

Optimización del sistema de esclusas del Canal de Panamá con inteligencia artificial

Optimization of the Panama Canal lock system with artificial intelligence

Gabriel Montúfar Chiriboga

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil

<https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>; Autor de correspondencia: gabriel.montufar@up.ac.pa

Artículo Científico /
Scientific Article

RESUMEN

Palabras clave: Canal de Panamá, eficiencia operativa, gestión marítima, inteligencia artificial, optimización de esclusas

Keywords: Panama Canal, operational efficiency, maritime management, artificial intelligence, lock optimization

Cómo citar/ How to cite:
Montufar Chiriboga, G. (2025). Optimización del sistema de esclusas del Canal de Panamá con inteligencia artificial. Revista SyNerGia Empresarial, 1(1), 9–22.
<https://doi.org/10.59722/synergia.v1i1.1032>

Este artículo aborda la congestión en las esclusas del Canal de Panamá, los tiempos de espera asociados y la necesidad de optimizar el uso de agua y energía bajo restricciones operativas crecientes. Mediante una revisión de literatura y casos análogos en operaciones de esclusas y puertos, se analiza cómo la inteligencia artificial puede mejorar la programación de tránsitos y la asignación de recursos dentro de la cadena logística del Canal. Se identifican técnicas prometedoras, principalmente meta-heurísticas (algoritmos genéticos y optimización por colonia de hormigas) combinadas con modelos predictivos (arquitecturas recurrentes y convolucionales) para anticipar arribos y demanda de recursos, y reprogramar de forma dinámica ante perturbaciones. Como aporte práctico, se propone una hoja de ruta de implementación por fases basada en “simulación primero”, con pilotos controlados, expansión progresiva e integración institucional, junto con métricas de desempeño y requisitos de datos orientados a trazabilidad y gobernanza. Los resultados reportados en la evidencia revisada sugieren mejoras potenciales en espera y uso de recursos, condicionadas por la calidad de datos, integración con sistemas legados, capacitación y gestión del cambio.

ABSTRACT

This article addresses congestion at the Panama Canal locks, the associated waiting times, and the need to optimize water and energy use amid increasing operational constraints. Through a review of the literature and similar cases in lock and port operations, the article analyzes how artificial intelligence can improve transit scheduling and resource allocation within the Canal's logistics chain. Promising techniques are identified, primarily meta-heuristics (genetic algorithms and ant colony optimization) combined with predictive models (recurrent and convolutional architectures) to anticipate arrivals and resource demand and dynamically reschedule in response to disruptions. As a practical contribution, a phased implementation roadmap based on “simulation first” is proposed, featuring controlled pilots, progressive expansion, and institutional integration, along with performance metrics and data requirements focused on traceability and governance. The results reported in the reviewed evidence suggest potential improvements in wait times and resource utilization, contingent upon data quality, integration with legacy systems, training, and management change.

Recibido, 02/10/2024. Revisado, 14/10/2025. Aceptado, 07/11/2025. Publicado 30/12/2025

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución de Creative Commons (CC BY 4.0), que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.



1. Introducción

El Canal de Panamá constituye un nodo logístico crítico para el comercio marítimo global, al conectar los océanos Atlántico y Pacífico y soportar flujos de tránsito cuya eficiencia repercute en cadenas de suministro internacionales (Castillo Salamín, 2025). En este contexto, la operación del sistema de esclusas se enfrenta a presiones crecientes derivadas de la variabilidad de la demanda, la complejidad de las reglas operativas y la necesidad de administrar recursos restringidos, particularmente agua y energía, sin comprometer la seguridad ni la confiabilidad del servicio. La literatura ha señalado que los sistemas de transporte y de infraestructura con cuellos de botella presentan dinámicas no lineales y condiciones operativas cambiantes que dificultan alcanzar niveles óptimos mediante enfoques tradicionales rígidos (Deng et al., 2021; Ji et al., 2022; Yang et al., 2023).

