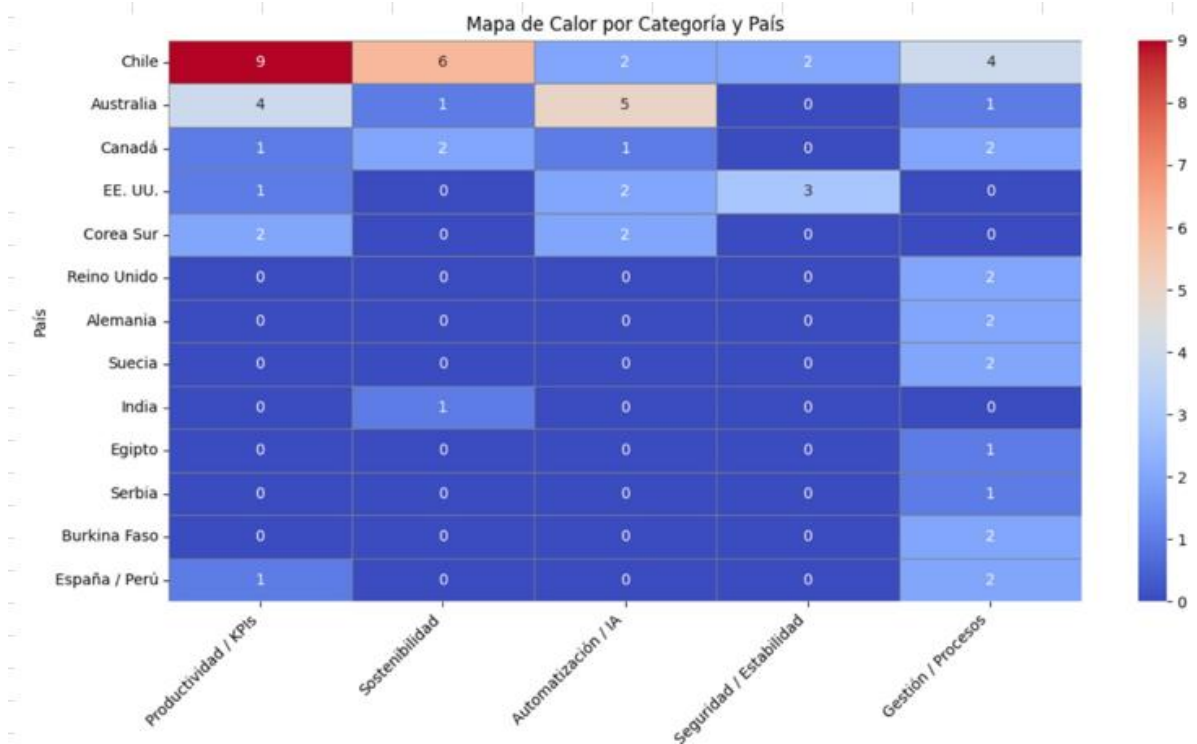
**Ilustración 1: Distribución global de conceptos claves**

El gráfico muestra la proporción de los principales conceptos asociados a KPIs en minería. Innovación es el eje predominante, seguido por gestión de KPIs, mientras que automatización y productividad representan dimensiones complementarias. La distribución refleja la relevancia creciente de la innovación y la estandarización en la investigación minera.



**Ilustración 2: Contribuciones por país de estudio agrupadas en conceptos claves**

El gráfico compara la producción académica por país, agrupada en ejes temáticos de KPIs en minería. Chile lidera con mayor número de aportes, seguido de Australia y Canadá, reflejando un énfasis en productividad, sostenibilidad y gestión de procesos. Otros países como EE. UU., Corea del Sur y Europa aportan en menor medida, destacando la diversidad metodológica y regional en el estudio de indicadores de desempeño.



**Ilustración 3: Mapa de calor**

### 3.1 Análisis de resultados

El mapa de calor muestra la frecuencia de contribuciones de los países en distintas categorías de KPIs. Chile destaca con la mayor concentración en Productividad/KPIs y Sostenibilidad, mientras que Australia presenta un fuerte enfoque en Automatización/IA. Países como EE. UU. y Corea del Sur concentran esfuerzos en Seguridad/Estabilidad y Productividad, respectivamente. En contraste, regiones como India, Egipto, Serbia y Burkina Faso exhiben contribuciones más limitadas y focalizadas. El gráfico refleja la diversidad temática y regional en torno al estudio de indicadores de desempeño en la minería.

#### 1. ¿Cuál es el tema central de los trabajos?

Los trabajos revisados coinciden en destacar a los KPIs como herramientas esenciales para mejorar productividad, sostenibilidad y eficiencia en la minería. Se aprecia convergencia en el uso de marcos comparativos como GMG, Lean y Balanced Scorecard, que buscan estandarizar la evaluación operativa y social. Sin embargo, emergen divergencias en cuanto al alcance: algunos estudios

enfatan la productividad técnica y económica, mientras otros privilegian los indicadores sociales y ambientales, mostrando así la necesidad de integrar dimensiones múltiples en un sector tensionado por exigencias de competitividad y sostenibilidad.

En términos académicos, los estudios aportan valor al introducir metodologías avanzadas como minería de datos, aprendizaje automático y modelos predictivos aplicados a procesos mineros. Destaca la adaptación de marcos globales a contextos locales, como en Chile, India, Burkina Faso y Australia, donde regiones como Pilbara funcionan como laboratorios de automatización y digitalización. Ello evidencia la relevancia de enfoques situados para comprender las particularidades de la gestión del desempeño en faenas mineras. Estas contribuciones subrayan la originalidad metodológica y el carácter interdisciplinario de la investigación reciente en productividad minera.

Las implicancias teóricas y prácticas son significativas. Desde una perspectiva conceptual, los KPIs se consolidan no solo como métricas de control, sino también como instrumentos de innovación cultural y organizacional. En el plano práctico, los hallazgos sugieren la urgencia de estandarizar indicadores, mejorar la calidad y trazabilidad de datos, invertir en formación especializada y fortalecer la cooperación entre compañías mineras, proveedores y universidades, de manera que los KPIs se conviertan en catalizadores de transformación productiva y sustentable.

