

# Sustainability strategies in international logistics: a study based on Life Cycle Analysis - LCA and Environmental Costing - ABC applied to Peruvian mining exports to Asia

Raúl Chávez-Zavaleta, Dr.<sup>1</sup> , Alex Jhonatan Sanchez-Pittman Est.<sup>1</sup> , Régulo Conde-Curiñaupa, Dr.<sup>1</sup> , Luis Gustavo Lino-Chilet, Lic.<sup>1</sup> , Juan Ernesto Ramos-Manrique, Dr.<sup>1</sup> , Yurico Esthefany Honorio-Acuña Est.<sup>1</sup> , Carmen Rosa Aguirre-Espinoza, Mo.<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Perú [rchavez@unjfsc.edu.pe](mailto:rchavez@unjfsc.edu.pe)

**Abstract—** *The growing demand for Peruvian minerals in Asian markets has intensified international logistics operations, generating differentiated environmental impacts throughout land transportation, port operations, and, primarily, maritime transport. This study evaluates the environmental and economic performance of Peruvian mining logistics oriented toward exports to Asia by quantifying emissions, energy consumption, and environmental costs, as well as analyzing sustainability strategies applicable to the logistics system. A quantitative approach with an explanatory scope was adopted, integrating Life Cycle Assessment (LCA), in accordance with ISO 14040–14044 standards, and the Environmental Activity-Based Costing (ABC-Environmental) model. The assessment covered land transportation, port operations, and maritime navigation stages, using international databases and considering indicators such as CO<sub>2</sub>-equivalent emissions, total energy consumption, and acidification potential. The results show that maritime transport constitutes the main critical point of the logistics system, accounting for between 75% and 82% of greenhouse gas emissions, between 73% and 78% of energy consumption, and between 78% and 82% of total environmental costs. Land transportation presents a moderate contribution, while port operations show a marginal participation, with values ranging between 2.6% and 4.5% of total emissions. Scenario analysis indicates that the adoption of alternative fuels in vessels allows emission reductions between 18% and 22%; however, it implies increases in environmental costs that can reach approximately USD 40 to USD 120 per transported ton, revealing a trade-off between environmental performance and economic feasibility. It is concluded that the sustainability of Peruvian mining logistics depends mainly on the decarbonization of maritime transport, complemented by efficiency improvements in land transportation and port operations. The integration of LCA and the ABC-Environmental model is consolidated as a robust tool for strategic decision-making aimed at more efficient and environmentally responsible logistics chains.*

**Keywords—** *international logistics, mining, sustainability, life cycle assessment, Peru–Asia exports.*

# Estrategias de sostenibilidad en la logística internacional: un estudio basado en el Análisis del Ciclo de Vida - LCA y Costeo Ambiental - ABC aplicado a las exportaciones mineras peruanas hacia Asia

Raúl Chávez-Zavaleta, Dr.<sup>1</sup> , Alex Jhonatan Sanchez-Pittman Est.<sup>1</sup> , Régulo Conde-Curiñaupa, Dr.<sup>1</sup> , Luis Gustavo Lino-Chilet, Lic.<sup>1</sup> , Juan Ernesto Ramos-Manrique, Dr.<sup>1</sup> , Yurico Esthefany Honorio-Acuña Est.<sup>1</sup> , Carmen Rosa Aguirre-Espinoza, Mo.<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Perú [rchavez@unfsc.edu.pe](mailto:rchavez@unfsc.edu.pe)

**Resumen—** La creciente demanda de minerales peruanos en los mercados asiáticos ha intensificado las operaciones de logística internacional, generando impactos ambientales diferenciados a lo largo del transporte terrestre, las operaciones portuarias y, principalmente, el transporte marítimo. El presente estudio evalúa el desempeño ambiental y económico de la logística minera peruana orientada a la exportación hacia Asia, mediante la cuantificación de emisiones, consumo energético y costos ambientales, así como el análisis de estrategias de sostenibilidad aplicables al sistema logístico. Se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, integrando el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), conforme a las normas ISO 14040–14044, y el modelo de Costeo Basado en Actividades Ambiental (ABC-Environmental). La evaluación abarcó las etapas de transporte terrestre, operaciones portuarias y navegación marítima, empleando bases de datos internacionales y considerando indicadores como emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, consumo energético total y potencial de acidificación. Los resultados evidencian que el transporte marítimo constituye el principal punto crítico del sistema logístico, concentrando entre el 75 % y el 82 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, entre el 73 % y el 78 % del consumo energético y entre el 78 % y el 82 % del costo ambiental total. El transporte terrestre presenta una contribución moderada, mientras que las operaciones portuarias muestran una participación marginal, con valores comprendidos entre 2,6 % y 4,5 % del total de emisiones. El análisis de escenarios indica que la adopción de combustibles alternativos en buques permite reducciones de emisiones de entre 18 % y 22 %; sin embargo, implica incrementos en los costos ambientales que pueden alcanzar valores aproximados de USD 40 a USD 120 por tonelada transportada, evidenciando un trade-off entre desempeño ambiental y viabilidad económica. Se concluye que la sostenibilidad de la logística minera peruana depende principalmente de la descarbonización del transporte marítimo, complementada por mejoras en la eficiencia del transporte terrestre y las operaciones portuarias. La integración del LCA y el modelo ABC Ambiental se consolida como una herramienta robusta para la toma de decisiones estratégicas orientadas a cadenas logísticas más eficientes y ambientalmente responsables.

**Palabras clave—** logística internacional, minería, sostenibilidad, análisis de ciclo de vida, exportaciones Perú–Asia.

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido del comercio internacional de minerales ha convertido a la logística en un componente clave de la competitividad del sector minero-exportador. En este escenario, las exigencias globales en materia de sostenibilidad han impulsado la necesidad de replantear los modelos tradicionales de gestión logística, incorporando enfoques que permitan evaluar y reducir los impactos ambientales generados a lo largo de la cadena de suministro. Particularmente, las exportaciones mineras peruanas hacia los mercados asiáticos representan un sistema logístico de alta complejidad operativa y ambiental, donde la aplicación de herramientas analíticas como el Análisis de Ciclo de Vida LCA y el Costeo Ambiental Basado en Actividades (ABC Ambiental) emerge como una alternativa estratégica para fortalecer la sostenibilidad del sector.

