

Optimización del Retorno de Contenedores Vacíos mediante Inteligencia Artificial en el Nodo Portuario de Guayaquil

Optimization of Empty Container Returns through Artificial Intelligence at the Guayaquil Port Hub

Lourdes Vanessa Romero Vásquez, Marlon Patricio Romero Vásquez, Gabriel Germán Usiña Bascónes & Mayra Alexandra Samaniego Arias

DIMENSIÓN CIENTÍFICA

Enero - junio, V°7 - N°1; 2026

Recibido: 16-04-2026

Aceptado: 18-04-2026

Publicado: 25-04-2026

PAIS

- Ecuador, Milagro
- Ecuador, Milagro
- Ecuador, Milagro
- Ecuador, Milagro


INSTITUCION

- Universidad Estatal de Milagro
- Universidad Estatal de Milagro
- Universidad Estatal de Milagro
- Universidad Estatal de Milagro

CORREO:

- ✉ lromerov10@unemi.edu.ec
- ✉ romerov@unemi.edu.ec
- ✉ gusinab@unemi.edu.ec
- ✉ msamaniegoa@unemi.edu.ec

ORCID:

-  <https://orcid.org/0009-0000-3833-7969>
-  <https://orcid.org/0009-0003-0867-2389>
-  <https://orcid.org/0009-0003-7695-0790>
-  <https://orcid.org/0000-0002-5672-8741>

FORMATO DE CITA APA.

Romero, L., Romero, M., Usiña, G. & Samaniego, M. (2026). Optimización del Retorno de Contenedores Vacíos mediante Inteligencia Artificial en el Nodo Portuario de Guayaquil. *Revista G-ner@ndo*, V°7 (N°1). Pág. 4172 – 4189.

Resumen

La gestión del retorno de contenedores vacíos constituye uno de los principales desafíos logísticos del comercio marítimo internacional debido a su incidencia directa en los costos operativos, la eficiencia portuaria y la competitividad de las cadenas de suministro. En el contexto del Nodo Portuario de Guayaquil, esta problemática se intensifica por la fragmentación de la información entre los actores logísticos, la estacionalidad exportadora y la ausencia de modelos predictivos para la asignación eficiente de equipos. El objetivo de este estudio fue diseñar una estrategia basada en inteligencia artificial para reducir los costos operativos y optimizar los tiempos de ciclo en la gestión del retorno de contenedores vacíos. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance explicativo-correlacional y diseño no experimental longitudinal, utilizando series de tiempo correspondientes al período 2021-2024, procesadas a partir de fuentes oficiales del sistema portuario ecuatoriano. Se aplicaron técnicas de estadística descriptiva, análisis evolutivo, correlación de Pearson y simulación prospectiva mediante un modelo Dueling Double Deep Q-Network (D3QN). Los resultados evidenciaron una asimetría estructural entre los flujos de importación y exportación de contenedores vacíos, así como una interdependencia funcional entre las terminales del nodo portuario. La simulación permitió proyectar una reducción del 15% en los movimientos improductivos, con ahorros estimados superiores a los 260 millones de dólares y una mitigación de 1.605,57 toneladas de CO₂. Se concluye que la inteligencia artificial representa una herramienta estratégica para transformar la gestión portuaria ecuatoriana hacia un modelo predictivo, resiliente y sostenible, alineado con el paradigma de los Smart Ports.

Palabras clave: inteligencia artificial, logística portuaria, contenedores vacíos, optimización, costos operativos, Smart Ports.

Abstract

Empty container return management constitutes one of the main logistical challenges in international maritime trade due to its direct impact on operational costs, port efficiency, and supply chain competitiveness. In the context of the Port Node of Guayaquil, this problem is intensified by fragmented information among logistics actors, export seasonality, and the absence of predictive models for efficient equipment allocation. The aim of this study was to design an artificial intelligence-based strategy to reduce operational costs and optimize cycle times in empty container return management. The research was developed under a quantitative approach, with an explanatory-correlational scope and a non-experimental longitudinal design, using time series from the 2021-2024 period based on official data from Ecuador's port system. Descriptive statistics, time-series analysis, Pearson correlation, and prospective simulation through a Dueling Double Deep Q-Network (D3QN) model were applied. The results revealed a structural asymmetry between empty container import and export flows, as well as a functional interdependence between the terminals of the port node. The simulation projected a 15% reduction in unproductive movements, with estimated savings exceeding USD 260 million and a mitigation of 1,605.57 tons of CO₂. It is concluded that artificial intelligence represents a strategic tool for transforming Ecuadorian port management toward a predictive, resilient, and sustainable model aligned with the Smart Ports paradigm.

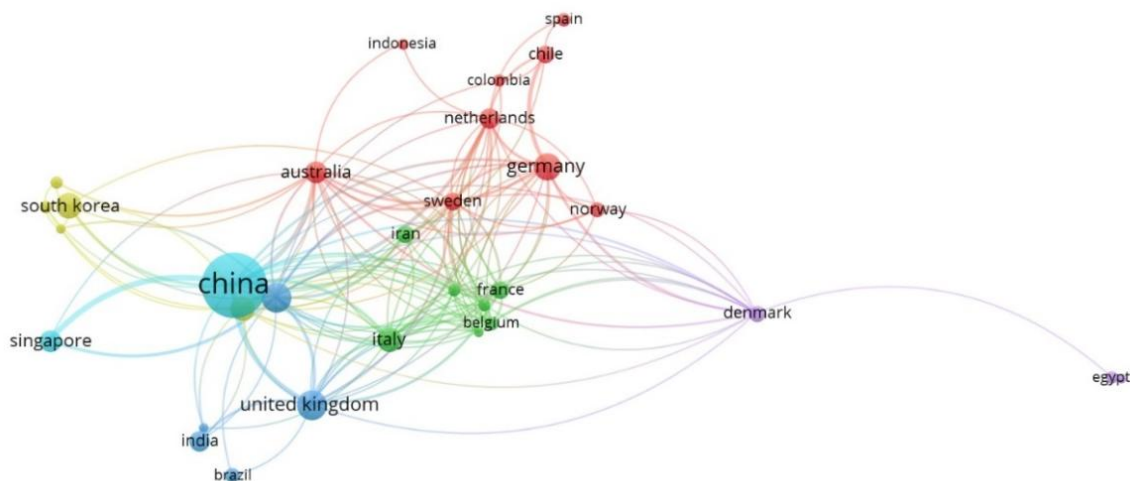
Keywords: artificial intelligence, port logistics, empty containers, optimization, operational costs, Smart Ports.