Persisten vacíos importantes, particularmente en la integración entre indicadores técnicos y sociales, así como en la evaluación longitudinal de su impacto en sostenibilidad. Se requiere investigar cómo los sistemas de KPIs responden a escenarios de incertidumbre como la variabilidad de leyes minerales, crisis hídricas o presiones sociales. El futuro apunta a explorar el potencial de la inteligencia artificial, el big data y el análisis multicriterio en la minería, tomando como referencia experiencias pioneras de Australia, para generar modelos predictivos que fortalezcan tanto la resiliencia como la legitimidad del sector.

## **2. ¿Qué metodología o marco metodológico se aplicó en las investigaciones?**

Los estudios revisados muestran una marcada convergencia en torno al rol de los KPIs como instrumentos de estandarización y optimización en la minería. Desde enfoques cuantitativos clásicos, como la productividad total de factores, hasta indicadores de sostenibilidad social y ambiental, las investigaciones articulan un campo diverso donde conviven análisis de eficiencia operativa, evaluación de riesgos y mediciones comunitarias. Sin embargo, se observa una divergencia significativa entre trabajos centrados en dimensiones técnicas y aquellos orientados a impactos socioambientales, lo que refleja la necesidad de marcos integrados capaces de responder a exigencias de competitividad, legitimidad social y transición energética.

El valor académico de estos aportes radica en su riqueza metodológica. Se destacan aplicaciones innovadoras como minería de datos, aprendizaje automático, índices compuestos validados con simulaciones Monte Carlo o modelos de programación por metas. Estas herramientas no solo enriquecen la comprensión de procesos mineros, sino que también muestran la capacidad de adaptar marcos globales (GMG, Lean, Balanced Scorecard) a realidades locales en Chile, India, Burkina Faso, Corea del Sur y Australia. Tal diversidad revela la consolidación de la minería como un campo fértil para la experimentación interdisciplinaria con metodologías de vanguardia.

Las implicaciones prácticas y teóricas son notorias. Conceptualmente, los KPIs se posicionan como catalizadores de cambio organizacional, ampliando su función más allá del control hacia la

innovación cultural y la gobernanza sociotécnica. En lo aplicado, los hallazgos sugieren la necesidad de reforzar estándares comunes de medición, asegurar la calidad de datos y profesionalizar competencias técnicas en minería digital. Experiencias pioneras en Australia, con la automatización de flotas en Pilbara, y en Chile, con la incorporación de Lean y economía circular, evidencian la viabilidad de combinar eficiencia, seguridad y sostenibilidad en operaciones de gran escala.

A pesar de los avances, persisten vacíos relevantes. La integración consistente entre indicadores técnicos y sociales es aún incipiente, y la evidencia longitudinal sobre los efectos de estos instrumentos en sostenibilidad permanece limitada. Se proyecta la urgencia de explorar marcos híbridos que vinculen energía, seguridad y productividad, así como estudios transnacionales comparativos entre Chile y Australia para evaluar la transferencia de innovaciones. Futuras líneas de investigación deben enfocarse en la robustez de algoritmos de inteligencia artificial, la trazabilidad de indicadores en contextos de incertidumbre geológica y climática, y la aceptación social de sistemas de gestión basados en KPIs.

### **3. ¿En qué contexto, sector o región se desarrollan estas investigaciones?**

Los estudios revisados evidencian una fuerte convergencia en torno al uso de KPIs como herramientas centrales para la gestión de la minería, especialmente en contextos de creciente presión social, ambiental y económica. Mientras en países como Chile, Perú e India el énfasis recae en responder a desafíos de productividad y legitimidad social, en Australia y Corea del Sur las investigaciones se orientan hacia la automatización, la eficiencia en acarreo y la gestión energética. La divergencia principal se ubica en la amplitud de dimensiones abordadas: unos trabajos priorizan métricas técnicas y de productividad, mientras otros integran factores sociales, comunitarios y ambientales.

Desde la perspectiva académica, el valor de estos aportes radica en la diversidad y sofisticación de enfoques metodológicos. Destacan modelos analíticos como el AHP, la programación por metas y las simulaciones Monte Carlo, además de técnicas de minería de datos, aprendizaje automático y sistemas dinámicos. Estos métodos se aplican tanto a la predicción de inestabilidades en taludes como al análisis de eficiencia de flotas y procesos, confirmando la interdisciplinariedad de la investigación en KPIs mineros. Asimismo, la comparación internacional, especialmente entre Chile y Australia, enriquece el campo al ofrecer referentes contrastantes en productividad y digitalización.

Las implicancias teóricas y prácticas son significativas. Teóricamente, los KPIs emergen no solo como métricas de control, sino como instrumentos de innovación organizacional y de gobernanza sociotécnica. En la práctica, los hallazgos enfatizan la necesidad de estandarizar indicadores bajo marcos globales como GMG, fortalecer la trazabilidad de datos mediante IIoT y digitalización, y desarrollar capital humano capaz de operar en entornos de alta incertidumbre. La experiencia australiana en Pilbara, con avances en automatización e inteligencia artificial, ilustra la viabilidad de combinar seguridad, eficiencia y sostenibilidad en contextos de gran escala.

Persisten, no obstante, lagunas de conocimiento. La integración sistemática de indicadores técnicos con métricas sociales y ambientales es aún incipiente, y la evidencia longitudinal sobre sus efectos en sostenibilidad a largo plazo es limitada. Se proyecta como línea futura la evaluación comparativa transnacional particularmente entre Chile y Australia, así como el desarrollo de indicadores híbridos que articulen productividad, energía y legitimidad social. También se plantea avanzar en la aplicabilidad de inteligencia artificial y análisis multicriterio para crear sistemas predictivos robustos, capaces de anticipar contingencias y optimizar la resiliencia del sector minero frente a escenarios de cambio climático y volatilidad económica.