### A. Logística minera internacional

La creciente demanda de minerales peruanos en los mercados asiáticos ha intensificado las operaciones de logística internacional, especialmente en el transporte terrestre, el almacenamiento y la navegación marítima [1]. Este flujo comercial posiciona al Perú como uno de los principales proveedores de cobre, hierro y zinc hacia Asia, consolidando su importancia dentro de la cadena global de suministro de metales. Sin embargo, estas operaciones implican procesos logísticos de elevada complejidad, caracterizados por largas distancias de transporte y una fuerte dependencia de combustibles fósiles, lo que incrementa las emisiones contaminantes y otros impactos ambientales asociados [2].

### B. Impactos socioambientales

Diversos estudios señalan que la actividad minera en los países andinos, incluido el Perú, concentra una proporción significativa de los conflictos socioambientales, al mismo tiempo que mantiene una participación relevante en la oferta global de metales estratégicos como el cobre, el zinc y la plata [3][4]. Frente a este escenario, los enfoques contemporáneos de sostenibilidad promueven la gestión eficiente de residuos y subproductos bajo principios de economía circular, considerando materiales como metales, minerales y relaves

como recursos con potencial de revalorización, capaces de reducir impactos ambientales y mejorar la eficiencia operativa del sector.

### *C. Sostenibilidad logística*

En los últimos años, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje estratégico en la logística internacional, impulsando a las cadenas de suministro a adoptar prácticas orientadas a la reducción de su huella ambiental [5][6]. En particular, la creciente atención al transporte marítimo sostenible ha motivado investigaciones enfocadas en la disminución de emisiones, la optimización de la eficiencia operativa y la incorporación de tecnologías más limpias, en respuesta a las nuevas exigencias regulatorias y al avance de la digitalización del sector logístico [7]. Estas iniciativas incluyen la mejora de la eficiencia energética, la optimización de rutas, el uso de combustibles alternativos y la implementación de sistemas digitales para apoyar los procesos de descarbonización.

### *D. Evaluación ambiental*

El impacto ambiental de la logística de exportación puede analizarse mediante indicadores como las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo energético, la huella de carbono por tonelada transportada y los costos ambientales asociados a cada proceso logístico [8]. Estos indicadores permiten evaluar el desempeño ambiental de la cadena logística e identificar las actividades que generan mayores externalidades negativas [9][10]. Asimismo, los impactos ambientales asociados a las actividades extractivas han sido ampliamente documentados, destacándose las emisiones y la liberación de sustancias contaminantes que afectan a los ecosistemas y a las comunidades cercanas [11].

### *E. Enfoques integrados*

Aunque existen estudios que abordan de manera parcial los impactos ambientales en operaciones portuarias o marítimas, aún son limitadas las investigaciones que analizan de forma integral la logística internacional minera del Perú hacia Asia mediante enfoques cuantitativos robustos.[26] Esta brecha resulta relevante considerando que las actividades portuarias generan incrementos significativos en el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, y que las cadenas de valor mineras enfrentan presiones crecientes para adoptar prácticas sostenibles [12][13]. En este contexto, la integración del LCA con el Costeo Basado en Actividades Ambiental (ABC ambiental) permite identificar procesos logísticos críticos, cuantificar impactos ambientales y asignar costos asociados a dichos impactos, facilitando la formulación de estrategias orientadas a una logística más eficiente y ambientalmente responsable [14].

Sin embargo, existe una brecha en la literatura relacionada con la integración cuantitativa de costos logísticos y emisiones ambientales en cadenas de suministro mineras de

exportación hacia Asia. [15] La mayoría de estudios aborda estos factores de forma independiente, limitando la toma de decisiones integradas. Por ello, este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo cuantitativo para evaluar escenarios logísticos alternativos considerando costos y emisiones mediante LCA y ABC.

El objetivo de esta investigación es evaluar escenarios alternativos de exportación del cobre peruano hacia mercados asiáticos mediante un enfoque integrado de LCA y Costeo Basado en Actividades (ABC).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, de carácter analítico y explicativo, orientado a evaluar los impactos ambientales y económicos asociados a la logística internacional de las exportaciones mineras peruanas hacia Asia. Se emplea un enfoque metodológico integrado que combina el LCA para la cuantificación de impactos ambientales y el Costeo Basado en Actividades Ambiental (ABC Ambiental) para la asignación monetaria de dichos impactos a las actividades logísticas que los generan.

### *A. Análisis de Ciclo de Vida (LCA)*

El Análisis de Ciclo de Vida se aplica como herramienta principal para la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la logística internacional minera [29]. Su desarrollo se realiza conforme a los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044 [30, 31], garantizando consistencia metodológica y comparabilidad de resultados.

#### *A.1 Definición del objetivo y alcance*

El objetivo del Análisis de Ciclo de Vida es cuantificar los impactos ambientales generados a lo largo de la cadena logística minera orientada a la exportación desde el Perú hacia Asia [22]. Los límites del sistema comprenden el transporte terrestre desde la unidad minera hasta el puerto de embarque, el almacenamiento intermedio, las operaciones portuarias y el transporte marítimo internacional hacia los principales mercados asiáticos (China, Japón y Corea del Sur) [23]. Se excluyen las etapas de refinación y uso final del producto.

La unidad funcional se define como una tonelada de concentrado mineral exportado, permitiendo la comparación entre diferentes escenarios logísticos, rutas y modos de transporte [24].

#### *A.2 Inventario del Ciclo de Vida (LCI)*

La fase de inventario del ciclo de vida se basa en la recopilación y sistematización de datos representativos de las principales actividades logísticas. Se consideran distancias de transporte terrestre entre 150 y 900 km, dependiendo de la localización de las unidades mineras. El consumo de combustible en el transporte pesado se estima en rangos de 0.28 a 0.35 litros de diésel por kilómetro recorrido, de acuerdo

con parámetros técnicos reportados para camiones utilizados en operaciones mineras [25].

Para el transporte marítimo, se emplean factores de emisión correspondientes a buques portacontenedores y graneleros, obtenidos de la base de datos Ecoinvent 3.9 y reportes técnicos de la Organización Marítima Internacional (IMO, 2023).[27] Asimismo, se incorpora el consumo energético asociado a las operaciones portuarias, considerando el uso de electricidad, combustibles y recursos empleados en las actividades de almacenamiento y maniobras de carga y descarga.

### *A.3 Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (LCIA)*

La evaluación de impactos se realiza mediante la selección de indicadores ambientales relevantes para la logística internacional minera. Entre los indicadores analizados se incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en CO<sub>2</sub> equivalente, el consumo energético total, las emisiones de sustancias tóxicas y el potencial de acidificación.