Introducción

En el actual escenario del comercio marítimo internacional, el reposicionamiento de contenedores vacíos se ha convertido en uno de los desafíos más relevantes para la eficiencia logística y la competitividad de las cadenas globales de suministro. Este fenómeno se origina en el desbalance estructural entre los flujos de importación y exportación, lo cual genera movimientos improductivos de unidades sin carga, incrementa los costos operativos y presiona la infraestructura portuaria. En este contexto, la gestión eficiente de contenedores vacíos ya no constituye únicamente una necesidad operativa, sino también una condición estratégica para sostener la competitividad del comercio exterior.

A nivel internacional, la literatura reciente evidencia una creciente incorporación de tecnologías basadas en inteligencia artificial en la gestión de puertos inteligentes o Smart Ports. En el mapa bibliométrico incorporado en el estudio se observa una fuerte concentración de la producción científica en países como China, Singapur y los Países Bajos, donde los modelos de aprendizaje automático, los sistemas de predicción en tiempo real y los gemelos digitales han permitido mejorar la asignación de equipos y reducir de manera significativa los costos logísticos y los tiempos de rotación. Este panorama contrasta con la limitada adopción de este tipo de herramientas en contextos latinoamericanos y, particularmente, en el sistema portuario ecuatoriano.

Figura 1. Red de coautoría global y mapeo bibliométrico por países en investigación de IA aplicada a la logística de contenedores



Fuente: Elaboración propia en VOSviewer con data de Dimensions.ai.

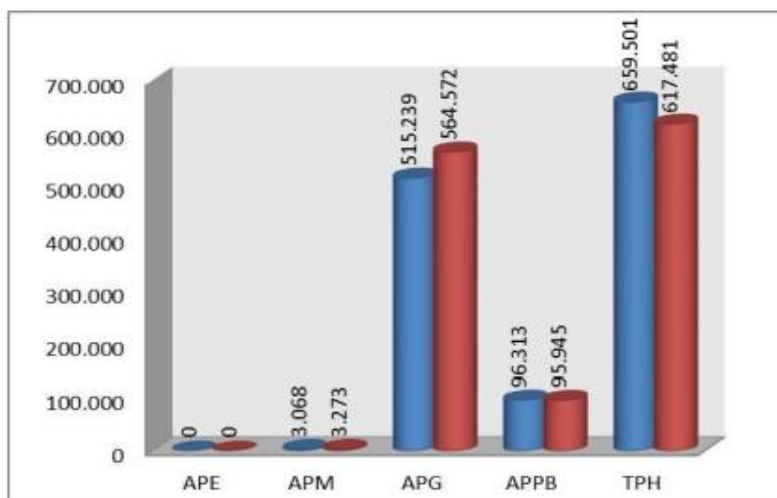
En el caso del Ecuador, el Nodo Portuario de Guayaquil concentra la mayor parte de la movilización de contenedores vacíos del país, convirtiéndose en el principal núcleo logístico del comercio exterior nacional. La evidencia presentada en el estudio muestra que esta concentración supera el 85% del movimiento total de este tipo de unidades, lo que revela la relevancia operativa de este nodo y, al mismo tiempo, la vulnerabilidad del sistema frente a ineficiencias derivadas de decisiones manuales, fragmentación informativa y falta de coordinación predictiva entre terminales, patios y agencias navieras. Dichas limitaciones provocan sobrecostos por almacenamiento, reposicionamiento y sobreestadía, afectando especialmente a sectores exportadores estratégicos como el banano y el camarón.

Tabla 1. Contenedores vacíos movilizados en el sistema portuario nacional (Año 2024).

| MES | TAMAÑO (Pie) | IMPORTACIÓN | | | | | | TOTAL TEUS |
|------------|--------------|-------------|-----|---------|--------|---------|------------|------------|
| | | APE | APM | APG | APPB | TPH | TOTAL IMPO | |
| ENERO | 20 | - | - | 233 | - | 38 | 271 | 66.099 |
| | 40 | - | - | 15.990 | 3.836 | 13.088 | 32.914 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| FEBRERO | 20 | - | - | 54 | - | 25 | 79 | 65.555 |
| | 40 | - | - | 13.273 | 4.925 | 14.540 | 32.738 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| MARZO | 20 | - | - | 62 | - | 73 | 135 | 58.757 |
| | 40 | - | - | 11.076 | 3.691 | 14.544 | 29.311 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| ABRIL | 20 | - | - | 171 | 2 | 181 | 354 | 69.532 |
| | 40 | - | - | 15.000 | 4.316 | 15.273 | 34.589 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| MAYO | 20 | - | - | 324 | 1 | 8 | 333 | 67.877 |
| | 40 | - | - | 13.223 | 4.114 | 16.435 | 33.772 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| JUNIO | 20 | - | - | 314 | 8 | 60 | 382 | 55.914 |
| | 40 | - | - | 12.040 | 3.374 | 12.352 | 27.766 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| JULIO | 20 | - | - | 154 | - | 88 | 242 | 58.416 |
| | 40 | - | - | 12.609 | 3.557 | 12.921 | 29.087 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| AGOSTO | 20 | - | - | 12 | - | 94 | 106 | 63.658 |
| | 40 | - | - | 15.816 | 3.338 | 12.622 | 31.776 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| SEPTIEMBRE | 20 | - | - | 369 | - | 83 | 452 | 56.526 |
| | 40 | - | 14 | 11.993 | 2.970 | 13.060 | 28.037 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| OCTUBRE | 20 | - | - | 73 | - | - | 73 | 56.313 |
| | 40 | - | - | 11.697 | 3.092 | 13.331 | 28.120 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| NOVIEMBRE | 20 | - | - | 201 | - | 54 | 255 | 53.571 |
| | 40 | - | - | 9.624 | 3.486 | 13.548 | 26.658 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| DICIEMBRE | 20 | - | - | 25 | - | 5 | 30 | 72.548 |
| | 40 | - | - | 17.967 | 4.143 | 14.149 | 36.259 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |
| TOTALES | 20 | - | - | 1.992 | 11 | 709 | 2.712 | 744.766 |
| | 40 | - | 14 | 160.308 | 44.842 | 165.863 | 371.027 | |
| | 48 | - | - | - | - | - | - | |