En canales y vías navegables interiores, la gestión en esclusas se ha modelado como un problema de programación y asignación bajo restricciones de capacidad y ventanas de servicio, donde pequeñas perturbaciones (arribos, tiempos de servicio, indisponibilidad de equipos) pueden amplificar demoras a escala del sistema (Deng et al., 2021; Hammedi et al., 2022). En particular, los avances recientes en el denominado lock scheduling han mostrado que el desempeño depende de cómo se configuren las prioridades, la coordinación entre esclusas consecutivas y las políticas de secuenciación y despacho, así como de la forma en que se incorporen restricciones operacionales locales (Ji et al., 2022; Zhao et al., 2022). No obstante, aunque existen marcos y heurísticas robustas para entornos análogos, la transferencia directa a infraestructuras interoceánicas con restricciones hídricas y operativas específicas requiere una adaptación cuidadosa de supuestos, métricas y reglas de control, evitando extrapolaciones simplistas (Grancharova, 2022; Miller & Hyodo, 2021).

En paralelo, la inteligencia artificial (IA) ha cobrado relevancia como habilitador de decisiones operativas en sistemas complejos, al combinar modelos predictivos con métodos de optimización capaces de responder a la incertidumbre y a la variabilidad de la demanda. Revisiones recientes en operaciones portuarias y logísticas sugieren que el rendimiento sostenido no depende únicamente del algoritmo, sino del andamiaje socio-técnico que lo soporta: calidad y trazabilidad de datos, integración con sistemas legados, monitoreo de deriva, y gobernanza de despliegue en entornos críticos (Filom et al., 2022; Abdelshafie, 2023). Asimismo, en dominios marítimos y de transporte se ha documentado el potencial de modelos predictivos para anticipar comportamientos operativos y habilitar reprogramaciones oportunas, aunque con exigencias altas de consistencia y disponibilidad de datos (Sedaghat, 2024; Guo et al., 2024).

A pesar de estos avances, persisten brechas relevantes para el caso del Canal de Panamá: (i) falta de guías integradas que conecten técnicas de IA (predicción + optimización) con decisiones operativas específicas del esclusaje; (ii) heterogeneidad de métricas y supuestos en la literatura que limita la comparabilidad y dificulta traducir resultados a objetivos como espera, uso de agua y consumo energético; y (iii) ausencia de hojas de ruta de implementación que prioricen validación por simulación/gemelos digitales, criterios de avance medibles y mitigación de riesgos técnicos y organizacionales propios de infraestructura crítica (Mutschler et al., 2024; Filom et al., 2022; Miller & Hyodo, 2021).

En respuesta, este artículo propone un marco práctico y medible para orientar la optimización del sistema de esclusas del Canal de Panamá mediante IA, articulando la evidencia disponible en programación de esclusas y operaciones análogas con un enfoque de despliegue gradual. El trabajo se centra en dos familias técnicas complementarias: (1) meta-heurísticas para secuenciación y asignación de recursos (p. ej., algoritmos genéticos y optimización por colonia de hormigas), adecuadas para problemas combinatorios con restricciones y objetivos múltiples (Guan et al., 2021; Ji et al., 2022; Andrei & Scarlat, 2024); y (2) modelos predictivos para anticipar arribos, picos de demanda y requerimientos operativos, con el fin de habilitar planificación anticipatoria y

reoptimización bajo perturbaciones (Sedaghat, 2024; Guo et al., 2024).

Las principales contribuciones del artículo son cuatro: (i) identificar y sintetizar técnicas de IA aplicables a la programación de tránsitos y la asignación de recursos en sistemas de esclusas, con especial atención a restricciones operativas; (ii) proponer una estrategia de implementación escalonada basada en “simulación primero” y pilotos controlados para reducir el riesgo de adopción (Mutschler et al., 2024); (iii) definir métricas y requisitos de datos orientados a desempeño (tiempos de espera, uso de agua, consumo energético y capacidad efectiva) y a trazabilidad operativa; y (iv) mapear riesgos técnicos y organizacionales (calidad de datos, integración TI/TO, ciberseguridad, deriva de modelos y gestión del cambio) junto con estrategias de mitigación (Abdelshafie, 2023; Filom et al., 2022)..

2. Metodología

Se llevó a cabo una revisión sistemática con análisis de casos comparables consultando Scopus, Web of Science Core Collection, IEEE Xplore, TRID y ScienceDirect, complementada con Google Scholar. La estrategia de búsqueda se articuló en base a términos relacionados con esclusas, puertos y canales con programación, despacho y asignación de recursos, inteligencia artificial, meta-heurísticas, aprendizaje automático, simulación de eventos discretos.