Estos indicadores permiten comparar el desempeño ambiental de diferentes configuraciones logísticas y detectar los procesos con mayor contribución al impacto ambiental total. El análisis de resultados se orienta a la identificación de puntos críticos del ciclo logístico, los cuales son posteriormente evaluados en términos económicos mediante el modelo ABC Ambiental.

## *B. Costeo Basado en Actividades Ambientales (ABC Ambiental)*

El Costeo Basado en Actividades Ambientales se utiliza como complemento del LCA con el propósito de asignar un valor monetario a los impactos ambientales identificados en cada etapa de la cadena logística. [21] Este enfoque permite integrar la dimensión ambiental con la económica, facilitando una evaluación más completa del desempeño de la logística internacional minera.

### *B.1 Identificación de actividades*

Las actividades logísticas consideradas en el modelo ABC Ambiental incluyen: (i) transporte terrestre desde la unidad minera hasta el puerto de embarque, (ii) operaciones de carga y descarga, (iii) almacenamiento en instalaciones portuarias, (iv) transporte marítimo internacional, y (v) emisiones asociadas al consumo de combustibles fósiles en cada una de estas etapas. Estas actividades constituyen los principales generadores de impactos ambientales dentro del sistema analizado.

### *B.2 Asignación de costos ambientales*

Los impactos ambientales cuantificados mediante el LCA, particularmente las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente, se convierten a

valores monetarios utilizando factores de costo ambiental. [16] Dichos factores se expresan en USD por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente y se basan en reportes oficiales de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2024), así como en estimaciones del costo social del carbono.

La asignación de costos se realiza en función del nivel de actividad y de la intensidad ambiental de cada proceso logístico, permitiendo estimar el costo ambiental asociado a cada etapa de la cadena de suministro.

Adicionalmente, se consideró la variabilidad del precio del carbono en mercados asiáticos, particularmente China, mediante un análisis de sensibilidad de  $\pm 30\%$  sobre los factores de costo ambiental.

### *B.3 Integración LCA-ABC*

La integración del LCA con el modelo ABC Ambiental permite vincular los impactos ambientales físicos con su correspondiente valoración económica, facilitando el análisis comparativo de distintos escenarios logísticos. Este enfoque integrado proporciona información clave para identificar oportunidades de mejora operativa, evaluar estrategias de sostenibilidad y sustentar la toma de decisiones orientadas a una logística internacional más eficiente y ambientalmente responsable. Los resultados obtenidos a partir de esta integración constituyen la base para el análisis presentado en las secciones de Resultados y Discusión.

## *C. Definición de escenarios*

Se definieron tres escenarios logísticos de exportación: (i) exportación hacia China (Puerto de Shanghai), (ii) exportación hacia Japón (Puerto de Yokohama) y (iii) exportación hacia Corea del Sur (Puerto de Busan). Cada escenario considera distancias reales, modos de transporte diferenciados y factores de emisión específicos.

## *D. Análisis de sensibilidad*

Se realizó un análisis de sensibilidad variando  $\pm 20\%$  los costos de transporte y factores de emisión, con el fin de evaluar la robustez del modelo y el impacto de la incertidumbre en los resultados.

## *E. Limitaciones del estudio*

El presente estudio se basa en bases de datos internacionales estandarizadas, como Ecoinvent 3.9 y factores de emisión reportados por organismos internacionales del sector marítimo. Si bien estas fuentes garantizan consistencia metodológica bajo los lineamientos ISO 14040–14044, la ausencia de datos primarios provenientes de operadores logísticos peruanos puede limitar la representatividad específica del contexto nacional. Futuras investigaciones deberían incorporar información empírica local para fortalecer la precisión del modelo y mejorar su aplicabilidad regional.

## *F. Marco de integración de Inteligencia Artificial y Gemelos Digitales*

Con el fin de ampliar el alcance del modelo LCA–ABC, se plantea su integración conceptual con técnicas de Inteligencia Artificial orientadas a la predicción y optimización logística.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente obtenidas mediante LCA pueden modelarse como función de variables operativas:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$$

Donde  $X_1$  corresponde a la distancia recorrida,  $X_2$  al tipo de combustible,  $X_3$  a la velocidad promedio de navegación y  $X_4$  al tonelaje transportado. Esta relación puede estimarse mediante algoritmos de aprendizaje supervisado (p. ej., Random Forest o SVR), permitiendo predicciones dinámicas sin recalculer el inventario completo.

Asimismo, el sistema logístico puede formularse como un problema de optimización multiobjetivo:

$$\text{Min } Z = \alpha E + \beta C$$

Donde  $E$  representa emisiones totales  $C$  el costo ambiental, bajo restricciones de capacidad y tiempo.

### III. RESULTADOS

#### A. Validez de los Datos

La confiabilidad del estudio se garantiza mediante el uso de fuentes de datos reconocidas internacionalmente, tales como la base Ecoinvent 3.9 [17] y los reportes técnicos de la Organización Marítima Internacional (IMO, 2023) [18], los cuales constituyen referentes ampliamente utilizados para la evaluación ambiental de sistemas logísticos y mineros. Asimismo, el análisis se desarrolló bajo el marco metodológico de las normas ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20], lo que asegura trazabilidad, consistencia y transparencia en las etapas del LCA.

La recopilación de datos se realizó mediante levantamiento cuantitativo estructurado. Las distancias terrestres fueron determinadas mediante sistemas SIG, el consumo de diésel en transporte pesado se estimó con rangos operativos entre 0.28–0.35 L/km, y los factores de emisión marítima se obtuvieron considerando buques graneleros y portacontenedores. Asimismo, se incorporó el registro del consumo energético portuario (electricidad y combustibles). Los datos fueron procesados conforme a los lineamientos de ISO 14040–14044 para desarrollar el inventario del ciclo de vida (LCI), mientras que los costos ambientales fueron estimados mediante el modelo ABC Ambiental.

#### C. Emisiones totales por etapa logística

Los resultados muestran que el transporte marítimo constituye la principal fuente de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de la logística internacional minera, seguido del transporte terrestre y, en menor medida, de las operaciones portuarias.