Fuente: SPTMF (2024). Elaborado para esta investigación.

Figura 2. Carga movilizada en contenedores en el Ecuador (TEUs). Se evidencia la prevalencia operativa del nodo Guayaquil (APG + TPH).



Fuente: SPTMF (2024)

Desde una perspectiva académica y aplicada, el principal vacío de conocimiento reside en la escasa incorporación de modelos de inteligencia artificial adaptados a la dinámica real del Nodo Portuario de Guayaquil. Aunque existen sistemas empresariales y registros históricos, no se dispone de un modelo autónomo de predicción que permita anticipar la demanda de retorno de equipo vacío, estabilizar la operación y transformar la gestión reactiva actual en una lógica preventiva y optimizada. Por ello, el presente estudio plantea como objetivo diseñar una estrategia fundamentada en inteligencia artificial para reducir los costos operativos y optimizar los tiempos de ciclo en la gestión del retorno de contenedores vacíos en el Nodo Portuario de Guayaquil.

Métodos y Materiales

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo-correlacional, debido a que buscó analizar la relación entre el desbalance de flujos de contenedores y la eficiencia operativa del sistema portuario, así como validar el potencial de una estrategia predictiva basada en inteligencia artificial frente al modelo reactivo tradicional. Este enfoque permitió trascender la simple descripción del fenómeno y examinar, desde una perspectiva analítica, cómo la incorporación de algoritmos inteligentes puede contribuir a la reducción de costos logísticos y a la optimización de los tiempos de ciclo en la gestión de retorno de contenedores vacíos. El diseño de la investigación fue no experimental, de tipo longitudinal, sustentado en el análisis de series de tiempo correspondientes al período 2021-2024. La elección de este diseño respondió a la necesidad de identificar patrones evolutivos, comportamientos estacionales y relaciones operativas en la dinámica histórica del sistema portuario, especialmente en función de los ciclos exportadores de productos perecederos como banano y camarón, cuya demanda influye directamente en la disponibilidad y reposicionamiento de contenedores vacíos. La población estuvo conformada por el universo de movimientos de carga contenerizada

registrados en el Sistema Portuario Nacional del Ecuador. Sin embargo, la muestra se delimitó al Nodo Portuario de Guayaquil, específicamente a las terminales identificadas como APG y TPH, incluyendo terminales como TPG y DP World Posorja, debido a que estas concentran la mayor proporción del tráfico nacional de contenedores vacíos y constituyen el principal núcleo logístico del comercio exterior ecuatoriano. En cuanto a las fuentes de información, se emplearon datos secundarios de carácter oficial obtenidos a partir de los boletines estadísticos anuales de la Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, complementados con registros del Banco Central del Ecuador relacionados con volumen exportado y valor FOB. La técnica de recolección utilizada fue la minería de datos, orientada a extraer, organizar y procesar información histórica relevante para la modelación predictiva. Posteriormente, los datos fueron tratados en Microsoft Excel y RStudio, lo que permitió depurar registros, identificar valores atípicos, eliminar datos nulos y estructurar la base en formato ancho para facilitar el análisis de series temporales y la simulación algorítmica. A partir de la base depurada se desarrolló una fase de ingeniería de características, mediante la creación de indicadores clave para el análisis logístico. Entre ellos se incluyeron el total de TEUs vacíos, calculado como la suma de los flujos de importación y exportación sin carga; el índice de desbalance logístico, formulado para identificar excesos o déficits de equipo; el flujo inverso; y la presión logística, entendida como la proporción de movimientos de vacíos respecto al total de TEUs movilizados. Estos indicadores permitieron fortalecer la capacidad explicativa del estudio y generar variables útiles para la simulación predictiva. La variable independiente se definió como la implementación de una estrategia logística basada en inteligencia artificial, operacionalizada mediante el algoritmo Dueling Double Deep Q-Network (D3QN), entrenado con los datos históricos del período 2021-2024 para anticipar la demanda de retorno de equipo vacío. La variable dependiente fue la eficiencia operativa del nodo portuario, medida a través de dos dimensiones: la reducción de los costos logísticos de

reposicionamiento y la optimización de los tiempos de estancia o lead time de los contenedores vacíos en patios y terminales. En coherencia con ello, la hipótesis de investigación planteó que la aplicación de una estrategia basada en inteligencia artificial permitiría reducir al menos en un 15% los tiempos de ciclo y los sobrecostos operativos frente al modelo reactivo manual vigente. Para el análisis de la información se emplearon técnicas de estadística descriptiva, análisis evolutivo de series temporales, correlación de Pearson y simulación prospectiva con inteligencia artificial. Estas herramientas permitieron cuantificar el comportamiento histórico de los flujos de contenedores vacíos, validar la interdependencia operativa entre terminales y proyectar escenarios de optimización económica y ambiental mediante la reducción de movimientos improductivos.