#### **4. ¿Cuál es la estrategia educativa recomendada en los trabajos?**

Los estudios revisados convergen en reconocer a los KPIs como instrumentos fundamentales para integrar productividad, sostenibilidad y seguridad en la minería contemporánea. Existe consenso en que la formación del capital humano es esencial para traducir los KPIs en mejoras tangibles, tanto en operaciones como en la relación con comunidades. Sin embargo, se observan divergencias en el énfasis otorgado: mientras unos trabajos privilegian la gestión técnica de procesos, otros destacan la importancia de indicadores sociales y ambientales, lo que pone de relieve la necesidad de marcos integradores que combinen eficiencia operativa, legitimidad social y resiliencia ambiental.

El valor académico de estos aportes reside en la diversidad de metodologías aplicadas. Desde enfoques multicriterio como AHP y programación por metas, hasta el uso de inteligencia artificial, aprendizaje por refuerzo y minería de datos, los estudios reflejan un campo interdisciplinario en expansión. Chile, Australia, India y Corea del Sur aparecen como escenarios clave donde la investigación se vincula directamente con desafíos estructurales de productividad, sostenibilidad y digitalización. Estas contribuciones no solo enriquecen la literatura en gestión minera, sino que también establecen bases comparativas para el desarrollo de indicadores universales adaptables a distintos contextos productivos.

Las implicancias teóricas y prácticas son notables. Teóricamente, los KPIs dejan de ser simples métricas para consolidarse como catalizadores de innovación organizacional y cultural. En lo aplicado, la evidencia muestra la necesidad de fortalecer competencias técnicas en mantenimiento predictivo, economía circular y gestión energética de flotas, así como habilidades blandas en liderazgo, relaciones comunitarias y gobernanza socioambiental. Las experiencias de Pilbara en automatización y las iniciativas chilenas en Lean y servicios intensivos en conocimiento ilustran la relevancia de integrar la formación técnica con la transformación cultural para sostener ventajas competitivas en un entorno global.

Persisten vacíos de conocimiento que exigen ser abordados. La falta de integración sistemática entre indicadores técnicos y sociales limita la comprensión holística del desempeño minero. Asimismo, se requiere ampliar la evidencia longitudinal que evalúe el impacto de los KPIs en la sostenibilidad a largo plazo y explorar cómo responden frente a escenarios de incertidumbre como crisis hídricas, variabilidad geológica o presiones regulatorias. Futuras líneas de investigación deben enfocarse en el desarrollo de indicadores híbridos energía-productividad-seguridad, en estudios comparativos entre Chile y Australia, y en la aplicabilidad de modelos predictivos basados en big data e inteligencia artificial para fortalecer la resiliencia del sector.

#### **5. ¿Cuáles son los principales resultados expresados por los artículos considerados en este estudio?**

Los estudios revisados coinciden en reconocer a los KPIs como herramientas centrales para diagnosticar y optimizar procesos en la minería, revelando convergencias en torno a la productividad, la sostenibilidad y la seguridad. Se observa consenso en la importancia de indicadores como disponibilidad de equipos, consumo energético y seguridad laboral, mientras que otros trabajos amplían su alcance hacia la aceptación social, la circularidad de recursos o la gobernanza ambiental. Las divergencias se concentran en el peso otorgado a las dimensiones técnicas frente a las

socioambientales, lo que pone en evidencia la necesidad de marcos integrados que permitan evaluar de manera equilibrada la competitividad y legitimidad del sector.

El aporte académico de estos trabajos se refleja en la riqueza metodológica empleada. Se destacan aplicaciones de modelos multicriterio, minería de datos, simulaciones probabilísticas y aprendizaje automático, así como enfoques de dinámica de sistemas que jerarquizan indicadores en niveles de proyecto y compañía. La adaptación de marcos globales como GMG, Lean y Balanced Scorecard a contextos locales en Chile, India, Corea del Sur o Australia revela un esfuerzo por combinar estándares universales con realidades productivas específicas. Esta pluralidad metodológica, además de enriquecer la disciplina, consolida el carácter interdisciplinario de los estudios de KPIs aplicados a la minería.

Las implicancias teóricas y prácticas son significativas. Desde el plano conceptual, los KPIs se consolidan como instrumentos de innovación organizacional y gobernanza sociotécnica, trascendiendo su rol de mera métrica operativa. En la práctica, los hallazgos evidencian que su adecuada implementación puede mejorar la eficiencia energética de flotas, reducir accidentes en hasta 90%, anticipar inestabilidades geotécnicas y fortalecer la relación con comunidades. Casos como la minería chilena, marcada por la caída de la productividad, y la experiencia australiana, pionera en automatización, muestran que los KPIs no solo miden, sino que también catalizan transformaciones estructurales en la gestión minera contemporánea.

Persisten, sin embargo, vacíos críticos que demandan atención. La integración sistemática de indicadores técnicos con métricas sociales y ambientales continúa siendo insuficiente, y son escasos los estudios longitudinales que evalúen impactos sostenidos en el tiempo. Asimismo, se requieren análisis comparativos transnacionales que permitan comprender la transferibilidad de innovaciones entre contextos como Chile y Australia. Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar indicadores híbridos que combinen productividad, energía y legitimidad social, así como en explorar la aplicabilidad de big data e inteligencia artificial para construir modelos predictivos robustos que fortalezcan la resiliencia y sostenibilidad de la industria minera.

## **6. ¿Cuáles son las restricciones o debilidades de las propuestas consideradas?**

Las investigaciones sobre KPIs en minería revelan convergencias en la identificación de brechas estructurales relacionadas con la calidad y estandarización de datos, la dependencia de factores exógenos como precios de minerales o leyes de mena, y la insuficiente integración de dimensiones sociales y ambientales. Si bien existe un consenso en torno al valor de los KPIs para mejorar productividad, sostenibilidad y seguridad, se observan divergencias en su alcance y aplicabilidad: algunos estudios se enfocan en procesos técnicos específicos como acarreo, mantenimiento o fragmentación, mientras otros destacan la necesidad de marcos holísticos que contemplen el ciclo completo de vida de la mina y la interacción con comunidades.