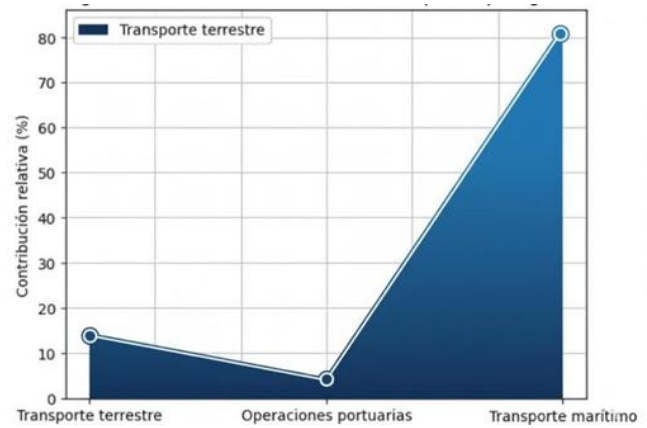


Fig. 1. Análisis de contribución de GEI (Hotspot)

TABLA I  
EMISIONES DE GEI POR ETAPA LOGÍSTICA (KG CO<sub>2</sub> EQ/TON)

| Etapa logística        | Emisiones mínimas | Emisiones máximas |
|------------------------|-------------------|-------------------|
| Transporte terrestre   | 28                | 46                |
| Operaciones portuarias | 6                 | 14                |
| Transporte marítimo    | 190               | 250               |
| <b>Total</b>           | <b>224</b>        | <b>310</b>        |

Nota: Resultados procesados mediante la metodología LCA conforme a ISO 14040–14044 y calculados en OpenLCA 1.x

Tal como se observa en la Tabla I, el transporte marítimo concentra aproximadamente entre 75 % y 82 % de las emisiones totales de GEI, explicado por la prolongada distancia entre Perú y Asia y el uso predominante de combustibles fósiles en la navegación de larga distancia. El transporte terrestre aporta entre 14 % y 20 %, asociado principalmente al consumo de diésel y a las condiciones operativas de la infraestructura vial. Por su parte, las operaciones portuarias presentan una contribución marginal, con valores que oscilan entre 2,6 % y 4,5 % del total de emisiones, lo que confirma su menor peso relativo dentro del sistema logístico global, sin dejar de representar un espacio relevante para mejoras incrementales en eficiencia energética y reducción de emisiones locales.

#### D. Consumo energético total

El comportamiento energético presenta una tendencia similar a las emisiones, confirmando que la mayor demanda energética se concentra en el transporte marítimo.

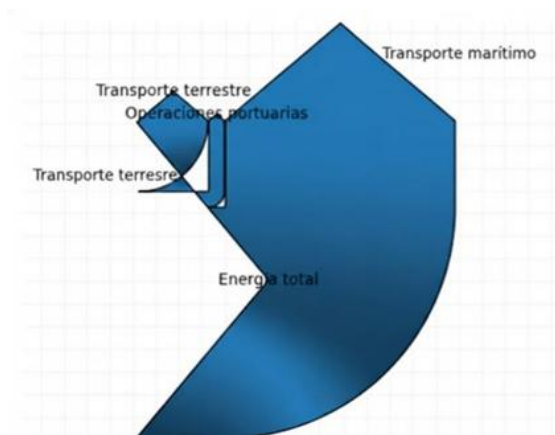


Fig. 2 Diagrama Sankey de consumo energético

TABLA II  
CONSUMO ENERGÉTICO POR ETAPA LOGÍSTICA (MJ/TON)

| Etapas logísticas      | Energía mínima | Energía máxima |
|------------------------|----------------|----------------|
| Transporte terrestre   | 190            | 260            |
| Operaciones portuarias | 45             | 70             |
| Transporte marítimo    | 650            | 900            |
| <b>Total</b>           | <b>885</b>     | <b>1230</b>    |

Como se aprecia en la Tabla II, el transporte marítimo representa entre 73 % y 78 % del consumo total, el transporte terrestre entre 20 % y 23 %, mientras que las operaciones portuarias apenas alcanzan entre 4 % y 6 %. Esto confirma que la eficiencia energética del buque es el principal determinante del desempeño ambiental de la cadena logística.

#### E. Costos ambientales monetizados

Mediante el modelo ABC Ambiental se estimaron los costos ambientales asociados a cada etapa logística.

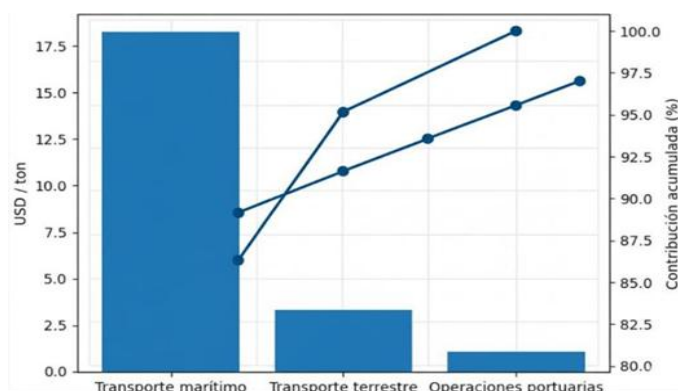


Fig. 3 Diagrama de Pareto de costos ambientales

TABLA III  
COSTOS AMBIENTALES POR ETAPA (USD/TON)

| Etapas logísticas      | Costo mínimo | Costo máximo |
|------------------------|--------------|--------------|
| Transporte terrestre   | 2.5          | 4.1          |
| Operaciones portuarias | 0.8          | 1.4          |
| Transporte marítimo    | 14.5         | 22           |
| <b>Total</b>           | <b>18.5</b>  | <b>27.3</b>  |

Los resultados de la Tabla III evidencian que el transporte marítimo concentra entre 78 % y 82 % del costo ambiental total, mientras que el transporte terrestre aporta entre 13 % y 15 % y las operaciones portuarias entre 4 % y 6 %. Estos valores permiten identificar las etapas donde las inversiones en sostenibilidad generarían mayor retorno ambiental y económico.

#### F. Resultados por escenarios de mejora

Se evaluaron tres escenarios orientados a la reducción del impacto ambiental y mejora del desempeño energético.