Figura 3. Estructura del dataset optimizado con series de tiempo (2021-2024) y segmentación por unidad observada (APG/TPH).

| AÑO | TIPO | MES | ORDEN_MES | TAMAÑO_PIE | APE | APM | APG | APPB | TPH | TOTAL_CONTENEDORES | TOTAL_TEUS_MES |
|-------|-------------|------------|-----------|------------|-----|-----|--------|-------|--------|--------------------|----------------|
| 2.021 | IMPORTACION | ENERO | 1 | 20 | 0 | 121 | 86 | 0 | 204 | 411 | 65.913 |
| 2.021 | IMPORTACION | ENERO | 1 | 40 | 0 | 29 | 17.612 | 4.625 | 10.485 | 32.751 | 65.913 |
| 2.021 | IMPORTACION | ENERO | 1 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.913 |
| 2.021 | IMPORTACION | FEBRERO | 2 | 20 | 0 | 28 | 62 | 0 | 5 | 95 | 58.993 |
| 2.021 | IMPORTACION | FEBRERO | 2 | 40 | 0 | 91 | 15.468 | 5.209 | 8.681 | 29.449 | 58.993 |
| 2.021 | IMPORTACION | FEBRERO | 2 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58.993 |
| 2.021 | IMPORTACION | MARZO | 3 | 20 | 0 | 79 | 179 | 0 | 73 | 331 | 53.349 |
| 2.021 | IMPORTACION | MARZO | 3 | 40 | 0 | 112 | 12.856 | 3.350 | 10.191 | 26.509 | 53.349 |
| 2.021 | IMPORTACION | MARZO | 3 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 53.349 |
| 2.021 | IMPORTACION | ABRIL | 4 | 20 | 0 | 94 | 123 | 1 | 560 | 778 | 64.892 |
| 2.021 | IMPORTACION | ABRIL | 4 | 40 | 0 | 95 | 12.983 | 3.572 | 15.407 | 32.057 | 64.892 |
| 2.021 | IMPORTACION | ABRIL | 4 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 64.892 |
| 2.021 | IMPORTACION | MAYO | 5 | 20 | 0 | 21 | 161 | 0 | 135 | 317 | 50.513 |
| 2.021 | IMPORTACION | MAYO | 5 | 40 | 0 | 107 | 8.946 | 3.088 | 12.957 | 25.098 | 50.513 |
| 2.021 | IMPORTACION | MAYO | 5 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50.513 |
| 2.021 | IMPORTACION | JUNIO | 6 | 20 | 0 | 28 | 42 | 0 | 21 | 91 | 58.471 |
| 2.021 | IMPORTACION | JUNIO | 6 | 40 | 0 | 56 | 13.267 | 3.884 | 11.983 | 29.190 | 58.471 |
| 2.021 | IMPORTACION | JUNIO | 6 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58.471 |
| 2.021 | IMPORTACION | JULIO | 7 | 20 | 0 | 67 | 20 | 0 | 7 | 94 | 50.032 |
| 2.021 | IMPORTACION | JULIO | 7 | 40 | 0 | 181 | 10.694 | 2.898 | 11.196 | 24.969 | 50.032 |
| 2.021 | IMPORTACION | JULIO | 7 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50.032 |
| 2.021 | IMPORTACION | AGOSTO | 8 | 20 | 0 | 40 | 13 | 0 | 28 | 81 | 60.535 |
| 2.021 | IMPORTACION | AGOSTO | 8 | 40 | 0 | 78 | 12.245 | 3.255 | 14.649 | 30.227 | 60.535 |
| 2.021 | IMPORTACION | AGOSTO | 8 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.535 |
| 2.021 | IMPORTACION | SEPTIEMBRE | 9 | 20 | 0 | 30 | 39 | 0 | 88 | 157 | 52.491 |
| 2.021 | IMPORTACION | SEPTIEMBRE | 9 | 40 | 0 | 142 | 11.570 | 3.772 | 11.672 | 26.167 | 52.491 |
| 2.021 | IMPORTACION | SEPTIEMBRE | 9 | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52.491 |

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de SPTMF.

Análisis de resultados

Comportamiento descriptivo del movimiento de contenedores vacíos

El análisis descriptivo de la base de datos evidenció una marcada asimetría entre los flujos de importación y exportación de contenedores vacíos en el período 2021-2024. La importación de vacíos presentó una media de 59.138,64 TEUs y un valor máximo de 85.517 TEUs, mientras que la exportación registró una media de 23.453,64 TEUs y un máximo de 33.323 TEUs. Esta diferencia confirma que el sistema portuario ecuatoriano opera bajo un patrón estructural de desbalance logístico, asociado a la condición del país como exportador neto de productos que requieren disponibilidad permanente de equipo vacío para su consolidación. Asimismo, la desviación estándar observada en el flujo de importación fue superior a la de exportación, lo que sugiere una mayor volatilidad del ingreso de equipo vacío al sistema nacional.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del movimiento de contenedores vacíos (2021-2024)

| TIPO | Media | Mediana | Desv. Estándar | Mínimo | Máximo | Muestra |
|--------------------|-----------|-----------|----------------|--------|--------|---------|
| EXPORTACIÓN | 23.453,64 | 22.580,50 | 3.992,51 | 17.843 | 33.323 | 144 |
| IMPORTACIÓN | 59.138,64 | 58.558,50 | 7.781,33 | 43.595 | 85.517 | 144 |