Los estudios fueron seleccionados en dos partes: primero por título y resumen y por artículo completo; parte de la extracción de información contempló una plantilla en la que se recogían variables del contexto, técnica de IA, fuentes y requisitos de datos, métricas de desempeño en tiempos de espera, uso de agua, consumo energético, capacidad efectiva, resultados cuantitativos y amenazas a la validez. La calidad de los estudios fue verificada mediante una lista de cotejo válida en la que se recogían criterios de claridad de objetivos, descripción de los datos, línea base y reproducibilidad.

Se tomaron para la revisión artículos en par, artículos empíricos, de simulación y/o de implementación operativa que reportaban al menos una métrica comparable delimitada en los dominios de esclusas, puertos y canales, en inglés o español, incluyendo evidencias recientes que fueran aplicables al contexto del Canal de Panamá (Bilican et al., 2024; Shafik, 2024; Khatua et al., 2024). Se descartaron editoriales, tesis y pre-publicaciones sin revisión y trabajos puramente teóricos o que enfocaban su atención de forma exclusiva en hardware y piezas sin métricas o sin descripción de datos suficientes.

El diseño de la metodología se articula en una cartera de técnicas que la literatura reconoce como prometedoras para la programación y la asignación de recursos como, por ejemplo, los algoritmos genéticos y la optimización por colonia de hormigas, y su validación mediante (Zhao et al., 2022; Guan et al., 2021; Ji et al., 2022; Andrei & Scarlat, 2024; El Maliki & Abbou, 2024). Entre las limitaciones se destacan la dependencia de la literatura secundaria y de los contextos análogos, la heterogeneidad de las métricas que no permiten una revisión meta analítica formal, el posible sesgo de publicación que emerge en la dirección de los resultados positivos, las diferencias de tecnología y de datos con relación al Canal de Panamá o la dependencia de un marco teórico de optimización y control que podría minusvalorar componentes socio organizacionales.

3. Resultados

3.1. Hallazgos de la literatura

Desde hace tiempo, los algoritmos genéticos y la optimización por colonia de hormigas han demostrado ser una técnica probada para optimizar sistemas complejos, incluso redes de transporte u operaciones logísticas, y son idóneos para problemas con autopistas de varios objetivos y restricciones operativas

cambiantes (Zhang et al. 2024, Segovia et al. 2022, Mohamed & Hassan 2024).

Estos métodos muestran su lógica evolutiva y poblacional, lo cual les deja explorar eficazmente grandes espacios de búsqueda utilizando la combinación, mutación, y selección de las soluciones candidatas, mientras que los mecanismos de refuerzo estocástico de la colonia de hormigas son utilizados para actualizar señales análogas a feromonas para convergir hacia secuencias y rutas de alto rendimiento. En el contexto del Canal de Panamá, estas técnicas pueden ser combinadas para promover la mejora de la secuenciación de paso por esclusas y la distribución de los exigentes recursos, entrelazando criterios de desempeño competitivos tales como los tiempos de espera, el uso de agua o el uso de energía sin sacrificar la capacidad efectiva del sistema (Waghmare et al., 2024; Zhao et al., 2022; Guan et al., 2021; Ji et al., 2022)

Aplicadas al canal, las meta-heurísticas permiten construir planes de operación y reprogramaciones en tiempos casi reales, teniendo en cuenta las ventanas de mantenimiento, la formación de convoyes, las restricciones de calado, la disponibilidad de remolcadores o las prioridades del servicio. La optimización por colonia de hormigas plantea el problema como un grafo de estados que representa las etapas de aproximación, esclusaje y salida, donde las trayectorias de las “hormigas” representan secuencias de tránsito y asignaciones de recursos y las funciones de evaluación incorporan penalizaciones por espera, consumo de agua y energía. Los cambios iterativos en las feromonas y en las heurísticas hacen posible adaptarse a cambios repentinos en la demanda o en las situaciones hidrológicas, de forma que se extraen, de forma robusta y factible, alternativas para la toma de decisiones operativas (Andrei & Scarlat, 2024; El Maliki & Abbou, 2024). Las redes neuronales y otros modelos predictivos se superponen a este enfoque para predecir patrones de arribos, flotas y requerimientos de recursos.