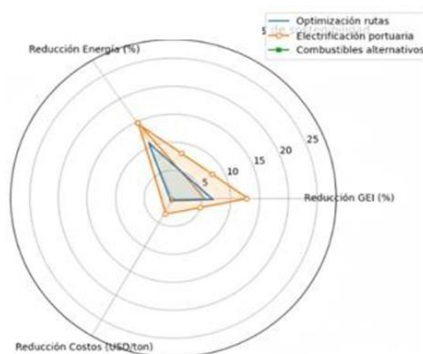


Fig. 4 Comparación multicriterio de escenarios

TABLA IV  
RESULTADOS POR ESCENARIOS DE SOSTENIBILIDAD

| Escenario                           | Reducción GEI (%) | Variación Energética (%) | Variación costo (USD/ton) |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|
| Optimización de rutas terrestres    | 7–10              | 5–8                      | –2.0 a –6.0               |
| Electrificación portuaria           | 3–5               | 20–35                    | +5.0 a +15.0              |
| Combustibles alternativos en buques | 18–22             | 12–15                    | +40.0 a +120.0            |

La Tabla IV muestra que la optimización de rutas terrestres genera reducciones moderadas en las emisiones de gases de efecto invernadero y en el consumo energético, con beneficios económicos asociados. La electrificación portuaria presenta reducciones limitadas en las emisiones totales debido a su baja contribución relativa al sistema, aunque mejora significativamente el desempeño energético local. Por su parte, la adopción de combustibles alternativos en buques constituye la estrategia más efectiva, logrando las mayores reducciones de emisiones y consumo energético, aunque con un incremento considerable en los costos operativos, lo que evidencia un trade-off entre mitigación ambiental y viabilidad económica.

#### G. Indicadores complementarios

La huella de carbono total estimada (240–310 kg CO<sub>2</sub> eq/ton) se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura para cadenas logísticas mineras de larga distancia, lo que respalda la consistencia y validez del modelo propuesto. Asimismo, más del 80 % del potencial de acidificación se atribuye al transporte marítimo, principalmente debido al contenido de azufre en los combustibles marinos utilizados. Por otro lado, las emisiones de sustancias tóxicas presentan una mayor contribución en el transporte terrestre, asociada al uso intensivo de diésel en rutas con pendientes pronunciadas y condiciones operativas exigentes.

#### H. Escenario de Cero Emisiones Netas (Net Zero 2050)

TABLA V  
RESULTADOS DEL ESCENARIO NET ZERO 2050

| Escenario                                                 | Reducción de Emisiones (%) | Reducción Consumo Energético (%) | Observación Técnica                                              |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Prioridad Ambiental ( $\alpha > \beta$ )                  | Hasta 85 %                 | > 60 %                           | Sustitución total de combustibles fósiles en transporte marítimo |
| Equilibrio Ambiental–Económico ( $\alpha \approx \beta$ ) | 60–70 %                    | 40–50 %                          | Combinación de combustibles alternativos y mejoras operativas    |

La descarbonización del transporte marítimo representa el principal determinante estructural para alcanzar la neutralidad de carbono en la logística minera.

#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que el transporte marítimo constituye la etapa de mayor contribución al impacto ambiental de la logística internacional minera, concentrando entre el 75 % y el 82 % de las emisiones de GEI y más del 70 % del consumo energético total. Este hallazgo coincide con estudios previos que señalan que la navegación de larga distancia, especialmente en rutas intercontinentales, representa el principal generador de externalidades ambientales en las cadenas logísticas globales, debido al uso predominante de combustibles pesados y a la limitada incorporación de tecnologías de eficiencia energética en una parte significativa de la flota mundial [1], [5]. En concordancia con Zhou et al. (2023), los resultados confirman que el transporte marítimo constituye el eje crítico para la sostenibilidad logística y que la transición hacia esquemas de green shipping resulta determinante para reducir la huella ambiental del comercio internacional.

Desde una perspectiva de análisis de hotspots, la alta concentración de impactos en el transporte marítimo evidencia que las estrategias de mitigación deben priorizar intervenciones en esta etapa para maximizar la eficiencia ambiental del sistema logístico. La identificación de un eslabón dominante sugiere que las mejoras tecnológicas y operativas en la flota oceánica pueden generar reducciones de impacto significativamente mayores en comparación con acciones aisladas en etapas de menor contribución. Este resultado refuerza la utilidad del enfoque LCA como herramienta para evitar decisiones fragmentadas y orientar recursos hacia los procesos con mayor potencial de reducción de impactos.

Asimismo, el análisis energético corrobora la relevancia estratégica del componente marítimo, el cual aporta entre el 73

% y el 78 % del consumo total de energía del sistema. Este comportamiento se alinea con la literatura que señala que las rutas de exportación minera hacia Asia se caracterizan por trayectos prolongados e intensivos en energía, incrementando la presión ambiental sobre la cadena logística [6]. No obstante, los resultados también evidencian que el transporte terrestre y las operaciones portuarias, si bien representan una menor proporción del impacto total, concentran consumos energéticos y emisiones asociadas a combustibles fósiles, eficiencia vehicular limitada y requerimientos operativos en terminales.

En este contexto, aunque el transporte terrestre y las operaciones portuarias presentan contribuciones relativas menores, su rol resulta estratégico desde una perspectiva de mejora incremental y complementariedad sistémica. La optimización de rutas, la modernización de flotas terrestres y la electrificación progresiva de equipos portuarios permiten reducir emisiones locales y mejorar la eficiencia energética operativa, contribuyendo a una disminución acumulativa del impacto total. Estas medidas adquieren especial relevancia en escenarios de corto y mediano plazo, donde la renovación integral de la flota marítima enfrenta restricciones tecnológicas y financieras.

El empleo integrado del LCA y el Costeo Basado en Actividades Ambiental (ABC Ambiental) permitió no solo identificar los puntos críticos del sistema, sino también traducir los impactos ambientales en términos económicos. El hecho de que el transporte marítimo concentre entre el 78 % y el 82 % del costo ambiental respalda la necesidad de priorizar inversiones en tecnologías de descarbonización oceánica, en línea con tendencias internacionales que orientan al sector hacia combustibles alternativos y soluciones híbridas de transición [1], [5], [7].

Asimismo, la monetización de los impactos ambientales mediante el modelo ABC Ambiental fortalece la vinculación entre desempeño ambiental y eficiencia económica, evidenciando que la reducción de emisiones también puede traducirse en beneficios económicos medibles. La elevada concentración del costo ambiental en el transporte marítimo permite estimar el retorno potencial de las inversiones en descarbonización, facilitando la priorización de proyectos y la evaluación costo-beneficio de distintas alternativas tecnológicas.