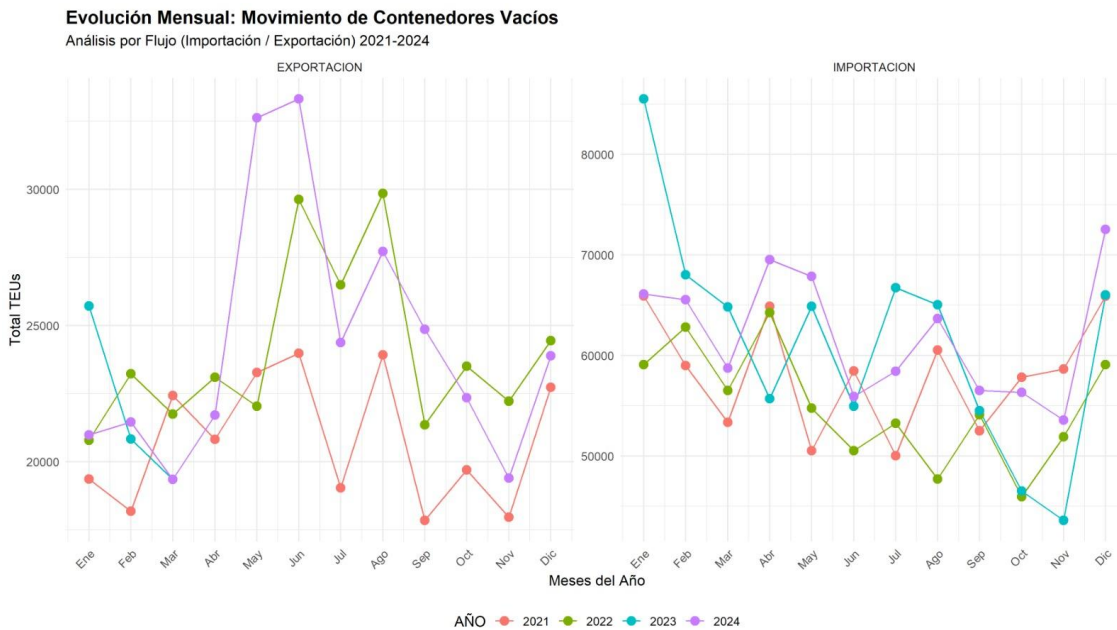
Nota: Datos expresados en Unidades Equivalentes a Veinte Pies (TEUs). Elaboración propia a partir de resultados en RStudio.

Evolución temporal y estacionalidad operativa

El análisis de series temporales permitió identificar una dinámica estacional en el movimiento de contenedores vacíos. Se observó que los años 2023 y 2024 presentaron una tendencia de recuperación del flujo de unidades, con repuntes significativos en los trimestres de mayor demanda exportadora. Estos picos coinciden con las ventanas logísticas de productos perecederos, lo que confirma que la dinámica del retorno de vacíos

está estrechamente condicionada por la demanda estacional del comercio exterior ecuatoriano. Esta regularidad temporal constituye un argumento sólido para justificar la incorporación de modelos predictivos capaces de anticipar saturaciones operativas y redistribuir equipo con mayor eficiencia.

Figura 4. Gráfico evolutivo del movimiento mensual de contenedores vacíos



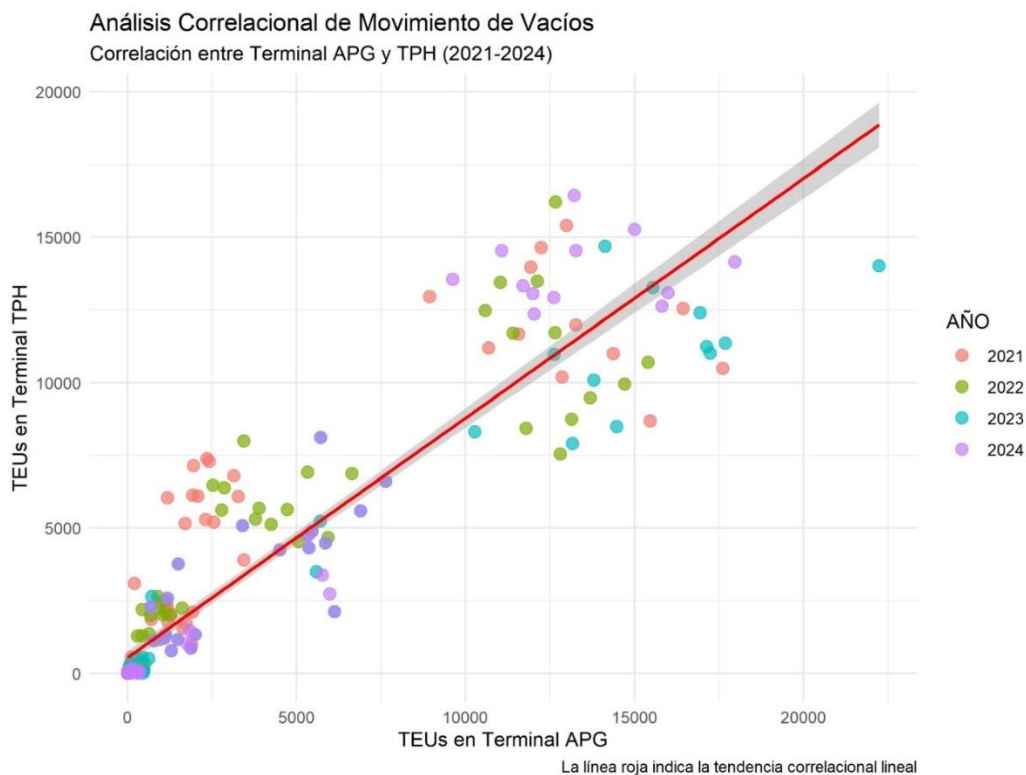
Fuente: Datos Procesados de Consolidado_RStudio

Fuente: Elaboración propia con base en el procesamiento de datos en RStudio.