En concreto, las arquitecturas recurrentes y las arquitecturas convolucionales permiten dar cobertura a series temporales y a representaciones multivariadas y estimar con cierto riesgo los picos de tráfico, la distribución horaria de los arribos y los requerimientos de agua y energía, además de dar tratamiento a variables exógenas como restricciones de calado, episodios de ENSO o ventanas de mantenimiento (Guo et al., 2024; Ahmad et al., 2024).

Estas previsiones permiten la planificación anticipatoria y la mejora de la programación de tránsitos al prever picos de demanda y disponer los recursos proactivamente (Golak et al., 2022), contribuyen a la reducción de costes operativos al guiar el uso eficiente de agua y energía en función de necesidades proyectadas (Zhang & Ke, 2024) y fomentan una gestión dinámica de los tiempos de espera mediante reconfiguraciones oportunas a cambios repentinos de la demanda (Hammedi et al., 2022).

La composición del binomio entre meta-heurísticas y modelos predictivos representa un bagaje técnico-operativo que contribuye al incremento de la eficiencia, resiliencia y sostenibilidad de la operación de esclusas en el Canal de Panamá, con un carácter transferible a situaciones semejantes.

3.2. Síntesis y transferencia de la evidencia al contexto del Canal

La evidencia internacional concluye que el empleo de meta-heurísticas para secuenciación y asignación de recursos, en combinación con modelos predictivos de demanda, permite mejorar los tiempos de espera, el uso de los recursos o la estabilidad operativa de terminales y esclusas que realizan funciones análogas (Zhao et al., 2022; Guan et al., 2021; Ji et al., 2022). Para poder transferir estos resultados al contexto del Canal de Panamá es necesario compatibilizar hipótesis de datos, reglas operativas y restricciones hidráulicas locales, evitando la extrapolación directa sin realizar una calibración contextual de tales supuestos (Grancharova, 2022; Rosadi & Franciscus, 2024; Sardar, 2024).

La aplicabilidad de los algoritmos genéticos y de la optimización por colonia de hormigas dependerá de

la adecuada representación de prioridades de tránsito, ventanas de mantenimiento, calados, y disponibilidad de remolcadores y locomotoras, así como de la consideración de costos de agua y energía en la función objetivo (Zhang et al., 2024; Segovia et al., 2022; Mohamed & Hassan, 2024). En Panamá, este tipo de técnicas deben codificar las políticas operativas existentes y las restricciones de seguridad, de modo que la optimización no entre en conflicto con las normas o procedimientos críticos (Waghmare et al., 2024; Andrei & Scarlat, 2024; El Maliki & Abbou, 2024).

Por su parte, los modelos predictivos para arribos y demanda de recursos funcionarían como un elemento de anticipación operativa siempre que estén entrenados con series confiables y variables exógenas adecuadas, donde se puedan obtener planes previos ante picos y perturbaciones (Guo et al., 2024; Ahmad et al., 2024). En el Canal, la transferencia requeriría integrar históricos de tránsitos, patrones de flota, y señales hidrometeorológicas con despliegues que prioricen el monitoreo de deriva para poder garantizar el desempeño y la trazabilidad (Golak et al., 2022; Zhang & Ke, 2024; Hammedi et al., 2022).

La literatura recomienda validar la transferencia mediante gemelos digitales y experimentación controlada antes de escalar, con el objetivo de reducir el riesgo y ajustar las expectativas al desempeño real (Mutschler et al., 2024). En Panamá, las simulaciones con escenarios de alta demanda y variabilidad hidrológica permiten dimensionar cuellos de botella, contrastar diferentes políticas de operación hidráulica y cuantificar beneficios y compensaciones en tiempos de espera, consumo hídrico-energético o capacidad efectiva (Yang et al., 2023; Miller & Hyodo, 2021).

Una transferencia eficaz requiere una estrategia de implementación escalonada, una buena gobernanza de datos y una organización previa para la adopción y mantenimiento de sistemas de IA (Miller & Hyodo, 2021; Chinnasami et al., 2024). La evidencia muestra que el éxito depende no tanto de qué algoritmo específico se utilice, sino del andamiaje socio-técnico aplicado: calidad y accesibilidad de datos, integración con sistemas heredados, formación por roles y salvaguardas de transparencia y sostenibilidad acordes con una infraestructura crítica (Balasubramani & Natarajan, 2024; Abdelshafie, 2023; Filom et al., 2022).