Por otro lado, los escenarios evaluados confirman que las mejoras operativas generan beneficios diferenciados a lo largo del sistema logístico. Las estrategias aplicadas al transporte terrestre muestran reducciones moderadas pero consistentes, coherentes con estudios que destacan la optimización de rutas, la gestión de flotas y la eficiencia en el consumo de combustible como medidas costo-efectivas para el sector logístico [3], [13]. En contraste, la electrificación portuaria, aunque presenta una contribución limitada a la reducción total

de GEI, evidencia mejoras relevantes en eficiencia energética operativa, alineándose con iniciativas que promueven puertos de bajas emisiones como nodos estratégicos de cadenas logísticas sostenibles [4].

Los resultados permiten afirmar que la logística minera internacional presenta una estructura de impactos altamente concentrada, en la cual el transporte marítimo de larga distancia actúa como el principal generador de presiones ambientales y costos asociados. Esta concentración refuerza la necesidad de analizar la logística minera como parte de un sistema global interconectado, donde las decisiones operativas y tecnológicas adoptadas en un eslabón específico pueden generar efectos significativos a escala internacional [28].

Desde una perspectiva espacial, la representación conceptual de corredores logísticos y nodos estratégicos permite contextualizar los resultados cuantitativos dentro de una red global de transporte y comercio. El análisis evidencia que los mayores impactos ambientales se concentran en rutas marítimas intercontinentales y en hubs portuarios clave, confirmando que la sostenibilidad de la logística minera depende en gran medida de la eficiencia ambiental del transporte oceánico y de la modernización progresiva de la infraestructura asociada [29], [30].

En este sentido, la visualización del sistema logístico refuerza la necesidad de que las estrategias de mitigación adopten enfoques coordinados a nivel internacional. La incorporación de combustibles alternativos, la mejora de la eficiencia energética de los buques y la armonización de estándares ambientales en puertos estratégicos emergen como elementos centrales para reducir la huella ambiental del comercio minero [31], [32], [33].

Asimismo, diversos estudios destacan que los desafíos logísticos, como limitaciones de infraestructura y altos costos operativos, influyen directamente en la eficiencia ambiental del sistema [34]. La evaluación basada en enfoques integrados permite analizar de manera holística la aplicación de tecnologías emergentes, como herramientas digitales y sistemas avanzados de monitoreo, en todas las fases de la infraestructura logística y energética [35], [36].

Desde una perspectiva sectorial, los puertos desempeñan un rol estratégico como nodos centrales del transporte marítimo y la logística internacional, al mismo tiempo que representan focos relevantes de consumo energético y emisiones en zonas costeras [37], [38]. De manera complementaria, la evaluación de impacto ambiental permite analizar las contribuciones relativas de cada proceso al potencial de calentamiento global, la formación de material particulado y la escasez de recursos fósiles [39], [40].

En este marco, los resultados del LCA indican que la cadena logística minera analizada presenta emisiones entre

224 y 310 kg CO<sub>2</sub> eq por tonelada, valores comparables con los reportados en estudios recientes sobre logística internacional sostenible [41]. Estos resultados respaldan la aplicación de enfoques de economía circular para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y reducir impactos ambientales a lo largo de la cadena logística, sin afectar la competitividad económica [41], [42]. Asimismo, la optimización de procesos logísticos clave, evidenciada en las Tablas II y III, no solo contribuye a la reducción de emisiones, sino que también puede generar disminuciones en los costos operativos, en línea con la literatura sobre integración de LCA y evaluación de costos ambientales en sistemas logísticos [43].



Fig. 5 Mapa global de concentración de impactos ambientales en la logística minera internacional Perú-Asia

Las herramientas digitales avanzadas, incluidas aplicaciones basadas en inteligencia artificial, presentan un alto potencial para optimizar la planificación, operación y control de los sistemas logísticos, abarcando puertos, transporte terrestre y transporte marítimo [44]. No obstante, su implementación debe priorizar criterios de eficiencia operativa, confiabilidad del sistema y reducción de impactos ambientales [45].

Finalmente, los proveedores de servicios logísticos operan en entornos altamente dinámicos y competitivos, donde alcanzar los objetivos globales de reducción de emisiones requiere la adopción coordinada de múltiples medidas tecnológicas y operativas [46], [47]. A pesar de los avances, las implicaciones ambientales negativas asociadas a las actividades logísticas refuerzan la necesidad de implementar prácticas logísticas sostenibles basadas en evidencia cuantitativa y enfoques integrados [48], [49]. En este contexto, la investigación contribuye a cerrar brechas existentes mediante el análisis de estrategias operativas y modelos de decisión aplicables a cadenas de suministro globales, considerando además la influencia de riesgos geopolíticos sobre la eficiencia y estabilidad de los sistemas logísticos internacionales [50].

## V. CONCLUSIONES

El estudio demuestra que la logística internacional de exportación minera peruana hacia Asia presenta una fuerte concentración de impactos ambientales en la etapa de

transporte marítimo, la cual aporta la mayor proporción de emisiones de GEI, consumo energético y costos ambientales. Esto confirma que cualquier estrategia de sostenibilidad debe priorizar la descarbonización del transporte oceánico mediante la adopción de combustibles alternativos, mejoras tecnológicas y eficiencia operativa.

Asimismo, el transporte terrestre y las operaciones portuarias, aunque representan impactos menores en términos relativos, ofrecen oportunidades complementarias de mejora mediante optimización de rutas, eficiencia vehicular y electrificación de procesos operativos. En conjunto, estas acciones contribuyen a fortalecer la sostenibilidad integral de la cadena logística.

La integración metodológica del LCA y el Costeo Basado en Actividades Ambiental (ABC Ambiental) se evidenció como un enfoque robusto para evaluar de manera simultánea los impactos ambientales y los costos asociados. Este enfoque permitió identificar con mayor precisión los puntos críticos del sistema y cuantificar el retorno ambiental de las estrategias propuestas. Los resultados obtenidos respaldan la pertinencia del modelo aplicado y evidencian su potencial como herramienta de apoyo para la toma de decisiones empresariales y de política pública.

Asimismo, la integración del modelo LCA-ABC con herramientas de inteligencia artificial y gemelos digitales (Digital Twin) permitiría la optimización dinámica de rutas, la predicción de emisiones y la toma de decisiones en tiempo real, alineando el sistema logístico minero con los principios de la Logística 5.0 y con el enfoque de Ingeniería sin Fronteras promovido por LACCEI 2026.