Interdependencia entre terminales del nodo portuario

La aplicación del coeficiente de correlación de Pearson entre las terminales APG y TPH mostró una relación lineal positiva, evidenciando una interdependencia funcional entre los principales componentes del Nodo Portuario de Guayaquil. Este resultado indica que el incremento del posicionamiento de unidades en una terminal genera efectos directos sobre la capacidad operativa de las demás, descartando interpretaciones aisladas de la operación portuaria. En términos sistémicos, el hallazgo demuestra que el puerto opera como una red integrada, en la cual la saturación, fluidez o restricción de una terminal repercute sobre el comportamiento global del nodo logístico.

Figura 5. Gráfico de correlación entre las terminales APG y TPH (2021-2024).



Fuente: Elaboración propia con base en el procesamiento estadístico en RStudio.

Simulación predictiva mediante modelo D3QN

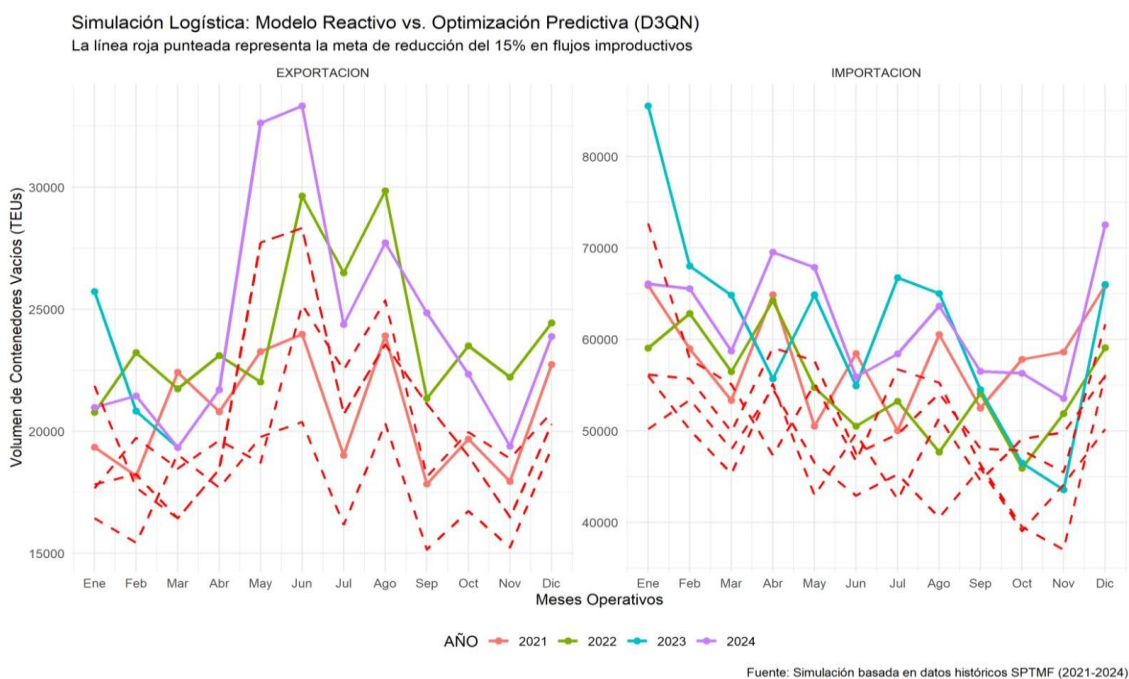
Una vez establecida la línea base del sistema, se ejecutó una simulación prospectiva con el modelo Dueling Double Deep Q-Network (D3QN), con el propósito de proyectar el impacto de una reducción del 15% en los movimientos improductivos de contenedores vacíos. Para esta estimación se consideró una tarifa base de USD 150 por unidad, que incluye costos de sobreestadía, movimientos de patio y transporte terrestre de reposicionamiento. Los resultados mostraron que, bajo esta meta de optimización, la exportación de vacíos pasaría de una media de 23.453,64 TEUs a 19.935,59 TEUs, mientras que la importación disminuiría de 59.138,64 TEUs a 50.267,85 TEUs. Estas reducciones permitieron validar la hipótesis de investigación y demostrar el potencial operativo del enfoque predictivo frente al modelo reactivo manual.

Tabla 3. Resumen de impacto y ahorro proyectado mediante implementación de IA.

| Flujo Logístico | Media Actual (TEUs) | Meta Proyectada IA (TEUs) | Ahorro Total Proyectado (USD) | Mejora Eficiencia |
|--------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| EXPORTACIÓN | 23,453.64 | 19,935.59 | \$ 75,987,045 | 15% |
| IMPORTACIÓN | 59,138.64 | 50,267.85 | \$ 191,608,335 | 15% |

Nota: Resultados obtenidos mediante simulación prospectiva en RStudio basándose en registros 2021-2024.

Figura 6. Evolución del escenario base vs. simulación predictiva IA (2021-2024).



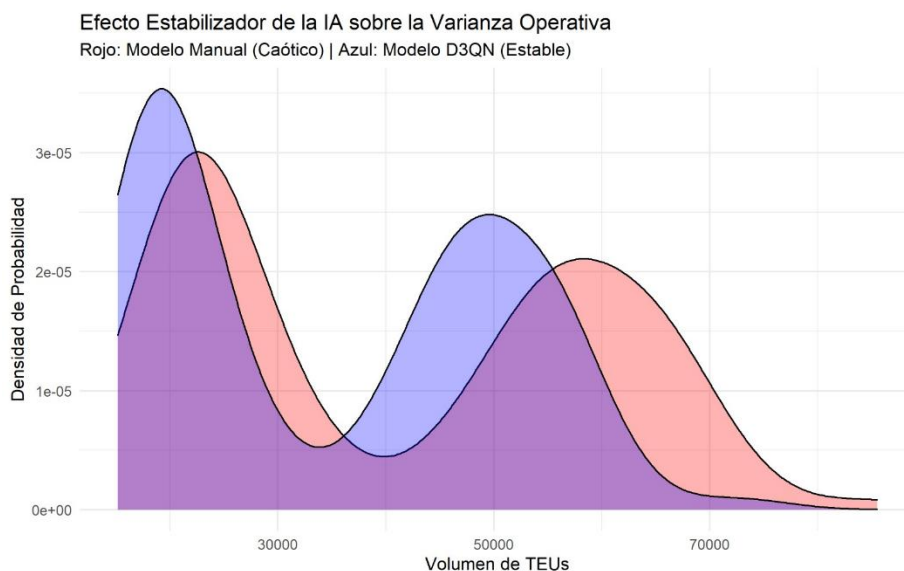
Fuente: Elaboración propia a partir de la simulación en RStudio.