Desde una perspectiva académica, los trabajos aportan metodologías diversas que van desde revisiones sistemáticas hasta simulaciones probabilísticas, modelos de programación matemática y algoritmos de aprendizaje automático. Esta pluralidad metodológica refleja tanto la originalidad como la relevancia disciplinar del campo, pero también expone limitaciones recurrentes: muestras restringidas, dependencia de registros parciales y ausencia de validaciones longitudinales. La incorporación de enfoques multicriterio y de plataformas IIoT representa un avance significativo, aunque persiste la dificultad de trasladar resultados a contextos heterogéneos, especialmente en regiones con baja capacidad tecnológica o institucional.

Las implicancias prácticas son notorias. El uso de KPIs permite anticipar inestabilidades geotécnicas, reducir accidentes laborales, optimizar consumo energético y mejorar la aceptación social de proyectos extractivos. Sin embargo, la efectividad de estos indicadores se ve limitada por la resistencia organizacional a priorizar sostenibilidad sobre beneficios inmediatos, así como por los elevados costos de inversión en tecnologías digitales y automatización. Los resultados sugieren que una adopción fragmentada conduce a beneficios parciales, mientras que la integración sistemática de indicadores puede generar transformaciones estructurales en eficiencia, legitimidad social y resiliencia de las operaciones mineras.

Existen vacíos críticos que abren líneas futuras de investigación. La necesidad de construir indicadores híbridos que integren desempeño técnico, social y ambiental aparece como prioritaria, junto con el desarrollo de modelos comparativos que permitan evaluar la transferibilidad de innovaciones entre países como Chile, Australia, India o Perú. Asimismo, se requiere mayor énfasis en la creación de estándares internacionales que fortalezcan la comparabilidad y la trazabilidad de datos, así como en la evaluación longitudinal del impacto de los KPIs sobre la sostenibilidad sectorial. Finalmente, la exploración de inteligencia artificial y big data se perfila como un campo decisivo para superar limitaciones actuales y consolidar una minería más eficiente y socialmente responsable.

## **7. ¿Cuáles son las fortalezas de las propuestas consideradas?**

Los estudios revisados sobre KPIs en minería muestran una convergencia en reconocerlos como instrumentos esenciales para alinear eficiencia productiva, sostenibilidad y seguridad. La literatura revela afinidad en torno al uso de metodologías multicriterio, benchmarking y marcos como Balanced Scorecard, IIoT o Lean, que permiten estructurar indicadores técnicos, ambientales y sociales de manera integrada. Sin embargo, también emergen divergencias respecto de la aplicabilidad de estos marcos en contextos heterogéneos como Chile, India o Australia, donde las restricciones regulatorias, las capacidades tecnológicas y las dinámicas sociales condicionan su implementación. Persisten vacíos en la estandarización y en la integración de KPIs sociales con los técnicos.

Desde un punto de vista académico, las investigaciones aportan originalidad mediante la incorporación de metodologías avanzadas como simulaciones Monte Carlo, modelos de programación matemática, aprendizaje automático y minería de datos aplicada a geotecnia. Asimismo, la validación empírica en minas reales y la construcción de índices comparativos como MEPI o indicadores de circularidad otorgan rigor y transferibilidad. Estas contribuciones no solo consolidan el valor de los KPIs como herramientas de gestión, sino que amplían su relevancia disciplinar al situarlos en la intersección entre productividad, gobernanza corporativa y sostenibilidad, reforzando su pertinencia para debates teóricos y prácticos.

Las implicaciones prácticas de los hallazgos son significativas. Los KPIs permiten anticipar inestabilidades de taludes, mejorar la confiabilidad del mantenimiento, reducir emisiones y optimizar el consumo energético. En paralelo, facilitan la trazabilidad de interacciones comunitarias y fortalecen la responsabilidad social corporativa. No obstante, la eficacia de los indicadores se ve limitada por la fragmentación de datos, los altos costos de tecnologías avanzadas y la resistencia cultural frente a cambios organizacionales. Los estudios sugieren que la incorporación de KPIs de cierre y circularidad puede transformar el sector hacia modelos más resilientes y socialmente legitimados, alineados con estándares internacionales de sostenibilidad.

Las oportunidades de investigación futura se orientan a la creación de marcos híbridos que integren simultáneamente dimensiones técnicas, sociales y ambientales, junto con el desarrollo de estándares globales que fortalezcan la comparabilidad entre países productores. La aplicación de

inteligencia artificial, big data y análisis multicriterio aparece como una vía para superar las limitaciones actuales, permitiendo modelos predictivos de mayor precisión y adaptabilidad. Asimismo, resulta prioritario indagar cómo la adopción de KPIs incide en la legitimidad social de la minería, explorando su papel no solo como métricas de control, sino también como catalizadores de innovación cultural y organizacional en un sector históricamente tensionado por demandas de competitividad y sostenibilidad.

#### **8. ¿Cuáles son las principales conclusiones o recomendaciones que se presentan en la muestra?**

Los trabajos revisados convergen en reconocer a los KPIs como instrumentos indispensables para integrar productividad, sostenibilidad y gestión social en la minería. Las conclusiones muestran que, tanto en Chile como en India, Corea del Sur y Australia, los KPIs permiten diagnosticar brechas de eficiencia, anticipar riesgos geotécnicos y estructurar modelos de circularidad y cierre progresivo. Sin embargo, persisten divergencias en la aplicabilidad: mientras algunos estudios privilegian la eficiencia operativa y el control de costos, otros destacan la necesidad de incorporar dimensiones sociales y ambientales. La carencia de marcos unificados y la escasa estandarización internacional siguen siendo vacíos relevantes en la literatura.