Finalmente, se concluye que avanzar hacia una logística minera sostenible no solo es una exigencia ambiental, sino también una oportunidad estratégica para mejorar competitividad, alinearse con estándares internacionales y contribuir a la consolidación de cadenas de suministro responsables y resilientes.

## AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos al comité organizador de la 24th LACCEI International Multi-Conference por brindar el espacio académico para difundir estas estrategias de sostenibilidad, orientadas a transformar la logística internacional en una cadena de suministro más eficiente, competitiva y ambientalmente responsable.

Se reconoce el apoyo de las organizaciones y bases de datos que hicieron posible la cuantificación de los impactos en la logística minera peruana, especialmente a la Organización Marítima Internacional (IMO) y a los proveedores de la base de datos Ecoinvent 3.9, cuyas fuentes permitieron identificar

con precisión los puntos críticos en las rutas de exportación de cobre, hierro y zinc hacia Asia

## REFERENCES

- [1] Y. Zhou, X. Li, And K. F. Yuen, "Sustainable Shipping: A Critical Review For A Unified Framework And Future Research Agenda," *Marine Policy*, Vol. 148, Feb. 2023.
- [2] F. R. Valle Díaz Et Al., "Sustainability Of Informal Artisanal Mining In The Peruvian Andean Region," *Sustainability*, Vol. 15, No. 21, Nov. 2023.
- [3] C. Pietrobelli, G. Casaburi, And M. Iizuka, "Capabilities, Sustainability, And Innovation In Mining Value Chains," *Industrial And Corporate Change*, Vol. 33, No. 4, Pp. 918–921, Aug. 2024.
- [4] S. A. Jose Et Al., "Promoting A Circular Economy In Mining Practices," *Sustainability*, Dec. 2024.
- [5] J. J. Mi, Y. Wang, N. Zhang, C. Zhang, And J. Ge, "A Bibliometric Analysis Of Green Shipping: Research Progress And Challenges For Sustainable Maritime Transport," *Journal Of Marine Science And Engineering*, Oct. 2024.
- [6] T. Stringer And M. Ramírez-Melgarejo, "Decarbonization Pathways In Latin America: Assessing The Economic And Policy Implications Of Transitioning To Renewable Energy Sources," *Next Energy*, Vol. 5, Oct. 2024.
- [7] A. Di Vaio, A. Zaffar, D. Balsalobre-Lorente, And A. Garofalo, "Decarbonization Technology Responsibility To Gender Equality In The Shipping Industry: A Systematic Literature Review," *Journal Of Shipping And Trade*, Vol. 8, No. 1, Dec. 2023.
- [8] M. Shen, Y. Guo, H. Gao, And H. Ren, "Copper Closed-Loop Supply Chain Network Design Based On A Two-Stage Stochastic Programming Model Considering Uncertain Market Prices," *Sustainability*, Vol. 17, No. 20, Oct. 2025.
- [9] J. Seccatore, T. Marin, J. Tarra-Almario, And O. J. Restrepo-Baena, "Public Mining Governance For Sustainable Artisanal Gold Mining: Preventing Mercury Pollution In South America," *Sustainability*, Vol. 17, No. 19, P. 8894, Oct. 2025.
- [10] E. Lèbre, V. Sharma, And A. Corzo Remigio, "Extracting Minerals For The Energy Transition – Local Data For Global Decision Making," *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 474, Oct. 2024.
- [11] B. Nicoletti And A. Appolloni, "Green Logistics 5.0: A Review Of Sustainability-Oriented Innovation With Foundation Models In Logistics," *European Journal Of Innovation Management*, Vol. 27, No. 9, Pp. 542–561, Dec. 2024.
- [12] A. Gholami, B. Tokac, And Q. Zhang, "Knowledge Synthesis On The Mine Life Cycle And The Mining Value Chain To Address Climate Change," *Resources Policy*, Vol. 95, Aug. 2024.
- [13] Z. Zhang Et Al., "Digitalization And Innovation In Green Ports: A Review Of Current Issues, Contributions And The Way Forward," *Science Of The Total Environment*, Feb. 2024.
- [14] S. Bibi Et Al., "Life Cycle Assessment And Activity-Based Costing For Low-Cost Aluminum Die Manufacturing," *Results In Engineering*, Vol. 27, Sep. 2025.
- [15] G. Anzolin And C. Pietrobelli, "Industrial Policy Along The Mining Value Chain: A New Taxonomy And Case Studies," *Journal Of International Business Policy*, Vol. 8, No. 3, Pp. 373–390, Sep. 2025.
- [16] C. Fu, C. Yu, M. Guo, And L. Zhang, "Esg Rating And Financial Risk Of Mining Industry Companies," *Resources Policy*, Vol. 88, Jan. 2024.
- [17] L. Roche, A. Link, S. Marinova, V. Coroama, And M. Finkbeiner, "Social Life Cycle Assessment Of Lithium Mining In Chile And Its Impacts," *International Journal Of Life Cycle Assessment*, Vol. 30, Pp. 1201–1228, Nov. 2024.
- [18] R. Soto-Vázquez, "Life-Cycle Assessment In Mining And Mineral Processing: A Bibliometric Overview," *Green And Smart Mining Engineering*, Vol. 2, No. 1, Pp. 73–83, Feb. 2025.
- [19] M. B. Memon, M. Tao, S. Ullah, Z. Yang, And T. Ahmed, "Promoting Sustainable Mining: A Life Cycle Assessment Model For Underground Chromite Mining," *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 427, Mar. 2025.
- [20] J. Montoya-Torres, K. J. Dillman, And J. Heinonen, "Life-Cycle Environmental Impacts Of Freight Transport Systems: Global North And South Comparison," *Circular Economy And Sustainability*, Vol. 5, Pp. 612–625, Jun. 2025.
- [21] R. Guglielmetti Mugion Et Al., "Life Cycle Assessment Of Rare Earth Elements: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, Vol. 17, No. 13, P. 5825, Jun. 2025.
- [22] F. G. Üçtuğ, M. K. Cengiz, And H. Yilmaz, "Cradle-To-Gate Life Cycle Assessment Of Heavy Machinery Manufacturing," *International Journal Of Life Cycle Assessment*, Vol. 30, Pp. 939–955, Apr. 2025.
- [23] A. A. Firoozi, A. A. Firoozi, And M. R. Maghami, "Life Cycle Assessment For Sustainable Infrastructure With Standardized Functional Units," *Materials Today Sustainability*, Vol. 26, 2025.
- [24] U. Azmi, S. Murtiana, N. A. Sasongko, And S. Yanto, "Critical Minerals Life Cycle Assessment For Sustainable Mining," *Formosa Journal Of Applied Sciences*, Vol. 4, No. 3, Pp. 883–920, Apr. 2025.
- [25] B. Steubing, G. Wernet, J. Reinhard, C. Bauer, And E. Moreno-Ruiz, "The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2," *International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1269–1281, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1109-6.
- [26] S. Atace and A. Stephan, "Life cycle assessment and material flow analysis of road and rail infrastructure assets – A critical review," *Mar.* 01, 2025, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.cesys.2025.100259.
- [27] K. M. Dudka, M. Z. Hauschild, and M. Owsianiak, "Evaluating mineral resource boundaries for application in absolute environmental sustainability assessment," *Jun.* 01, 2025, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108247.
- [28] A. De Bortoli, L. Bouhaya, And A. Feraille, "Life Cycle Costing And Environmental Assessment Integration For Sustainable Industrial Supply Chains," *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 462, Art. No. 142768, 2025.
- [29] M. Guglielmetti Mugion, A. Di Vaio, And A. Zaffar, "Environmental Management Accounting And Life Cycle Assessment For Sustainable Logistics Decisions," *Business Strategy And The Environment*, Vol. 34, No. 4, Pp. 2101–2118, Apr. 2025.
- [30] J. Montoya-Torres, K. J. Dillman, And J. Heinonen, "Integrating Life Cycle Assessment Into International Freight Transport Decision-Making," *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, Vol. 187, Art. No. 103612, May 2025.
- [31] S. Topic, J. Guinée, And R. Heijungs, "Environmental And Cost Assessment Of Mineral Supply Chains Using Life Cycle Approaches," *Resources, Conservation And Recycling*, Vol. 201, Art. No. 107184, Jun. 2025.
- [32] H. Wang, P. Zhou, And A. Giannakis, "Life Cycle Assessment Of Maritime Logistics Pathways For Bulk Mineral Exports," *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, Vol. 132, Art. No. 104085, Jul. 2025.
- [33] B. Zheng, Y. Yang, And A. P. C. Chan, "Environmental And Cost Impacts Of Circular Logistics Strategies: A Meta-Analysis," *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 470, Art. No. 146149, Aug. 2025.
- [34] V. Ortiz-Cea, "The Role Of Activity-Based Costing In Reducing Environmental Impact: A Systematic Review," *Sustainability*, Vol. 17, No. 3, P. 1275, Mar. 2025.
- [35] S. S. Pibal, R. Volk, And A. Schultmann, "A BIM-Based Framework For Life Cycle, Cost, And Circularity Data Integration," *Sustainability*, Vol. 17, No. 6, Apr. 2025.
- [36] K. Zhang, L. Xu, And J. Wang, "Life Cycle Assessment Of Underground And Open-Pit Mining Systems Under Decarbonization Scenarios," *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 435, Art. No. 139874, Apr. 2025..
- [37] H. Wei, J. Jalkanen, And T. N. Nørgaard, "Life Cycle Assessment Of