Impacto ambiental y estabilidad operativa

Además del beneficio económico, la simulación mostró una reducción total de 1.605,57 toneladas de CO₂ asociadas a la eliminación de movimientos improductivos de contenedores vacíos. Desde la perspectiva de la sostenibilidad, este hallazgo sitúa a la propuesta dentro del enfoque de Green Logistics, al evidenciar que la optimización operativa también genera beneficios ambientales concretos. De manera complementaria, el análisis de densidad probabilística mostró un efecto estabilizador del modelo D3QN sobre

la varianza operativa, al concentrar los datos en rangos más eficientes de funcionamiento. Esto significa que la inteligencia artificial no solo reduce costos, sino que transforma la incertidumbre logística en mayor previsibilidad y resiliencia operativa.

Figura 7. Efecto estabilizador de la IA sobre la varianza operativa en TEUs.



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo D3QN.

Discusión

Los hallazgos obtenidos confirman que la gestión de contenedores vacíos en el Nodo Portuario de Guayaquil responde a una lógica estructuralmente ineficiente, determinada por el desbalance entre importación y exportación, la fragmentación de la información y la persistencia de un modelo operativo reactivo. La marcada diferencia entre los volúmenes promedio de importación y exportación de vacíos demuestra que el sistema absorbe un flujo elevado de unidades sin carga para sostener la dinámica exportadora del país, pero carece de mecanismos predictivos que permitan redistribuirlas con oportunidad y precisión. Esta situación incrementa el riesgo de saturación de patios, sobreestadía y movimientos innecesarios, afectando tanto a las terminales como a los actores productivos vinculados al comercio exterior.

En términos comparativos, los resultados del estudio se alinean con la literatura internacional que reconoce el potencial de la inteligencia artificial en la transformación de los puertos hacia modelos inteligentes de gestión. Los antecedentes presentados en la introducción muestran que en otros contextos ya se han utilizado algoritmos de aprendizaje automático, aprendizaje por refuerzo y soluciones basadas en datos para reducir errores de predicción, mejorar la asignación de recursos y disminuir costos logísticos. En este sentido, la aplicación del modelo D3QN en el caso de Guayaquil representa una adaptación pertinente de estas tendencias globales a un entorno portuario latinoamericano caracterizado por alta concentración operativa y limitada automatización predictiva.

La proyección de ahorros superiores a los 260 millones de dólares y la reducción del 15% en movimientos improductivos revelan que la inteligencia artificial puede actuar como un mecanismo real de competitividad sistémica. Más allá del beneficio financiero inmediato, el modelo permite anticipar escenarios de presión logística, estabilizar la operación y reducir la dependencia de decisiones empíricas. Esto adquiere especial importancia en un nodo exportador como Guayaquil, donde sectores estratégicos como el banano y el camarón dependen de la disponibilidad oportuna de equipo vacío para sostener su cadena de valor. En consecuencia, la IA no solo optimiza procesos internos del puerto, sino que fortalece el desempeño logístico del comercio exterior ecuatoriano en su conjunto.

De igual manera, el efecto estabilizador observado en la simulación y la reducción proyectada de emisiones de CO₂ amplían el alcance del estudio hacia la sostenibilidad y la resiliencia operativa. Esto permite afirmar que la propuesta no debe ser interpretada únicamente desde una lógica de ahorro, sino también como una estrategia de modernización portuaria alineada con principios de sostenibilidad, previsibilidad y gestión inteligente. Desde esta perspectiva, el estudio aporta evidencia para promover una transición gradual del sistema portuario ecuatoriano hacia un modelo de Smart Port, donde

la toma de decisiones esté respaldada por analítica avanzada, automatización predictiva y criterios integrales de eficiencia logística.

Conclusiones

La presente investigación permitió demostrar que la gestión reactiva y manual del retorno de contenedores vacíos en el Nodo Portuario de Guayaquil presenta limitaciones estructurales que afectan la eficiencia operativa, incrementan los costos logísticos y reducen la competitividad del sistema portuario ecuatoriano. A partir del análisis de series de tiempo correspondientes al período 2021-2024, fue posible identificar un patrón persistente de desbalance entre los flujos de importación y exportación de contenedores vacíos, así como una interdependencia funcional entre las terminales que integran el nodo portuario.

La aplicación del modelo Dueling Double Deep Q-Network (D3QN) permitió validar la hipótesis de investigación al proyectar una reducción del 15% en los movimientos improductivos de contenedores vacíos, con ahorros económicos superiores a los 260 millones de dólares. Este resultado confirma que la inteligencia artificial constituye una herramienta eficaz para transformar la lógica operativa del puerto, pasando de un esquema reactivo basado en contingencias a un sistema preventivo sustentado en predicción y optimización.

Adicionalmente, la investigación evidenció que los beneficios de esta estrategia no se limitan al plano financiero. La reducción de 1.605,57 toneladas de CO₂ y el efecto estabilizador sobre la varianza operativa demuestran que la implementación de modelos de inteligencia artificial también fortalece la sostenibilidad y la resiliencia del sistema logístico. De esta manera, la propuesta trasciende la optimización de costos y se posiciona como una

estrategia integral de modernización portuaria alineada con el paradigma de los puertos inteligentes.