En el plano académico, los estudios aportan un valor sustantivo mediante metodologías innovadoras que van desde el AHP y la programación por metas hasta el uso de IIoT, minería de datos, aprendizaje automático y modelos predictivos híbridos. La validación empírica en minas de Chile, Brasil y Burkina Faso, así como la creación de índices como el MEPI y los indicadores de circularidad, subraya la relevancia disciplinar de estas aproximaciones. La originalidad radica en trasladar enfoques de ingeniería y ciencias de datos a la gestión minera, consolidando un campo interdisciplinario donde la medición rigurosa se articula con la gobernanza y la sostenibilidad.

Las implicaciones prácticas son de amplio alcance. Se destaca que los KPIs no solo optimizan procesos de perforación, acarreo y mantenimiento, sino que también permiten gestionar relaciones comunitarias, monitorear impactos ambientales y proyectar escenarios de transición energética. Las recomendaciones recurrentes aluden a la necesidad de fortalecer políticas públicas, incrementar la cooperación universidad–empresa y garantizar la formación de capital humano especializado. No obstante, las limitaciones en infraestructura tecnológica, la resistencia cultural y la heterogeneidad geológica condicionan la efectividad de las propuestas, lo que exige adaptar los marcos globales a realidades locales.

Las proyecciones sugieren que la investigación futura debe orientarse hacia la integración de indicadores técnicos, sociales y ambientales en plataformas digitales unificadas, potenciando la interoperabilidad de datos y la trazabilidad en tiempo real. Asimismo, se plantea avanzar en el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial y minería de patrones aplicados a la predicción de riesgos y a la diferenciación de productos minerales en mercados globales. La consolidación de estándares internacionales y la inclusión de KPIs de legitimidad social y gobernanza se perfilan como líneas críticas para lograr una minería resiliente, competitiva y socialmente aceptada en el mediano y largo plazo.

## 9. ¿Cuáles son las oportunidades de mejora a evaluar en nuestro país que pueden inferirse desde los trabajos seleccionados?

Los hallazgos revisados muestran una clara convergencia en torno a la necesidad de integrar marcos de KPIs que incluyan dimensiones productivas, ambientales y sociales en la minería chilena. Desde la priorización multicriterio en contextos como Kerala hasta los modelos de circularidad y de cierre progresivo, se observa que la gestión estratégica de indicadores puede fortalecer la legitimidad social y la sostenibilidad ambiental, además de la eficiencia operativa. Sin embargo, persisten divergencias en la estandarización de métricas y en la capacidad de adaptarlas a contextos locales, lo que revela una brecha significativa en gobernanza y articulación interinstitucional.

En el plano académico, los estudios destacan por la originalidad metodológica al incorporar enfoques como AHP, programación por metas, minería de datos, IIoT y aprendizaje automático, aplicados a problemas específicos de productividad, mantenimiento y seguridad. La validación empírica en Chile, Brasil, India y Corea del Sur otorga solidez a los marcos propuestos, mientras que el desarrollo de índices como el MEPI y los indicadores de circularidad evidencia un aporte disciplinar significativo. Estas contribuciones reafirman el carácter interdisciplinario del campo, que articula ingeniería, ciencias sociales y economía.

Las implicaciones prácticas se proyectan en la necesidad de estandarizar indicadores a nivel nacional, capacitar capital humano en minería digital y establecer marcos regulatorios que integren sostenibilidad, productividad y gobernanza. Los trabajos sugieren además que la automatización, la inteligencia artificial y el monitoreo en tiempo real pueden reducir costos, anticipar riesgos y aumentar la resiliencia del sector frente a presiones externas como la caída en la ley del mineral o la escasez hídrica. La creación de KPIs sociales se perfila también como una vía clave para reducir conflictividad y mejorar la aceptación comunitaria.

Las líneas futuras de investigación deben orientarse hacia la integración de sistemas de indicadores técnicos, ambientales y sociales en plataformas digitales interoperables, fortaleciendo la trazabilidad y el análisis predictivo. La minería chilena tiene la oportunidad de avanzar hacia la internacionalización de servicios tecnológicos, emulando experiencias australianas en clústeres de innovación. Asimismo, resulta imprescindible explorar modelos híbridos de KPIs que combinen métricas rezagadas y predictivas, incorporando inteligencia artificial y minería de patrones para construir sistemas dinámicos de evaluación, capaces de sustentar una minería competitiva y socialmente legítima.

## 3.2 Discusión de resultados

### 1. ¿Cuáles son los principales hallazgos o resultados técnicos presentados por los artículos analizados?

Los cincuenta estudios analizados coinciden en que los KPIs son herramientas fundamentales para mejorar la eficiencia operativa y la gestión integral en minería, al permitir monitorear productividad, uso de energía, seguridad y desempeño ambiental. Su implementación ha generado mejoras concretas como reducción de costos, mayor disponibilidad de equipos y aumento de productividad, especialmente en faenas que aplican mantenimiento predictivo y control digital de procesos. Casos en Chile, Australia y Canadá evidencian incrementos operativos de hasta un 20%, impulsados por la integración de sistemas IIoT, Big Data e inteligencia artificial (Leung, 2023; Gackowiec, 2020).

De igual forma, los trabajos destacan beneficios en sostenibilidad ambiental y gobernanza social, donde la estandarización de KPIs bajo marcos como ISO 14001 o ICMM permitió fortalecer la transparencia, mejorar la eficiencia hídrica y energética y reducir la conflictividad comunitaria. En contextos como Collahuasi o Chuquicamata, la incorporación de indicadores sociales favoreció la legitimidad institucional y una mayor aceptación pública de las operaciones (Shaw, 2022; Recabarren, 2022). Estas experiencias demuestran que los KPIs trascienden la medición técnica, convirtiéndose en instrumentos que integran gestión ambiental, desempeño social y toma de decisiones estratégicas.