3.3. Propuesta de implementación derivada de la evidencia

Se sugieren simulaciones como paso previo a la adopción extensiva de las técnicas de inteligencia artificial, con el objetivo de validar supuestos, evaluar beneficios y atenuar riesgos operacionales (Mutschler et al., 2024). Con plataformas de simulación discreta y de eventos híbridos, los operadores pueden desarrollar gemelos digitales del sistema de esclusas y ensayar diferentes configuraciones, reglas de prioridad, políticas de asignación de recursos y combinaciones de algoritmos de optimización.

Los escenarios prioritarios incluyen, entre otros, la reproducción de los picos de demanda de modo que puedan determinarse cuellos de botella y evaluarse luego acciones correctivas; así como la variación sistemática de las condiciones meteorológicas e hidrológicas con la pretensión de evaluar su impacto sobre el consumo de agua y energía, y en caso necesario, adecuar la operativa de la que se valen los remolcadores, locomotoras y válvulas, así como compuertas (Yang et al., 2023).

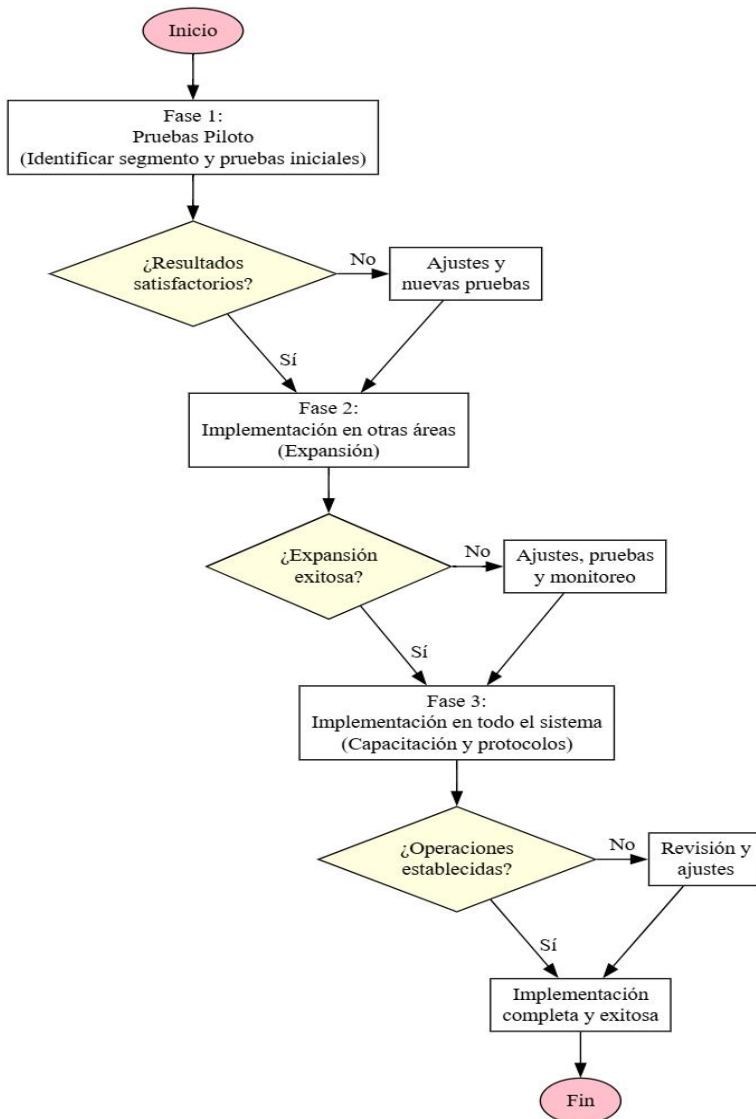
En las mismas líneas, el diseño de ejercicios de estrés comprende situaciones: fallas de la infraestructura, indisponibilidad de equipos críticos e interrupciones del tráfico; la razón es doble: por una parte, obtener información sobre la continuidad de la operativa, y previsiones sobre el tiempo de recuperación bajo protocolos de contingencia. La implementación se plantea en una secuencia de tres etapas concatenadas, y de este modo el aprendizaje con datos reales permite subir el nivel de madurez tecnológica sin exponer el sistema a riesgos no calculados.