En síntesis, el estudio concluye que la incorporación de inteligencia artificial en la gestión del retorno de contenedores vacíos puede convertirse en un factor decisivo para mejorar la competitividad del comercio exterior ecuatoriano. Como proyección futura, se recomienda profundizar esta línea de investigación mediante la implementación empírica del modelo en entornos operativos reales, así como ampliar el análisis hacia otros nodos portuarios del país para consolidar una política nacional de innovación logística basada en datos.

Referencias bibliográficas

- Abdelshafie, A., Salah, M., Kramberger, T., & Dragan, D. (2022). Repositioning and optimal re-allocation of empty containers: A review of methods, models, and applications. *Sustainability*, 14(11), 6655. <https://doi.org/10.3390/su14116655>
- Belmoukari, B., Audy, J.-F., & Forget, P. (2023). Smart port: A systematic literature review. *European Transport Research Review*, 15, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00581-6>
- Braekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Limbourg, S. (2017). Minimizing cost of empty container repositioning in port hinterlands, while taking repair operations into account. *Journal of Transport Geography*, 58, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.015>
- Chen, X., Ma, D., & Liu, R. W. (2024). Application of artificial intelligence in maritime transportation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 439. <https://doi.org/10.3390/jmse12030439>
- Crainic, T. G., Gendreau, M., & Dejax, P. (1993). Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. *Operations Research*, 41(1), 102–126.
- Dong, J.-X., Song, D.-P., & Dong, Y. (2013). Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 827–837. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.12.014>
- Du, B., Hu, H., Zhang, J., & Meng, M. (2021). A multi-stage approach for empty container repositioning under coordination among liner carriers. *Transportation Research Record*, 2675(7), 19–31. <https://doi.org/10.1177/03611981211021550>
- Erera, A. L., Morales, J. C., & Savelsbergh, M. W. P. (2009). The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5), 758–770. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.03.001>
- Ferretti, M., Fiore, U., Perla, F., Risitano, M., & Scognamiglio, S. (2022). Deep learning forecasting for supporting terminal operators in port business development. *Future Internet*, 14(8), 221. <https://doi.org/10.3390/fi14080221>
- Heilig, L., & Voß, S. (2017). Information systems in seaports: A categorization and overview. *Information Technology and Management*, 18(3), 179–201. <https://doi.org/10.1007/s10799-016-0269-1>
- Kandemir, C., Atasoy, B., & Gökmen, N. (2022). Deep learning models for predicting terminal operations in smart ports: A maritime perspective. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 654–672.
- Lamdjad, B. (2025). Comparative forecasting of container throughput for maritime logistics using statistical, machine learning and explainable AI models. *Maritime Business Review*, 1–17.
-

- López-Espinoza, R. (2021). Desequilibrios operativos y costos de reposicionamiento de contenedores en el eje logístico del Pacífico Sur. *Revista Iberoamericana de Logística Portuaria*, 9(2), 22–38.
- Min, H. (2022). Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0. *Maritime Economics & Logistics*, 24(2), 189–207. <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00211-3>
- Moon, I., Ngoc, A.-D., & Konings, R. (2013). Foldable and standard containers in empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.07.005>
- Neugebauer, J., Heilig, L., & Voß, S. (2024). Digital twins in the context of seaports and terminal facilities. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36, 821–917. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9>
- Numa-Navarro, I., Wilmsmeier, G., & Gil, C. (2023). Improving empty container management using street-turn: A case study of the Colombian logistics network. *Journal of Transport Geography*, 112, 103709. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103709>
- Pan, H., Zhang, C., & Wang, Q. (2024). Demonstration-guided reinforcement learning for optimizing outbound container stacking problem. In *Proceedings of the IISE Annual Conference and Expo 2024* (pp. 1654–1659).
- Paraskevas, A., Madas, M., Zeimpekis, V., & Fouskas, K. (2024). Smart ports in Industry 4.0: A systematic literature review. *Logistics*, 8(1), 28. <https://doi.org/10.3390/logistics8010028>
- Song, J., Tang, X., Wang, C., Xu, C., & Wei, J. (2022). Optimization of multi-port empty container repositioning under uncertain environments. *Sustainability*, 14(20), 13255. <https://doi.org/10.3390/su142013255>
- Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial. (2021). *Estadísticas portuarias y de transporte marítimo 2021*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial. (2022). *Estadísticas portuarias y de transporte marítimo 2022*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial. (2023). *Estadísticas portuarias y de transporte marítimo 2023*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial. (2024). *Estadísticas portuarias y de transporte marítimo 2024*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Škurić, M., Vukić, L., & Hess, S. (2019). Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation. *Omega*, 85, 194–213. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.004>
-

- Wang, P., Li, Y., Qin, W., et al. (2024). Optimization of yard remarkshalling operations in automated container terminals. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102552. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102552>
- Wang, P., Xu, Q., Li, Y., Chen, Q., Tao, J., Qin, W., Huang, H., & Zou, Y. (2025). Learning-based hybrid algorithms for container relocation problem with storage plan. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 104048. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104048>
- Xu, X., Huang, X., & Wang, L. (2024). Empty container repositioning problem using a reinforcement learning framework with multi-weight adaptive reward function. *Maritime Policy & Management*, 51(8), 1742–1763. <https://doi.org/10.1080/03088839.2024.2326635>
- Zhang, C., Jin, B., Tanaka, S., & Tierney, K. (2020). Machine learning-driven algorithms for the container relocation problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 102–131. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.05.017>
- Zheng, S., Sha, J., Kong, Y., & Wang, Y. (2025). Research on artificial intelligence-driven container relocation problem for green ports. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1614356. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1614356>
-