Finalmente, las investigaciones subrayan que la adopción de tecnologías de automatización y modelos predictivos potencia la resiliencia del sector, consolidando una minería más preventiva e inteligente. La integración de metodologías multicriterio y estándares internacionales, como los propuestos por el GMG, facilita la comparación entre faenas y países, impulsando la mejora continua. En Chile, los resultados evidencian la necesidad de consolidar un marco nacional de KPIs que articule innovación tecnológica, sostenibilidad y competitividad global, fortaleciendo la posición del país como referente minero responsable.

### 2. ¿Qué brechas metodológicas y de estandarización persisten en la aplicación de KPIs entre distintos países, y cómo podrían superarse para fortalecer la comparabilidad y la toma de decisiones en la minería chilena?

Las investigaciones muestran que una de las principales brechas metodológicas en el uso de KPIs en minería está en la falta de estandarización entre países y empresas. Mientras países como Australia o Canadá usan marcos bien definidos y alineados con normas internacionales como ISO o GMG, en lugares como Chile o Perú los sistemas suelen ser distintos entre compañías y dependen mucho de su nivel tecnológico o de gestión. Esto hace difícil comparar resultados y compartir buenas prácticas entre operaciones mineras de distintos contextos (Gackowiec, 2020; Leung, 2023).

También hay una gran diferencia en el uso de tecnologías digitales. En algunos países ya se aplican herramientas de Big Data, sensores IIoT y análisis predictivo, lo que permite un monitoreo más preciso y en tiempo real. En cambio, en Chile todavía hay operaciones que dependen de registros manuales o plataformas no integradas, lo que complica el seguimiento y la trazabilidad de los KPIs. Además, los indicadores técnicos, ambientales y sociales muchas veces se analizan por separado, perdiendo una visión completa del desempeño (Weber, 2020; Recabarren, 2022).

Para cerrar estas brechas, Chile debería crear un marco común de indicadores que combine productividad, sostenibilidad y gestión social. Esto podría incluir la adopción de estándares internacionales adaptados al país, plataformas digitales compartidas entre empresas y universidades, y programas de formación en análisis de datos. Así se fortalecería la toma de decisiones basadas en evidencia y se impulsaría una minería más competitiva y sostenible.

### **3. ¿De qué manera la implementación de KPIs puede fortalecer la competitividad internacional de la minería chilena frente a otros países líderes del sector, considerando los avances tecnológicos y las nuevas exigencias de sostenibilidad?**

La implementación de KPIs puede ser una herramienta decisiva para que la minería chilena mantenga y refuerce su competitividad internacional. En países como Australia, Canadá o Finlandia, los KPIs se utilizan de forma integrada para medir no solo productividad, sino también impacto ambiental, innovación tecnológica y desempeño social. En cambio, en Chile, aunque existen avances importantes, aún falta consolidar un sistema nacional de indicadores estandarizados que permita comparar resultados y orientar políticas públicas más efectivas (Leung, 2023; Shaw, 2022).

Adoptar KPIs modernos basados en datos en tiempo real, inteligencia artificial y análisis predictivo permitiría optimizar procesos operativos, reducir costos y anticipar fallas, lo que impacta directamente en la eficiencia y sostenibilidad del sector. Además, incluir variables como emisiones, uso de agua, energía y relaciones comunitarias fortalecería la reputación internacional de la minería chilena, alineándola con los criterios ESG que hoy exigen inversionistas y mercados globales (Recabarren, 2022; Gackowiec, 2020).

En este sentido, el desafío es avanzar hacia un modelo de minería inteligente y responsable, donde los KPIs no sean solo métricas internas, sino herramientas de gestión estratégica que impulsen innovación, transparencia y confianza. Si Chile logra integrar estos indicadores con una visión de largo plazo, podrá posicionarse como referente mundial en productividad sostenible y gobernanza minera.

## **4 Conclusiones**

Este estudio establece que la aplicación de KPIs contribuye de manera decisiva a mejorar la productividad, la sostenibilidad y la legitimidad social de la industria minera, tanto en Chile como en escenarios internacionales. Los hallazgos indican que el objetivo general de analizar su impacto en distintos contextos se cumplió, al identificar convergencias en torno a la utilidad de los KPIs y divergencias respecto a su estandarización e integración de dimensiones técnicas, sociales y ambientales.

Los resultados evidencian que metodologías como minería de datos, inteligencia artificial, análisis multicriterio y benchmarking permiten enriquecer la gestión minera, consolidando un campo interdisciplinario en expansión. Asimismo, la adaptación de marcos globales a realidades locales confirma que los KPIs no solo funcionan como métricas de control, sino como catalizadores de innovación organizacional y cultural.

La principal contribución de este trabajo radica en ofrecer un marco comparativo amplio que articula experiencias de 50 investigaciones en cuatro continentes, visibilizando tanto vacíos como oportunidades de estandarización y trazabilidad de datos. Dicho aporte refuerza la pertinencia de los KPIs como herramienta estratégica para enfrentar la caída de leyes minerales, el alza de costos energéticos y las exigencias socioambientales crecientes.

Para abordar las brechas detectadas se recomienda avanzar en la creación de indicadores híbridos técnico-sociales, fomentar la capacitación en minería digital, impulsar marcos regulatorios que integren sostenibilidad y productividad, y promover la cooperación universidad–empresa–comunidad. Futuras investigaciones deben enfocarse en la construcción de plataformas digitales interoperables basadas en big data e inteligencia artificial, capaces de generar modelos predictivos que fortalezcan la resiliencia y la legitimidad del sector minero.