En la primera etapa de pilotos controlados se establece el alcance a segmentos concretos o franjas

horarias, se trabaja con un subconjunto de embarcaciones y de recursos; en esta fase, se calibra la integración entre modelos de IA y sistemas de control y de planificación existentes. En la segunda etapa de extensión progresiva la cobertura se amplía a más esclusas y turnos, se contempla una retroalimentación continua sobre el desempeño e iteración sobre algoritmos para mejorar la robustez y la capacidad de adaptación con el crecimiento de la diversidad de casos. La tercera etapa de integración institucional plena contempla el funcionamiento normal (día al día) apoyado por IA, establece contratos de nivel de servicio y métricas de supervisión, garantiza la formación del personal e implementa rutinas de supervisión, auditoría y mejora continua. Este encadenamiento recogido en el modelo (figura 1) establece que cada ampliación de cobertura en alcance debe ser sustentada por evidencia de simulación y por el seguimiento de resultados observados in situ: de este modo se reduce la incertidumbre tanto técnica como organizacional.

Figura 1

Flujo de implementación por fases de IA en el Canal de Panamá con puntos de decisión y criterios de avance.



Nota. El plan se basa en ciertos desarrollos en fases que comienzan con pilotos limitados y, a continuación, van evaluando la entrega con iterativos ajustes para asegurar la viabilidad. La Fase 2 expande el soporte a otras áreas, chequeando el éxito; si fallan, se corrigen, se vuelven a probar y aumentan la supervisión para manejar riesgos. La Fase 3 se encarga de la total puesta en funcionamiento, con entrenamiento al personal y certificados de operación a la medida. Elaboración propia, 2025.

3.4. Beneficios potenciales y casos de uso

El uso de herramientas de inteligencia artificial aplicadas a la secuenciación de los tránsitos y la

coordinación de los recursos permite, de forma sustantiva, disminuir los tiempos de espera de los buques.

En el puerto de Róterdam, por ejemplo, el uso de algoritmos de optimización dio lugar a una reducción de hasta un 30% en las esperas, gracias a sus planificadores que han dinamizado los arribos, calados y ventanas de mantenimiento y tanto éstas como la asignación de remolcadores, locomotoras y posiciones de atraque se han reprogramado en tiempo casi real.

Este tipo de aplicación conjunta de modelos predictivos para detectar los picos de llegada con meta-heurísticas y métodos de búsqueda que reprogramen ante la aparición de perturbaciones de la operación procura mantener la factibilidad de las secuencias y disminuye la propagación de las demoradas.

La utilización eficiente de los recursos, especialmente del agua, resulta ser un aspecto crítico para el Canal de Panamá y es por eso por lo que los modelos predictivos permiten conducir anticipadamente la demanda operativa con el objetivo de reducir desperdicios y de asistir a las decisiones relacionadas con la apertura y el cierre de compuertas, el balance de cámaras y la coordinación de convoyes.

Un reciente estudio desarrollado para el puerto de Róterdam acreditó que la aplicación de técnicas de IA permitía una disminución del consumo energético en cerca de un 20%; por analogía funcional, este tipo de mejora es transferible a la gestión hídrica y energética de los sistemas de esclusas cuando es útil incorporar junto a ello las reglas de operación hidráulica y las políticas de priorización compatibles con las restricciones en el canal.

La tabla 1 ilustra ambos estudios de caso, así como los resultados del uso de la inteligencia artificial aplicada al sector marítimo y al medio ambiente portuario, focalizando indicadores de rendimiento de operaciones antes y después de la intervención, los modelos utilizados y los principales condicionantes de los datos e infraestructura para la replicación en otros espacios.

Mediante Maersk se presenta una referencia en coordinación predictiva a escala multi-terminal y mediante Róterdam un banco de pruebas de optimización energética operativa. Ambas trayectorias, por otro lado, también evidencian que la combinación de pronóstico de arribos y pronóstico de demanda en combinación con la optimización de secuencias y la asignación de recursos puede dotar a los terminales de esperas y consumos sustancialmente menores, pero siempre que se encuentre la integración suficiente con los sistemas legados y una gobernanza de datos robusta (Zhao et al., 2022; Guan et al., 2021; Ji et al., 2022).