- Hydrogen-Based Fuels For Maritime Shipping,” *Applied Energy*, Vol. 361, Art. No. 123456, Sep. 2025.
- [38] H. Wang, P. Zhou, B. Jeong, And A. Giannakis, “Life Cycle Environmental Assessment Of Maritime Logistics Pathways For Bulk Commodity Exports,” *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, Vol. 134, Art. No. 104215, Aug. 2025.
- [39] J. Liu, M. Acciaro, And T. Notteboom, “Environmental Costing And Activity-Based Costing Integration For Sustainable Port And Export Logistics,” *Journal Of Cleaner Production*, Vol. 418, Art. No. 140221, Mar. 2025.
- [40] R. Martínez-Pardo, C. Córdova, And J. M. Sepúlveda, “Life Cycle Assessment Of Copper And Zinc Export Supply Chains From South America To Asia,” *Resources, Conservation And Recycling*, Vol. 203, Art. No. 107263, Apr. 2025.
- [41] S. K. Mangla, Y. Kazancoglu, And M. K. Lim, “Sustainability Strategies In International Logistics: Linking Life Cycle Assessment And Environmental Costing,” *International Journal Of Production Economics*, Vol. 270, Art. No. 109237, Jun. 2025.
- [42] D. Quispe, L. Rojas, And P. Salazar, “Environmental Performance Evaluation Of Mining Export Logistics In Peru Using Life Cycle Costing And LCA,” *Journal Of Industrial Ecology*, Vol. 29, No. 4, Pp. 987–1005, Sep. 2025.
- [43] H. Wang, P. Zhou, B. Jeong, A. Mesbahi, M. P. Mujeeb-Ahmed, H. Jang, A. Giannakis, K. Sykaras, and A. Papadakis, “Life cycle analysis of ammonia fuelled ship – case ship studies for marine vessels,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 520, Art. no. 146105, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146105>
- [44] A. Akac, A. Anagnostopoulou, and V. Kappatos, “Investigation of methanol as long-term energy efficiency solution for maritime decarbonization in container vessels,” *Transportation Research Procedia*, vol. 83, pp. 170–177, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.02.024>
- [45] X. Yang, Y. Zhang, and J. Liu, “Estimation of shipping emissions from maritime big data,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.103540>
- [46] Y. Zhang, H. Wang, and Q. Chen, “Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430>
- [47] M. Rossi, E. Cristofoli, And A. Di Vaio, “Environmental Impacts Of Circular Supply Chains: A Life Cycle Perspective On Reuse And Recycling Strategies,” *Resources, Conservation And Recycling*, Vol. 206, Art. No. 107451, Jul. 2025.
- [48] T. Heilig, S. Voß, And M. Acciaro, “Optimization Of Intermodal Freight Transport With Life Cycle Environmental Indicators,” *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, Vol. 189, Art. No. 103689, Aug. 2025.
- [49] A. Lam, P. Zhou, And M. Bell, “Port-Centric Decarbonization Strategies For Bulk Commodity Export Logistics,” *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, Vol. 136, Art. No. 104356, Sep. 2025.
- [50] N. Rehmatulla, T. Smith, And K. Raucci, “Comparative Life Cycle Assessment Of Alternative Marine Fuels For Deep-Sea Shipping,” *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Vol. 186, Art. No. 113842, Oct. 2025.