## 5 Referencias

Ahmed, A. K. (2022). Using data mining techniques to improving key performance indicators. *Future Computing and Informatics Journal*, 7(1), Article 4. <https://doi.org/10.54623/fue.fcij.7.1.4>

Alarcón, L. F., Baladrón, C., Gahona, P., & Long, D. (2023). Lean methodologies and productivity in mining development: A case in a public company. *Revista Ingeniería de Construcción*, 38(Especial), 66–82. <https://doi.org/10.7764/RIC.00085.21>

Ayswer, A. S., Ramasamy, N., Dev Anand, M., & Santhi, N. (2024). Prioritizing key performance indicators for the mining industry in Kerala: An AHP approach. *Management and Production Engineering Review*, 15(3), 1–14. <https://doi.org/10.24425/mper.2024.151490>

Bravo-Ortega, C., & Muñoz, L. (2015). *Knowledge intensive mining services in Chile: Challenges and opportunities for future development* (IDB Discussion Paper No. 418). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0000187>

Comisión Nacional de Productividad. (2017). *Productividad en la gran minería del cobre*. CNP. [https://cnep.cl/wp-content/uploads/2017/09/Productividad-cobre\\_14\\_09\\_2017.pdf](https://cnep.cl/wp-content/uploads/2017/09/Productividad-cobre_14_09_2017.pdf)

Cruz Villazón, C., Sastoque Pinilla, L., Otegi Olaso, J. R., Toledo Gandarias, N., & López de Lacalle, N. (2020). Identification of key performance indicators in project-based organisations through the lean approach. *Sustainability*, 12(15), 5977. <https://doi.org/10.3390/su12155977>

De Solminihac, H., Cerda, R., & Gonzales, L. E. (2014). *Desarrollo y análisis de indicadores para el mejoramiento de la productividad en la minería en Chile* (Documento de Trabajo N° 11). CLAPES UC. <https://clapesuc.cl/investigacion/doc-trabajo-no11-desarrollo-y-analisis-indicadores-para-el-mejoramiento-de-la-productividad-minera-en-chile>

Đurić, Ž., Maksimović, R., & Adamović, Ž. (2010). Key performance indicators in a joint-stock company. *African Journal of Business Management*, 4(6), 890–902. <https://doi.org/10.5897/AJBM.9000379>

Figueiredo, J., Torres, V., Cruz, R., & Moreira, D. (2024). Analysis of the key performance indicators between lithologies on mine to crusher. *Journal of Sustainable Mining*, 23(3), Article 1. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.14177>

Franks, D. M., Malhue, L., Acuña, M., Canelo, K., & Freiburghaus, C. (2011). Social performance indicators at the Collahuasi copper mine, Northern Chile. In *SR Mining 2011* (pp. 66–72). Centre for Social Responsibility in Mining (UQ) / SR Mining.

Gackowicz, P., Podobińska-Staniec, M., Brzychczy, E., Kühnbach, C., & Özver, T. (2020). Review of key performance indicators for process monitoring in the mining industry. *Energies*, *13*(19), 5169. <https://doi.org/10.3390/en13195169>

Gaete Vielma, C. A. (2019). *Interfaz computacional para gestión de KPI de operadores de carguío y transporte de Minera Centinela* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174418>

Gan, W., Lin, J. C.-W., Fournier-Viger, P., Chao, H.-C., Tseng, V. S., & Yu, P. S. (2018). A survey of utility-oriented pattern mining. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.10511>

Huerta Ibañez, J., País Cerna, G., Olea Gonzalez, D., Parra-Negrete, K., & Romero-Conrado, A. R. (2023). Simplified circular economy indicator for mining operations: A case in the Chilean mining industry. *Procedia Computer Science*, *224*, 474–478. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.067>

Hurtado-Martell, J. L. (2025). Improving performance in mining and construction projects: An integrated method based on the triple constraint, change and risk management with normalized databases. *Revista Ingeniería de Construcción*, *40*(1), 1–14. <https://doi.org/10.7764/RIC.00136.21>

Ito, H., Hanaoka, S., & Sugishita, K. (2023). Seasonality of the global cruise industry. *Maritime Transport Research*, *5*, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100094>

Khorasgani, H., Wang, H., & Gupta, C. (2020). Challenges of applying deep reinforcement learning in dynamic dispatching. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05570>

Knights, P., & Oyanader, P. (2005). Best-in-class maintenance benchmarks in Chilean open pit mines.

Latorre, V., Roberts, M., & Riley, M. J. (2010). Development of a systems dynamics framework for KPIs to assist project managers' decision-making processes. *Revista de la Construcción*, *9*(1), 39–49. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2010000100005>

Leiva González, J., & Onederra, I. (2022). Environmental management strategies in the copper mining industry in Chile to address water and energy challenges—Review. *Mining*, *2*, 197–232. <https://doi.org/10.3390/mining2020012>

Leung, R., Hill, A. J., & Melkumyan, A. (2023). Automation and artificial intelligence technology in surface mining: A brief introduction to open-pit operations in the Pilbara. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MRA.2023.3328457>

Malo, D. M., Kpoda, A., Kabre, H., & Ouermi, G. (2019). Mining machinery maintenance key performance indicators improvement at the Nordgold Taparko Mine. *European Business & Management*, 5(6), 84–92. <https://doi.org/10.11648/j.ebm.20190506.13>

Mesa, J. A., Hincapie-Florez, D., Bobadilla-Vasquez, M., Corredor, L., Pupo-Roncallo, O., & Gonzalez-Quiroga, A. (2025). Assessing technological trends in mining fleet energy management toward sustainable mineral extraction. *Resources Policy*, 109, 105714. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105714>

Milani, F., & Maggi, F. M. (2018). A comparative evaluation of log-based process performance analysis techniques. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.03965>

Nguyen, H., Dumas, M., La Rosa, M., Maggi, F. M., & Suriadi, S. (2016). Business process deviance mining: Review and evaluation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1608.08252>

OECD. (2023). *Mining regions and cities in the region of Antofagasta, Chile: Towards a regional mining strategy*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/336e2d2f-en>

Olsson, T., & Franke, U. (2019). Risks and assets: A qualitative study of a software ecosystem in the mining industry. In *Proceedings of the 2019 27th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE '19)* (pp. 895–904). ACM. <https://doi.org/10.1145/3338906.3340443>

Ormevik, A. B., Fagerholt, K., Meisel, F., & Sandvik, E. (2023). A high-fidelity approach to modeling weather-dependent fuel consumption on ship routes with speed optimization. *Maritime Transport Research*, 5, 100096. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100096>

Ortega, J. H., Rapiman, M., Lecaros, R., Medel, F., Padilla, F., & García, A. (2016). Predictive index for slope instabilities in open pit mining. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.05085>

Ortega, J. H., Rapiman, M., Rojo, L., & Rivacoba, J. P. (2018). A validation of the use of data sciences for the study of slope stability in open pit mines. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.08426>

Parreira, J., Mullard, Z., Meech, J., & García Vásquez, M. (2009). How automation and key performance indicators (KPIs) contribute to sustainable development in the mining industry. In *Second International Conference on Multinational Enterprises and Sustainable Development*, Nancy–Metz, France.

Park, S., Jung, D., & Choi, Y. (2025). A novel integrated key performance indicator for evaluating open-pit mine haulage systems: Application of GMG standards. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(10), 103589. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103589>

PricewaterhouseCoopers Australia. (2014, agosto). *Mining for efficiency: How a focus on equipment performance promises to unlock billions of dollars in productivity returns for miners*. PwC Australia. <https://www.pwc.com.au/industry/energy-utilities-mining/assets/mining-efficiency-aug14.pdf>

Recabarren, J. I., Castillo, E., Cantallopts, J., & García, A. (2022). Product differentiation in mineral commodities based on sustainability indicators: The case of copper mining. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35356.09609>

Roa, C., & Sánchez, F. (2022, November 16). Different approaches towards copper mining productivity in Chile (pp. 61–72). *Copper Conference*, Santiago, Chile.

Rødseth, K. L., Fagerholt, K., & Proost, S. (2023). Optimal planning of an urban ferry service operated with zero emission technology. *Maritime Transport Research*, 5, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100100>

Rodríguez-Luna, D., Encina-Montoya, F., Alcalá, F. J., & Vela, N. (2022). An overview of the environmental impact assessment of mining projects in Chile. *Land*, 11(12), 2278. <https://doi.org/10.3390/land11122278>

Ruiz del Solar, J. (Ed.). (2020). *Big data en minería* (Serie de estudios sobre minería, tecnología y sociedad). Beauchef Minería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. [https://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2020/09/Estudio\\_BIGDATA.pdf](https://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2020/09/Estudio_BIGDATA.pdf)

Shaabani, H., Hvattum, L. M., Laporte, G., & Hoff, A. (2023). A goal programming model for the stability analysis of a maritime inventory routing replanning problem. *Maritime Transport Research*, 5, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100101>

Shackman, J., & Ward, M. (2023). The interrelationship between coastal, Great Lakes, inland, and deep-sea freight rates: A longitudinal approach. *Maritime Transport Research*, 5, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100097>

Shaw, J., Pedlar-Hobbs, R., & Chubb, D. (2022). The role of key performance indicators throughout the mine life in achieving closure objectives. In A. B. Fourie, M. Tibbett, & G. Boggs (Eds.), *Mine*

*Closure 2022: Proceedings of the 15th International Conference on Mine Closure* (pp. 803–812). Australian Centre for Geomechanics. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2215\\_58](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_58)

Smith, J. R., & Mastorakos, E. (2023). A systems-level study of ammonia and hydrogen for maritime transport. *Maritime Transport Research*, 5, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100099>

Yorio, P. L., Haas, E. J., Bell, J. L., Moore, S. M., & Greenawald, L. A. (2020). Lagging or leading? Exploring the temporal relationship among lagging indicators in mining establishments 2006–2017. *Journal of Safety Research*, 74, 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.06.018>

Zis, T. P. V., Psaraftis, H. N., & Reche-Vilanova, M. (2023). Design and application of a key performance indicator (KPI) framework for autonomous shipping in Europe. *Maritime Transport Research*, 5, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100095>

Silva, R. d. C., & Ayres da Silva, A. L. M. (2024). Assessing mining performance indicators in relation to the SDGs: Development of a guided methodology and its application in an iron ore mine. *Minerals*, 14(9), 887. <https://doi.org/10.3390/min14090887>

Lourenço, A. C., & Pereira, L. F. (2023). Overall mining equipment effectiveness (OMEE): A comprehensive indicator for evaluating mining equipment performance. *Applied Sciences*, 13(5), 2185. <https://doi.org/10.3390/app13052185>

Zhang, Y., Li, S., & Wang, H. (2023). The construction of mine water recycling performance evaluation index system under the Internet of Things environment. *Scientific Reports*, 13, 10302. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37224-8>

Fernandes, P., & Alves, M. (2023). Evaluation of the performance of mining processes after the implementation of strategic innovation. *Processes*, 9(8), 1374. <https://doi.org/10.3390/pr9081374>

Pereira, R. M., Costa, J. A., & Lima, T. F. (2023). Overall drilling effectiveness: Key performance indicator adapted for rock drilling. *Research, Society and Development*, 12(3), e12512340462. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.40462>

Johansson, M., & Pettersson, L. (2019). Development and implementation of key performance indicators for an aggregates production plant using dynamic simulations. *Engineering Journal*, 23(4), 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.engj.2019.04.012>

## 6 Anexo: Revisión de plagio

### PG2 Vicente Joaquin Perez Molina MIIS SCL 2025.docx

 Universidad del Desarrollo

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:541728315

Fecha de entrega

17 dic 2025, 9:09 p.m. GMT-3

Fecha de descarga

18 dic 2025, 9:21 a.m. GMT-3

Nombre del archivo

PG2+Vicente+Joaquin+Perez+Molina+MIIS+SCL+2025.docx

Tamaño del archivo

306.6 KB

32 páginas

10.338 palabras

64.280 caracteres



Página 2 de 39 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:541728315




## 11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

#### Filtrado desde el informe

- Bibliografía

#### Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

#### Marcas de integridad

##### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