Tabla 1

Estudios de caso con IA en puertos: técnicas, métricas y efectos en tiempos de espera y consumo energético

Estudio de Caso	Empresa/Proyecto	Tecnología de IA Utilizada	Resultados
Estudio de Caso 1: IA en el Envío	Maersk Line	Optimización de combustible, mantenimiento predictivo	Reducción del consumo de combustible, disminución de emisiones de CO ₂ , mejora en las prácticas de mantenimiento
Estudio de Caso 2: IA en Monitoreo Ambiental	Puerto de Róterdam	Monitoreo de calidad del aire y agua, modelos predictivos	Mejóro la vigilancia ambiental, mostró una respuesta rápida a eventos de contaminación, cumplimiento con las regulaciones

Nota. La Tabla 1 resume dos aplicaciones de IA en el sector marítimo: (1) Maersk Line emplea optimización de combustible y mantenimiento predictivo, con menor consumo, menores emisiones y mejores rutinas de mantenimiento; (2) el Puerto de Róterdam integra monitoreo de aire y agua y modelos predictivos, fortaleciendo la vigilancia ambiental, acelerando la respuesta a eventos de contaminación y favoreciendo el cumplimiento regulatorio.

En el caso Maersk, el valor operacional proviene de la acción conjunta entre modelos de hora estimada de arribo y planificadores que predicen atraques, remolcadores y ventanas de servicio. La mejora no es solo una

cuestión del algoritmo, sino también del pronóstico que se obtenga, así como de la capacidad de encontrar otras alternativas de reoptimización frente a la alteración del plan; donde se pueden encontrar calidades de datos e interoperabilidad altas, las reducciones en el tiempo de espera apuntadas en la literatura que maneja casos análogos, reproducirlas y obtener resultados estables (Rosadi & Franciscus, 2024; Sardar, 2024; Golak et al., 2022).

Róterdam nos aporta evidencia en el eje energético: el uso de IA para la orquestación de equipos e instalaciones dio lugar a consumos en la orden del 20% en el estudio que cita, y muestra que la señal de control que se puede derivar de los modelos predictivos y de optimización puede ser capaz de alinear operación con las metas de eficiencia sin comprometer la capacidad (Zhang & Ke, 2024; Rosadi & Franciscus, 2024).

En el caso del Canal, el análogo directo es el agua por tránsito y la energía por ciclo de esclusaje. El cierre con la lectura de conjunto apunta claramente a un patrón transferible: primero anticipar la carga (pronóstico de arribos y composición de flota) y acto seguido optimizar la secuenciación y la asignación al tiempo que se respeta las restricciones hidráulicas, de seguridad y de mantenimiento.

El nexo entre evidencia y aplicación es el gemelo digital y el ensayo controlado, que permitirán la cuantificación de cuellos de botella y la validación de umbrales de avance antes de escalar (Mutschler et al., 2024; Miller & Hyodo, 2021).

Para Panamá, las implicaciones son las de algún tipo operativo y medible: elegir los pilotos donde la telemetría es fiable, alinear las funciones objetivo con tiempos de espera y consumos hídrico-energético, y lanzar los bucles de realimentación para detectar deriva y re-entrenar.

El valor esperado es consistente con la literatura de puertos y esclusas directamente análogas, condicionado por la integración técnica y la gestión del cambio y los datos, y no por el algoritmo a esta parte (Zhao et al., 2022; Ji et al., 2022; Rosadi & Franciscus, 2024; Sardar, 2024).

Al optimizar las operaciones, el Canal de Panamá podría operar con un mayor tráfico, sin tener que realizar una ampliación física de la infraestructura, mediante un mayor rendimiento.

Cabe destacar que esto es especialmente importante porque el tamaño de los barcos que transitan a través del canal es cada vez mayor y el puerto de Los Ángeles ha aumentado su capacidad operativa en un 15 % mediante una optimización con IA sin realizar ampliaciones físicas. La figura 2 es un mapa del Canal de Panamá donde se identifican las principales áreas de propuesta para la introducción de la IA.

Figura 2

Áreas operativas prioritarias para aplicar IA en esclusas: secuenciación, asignación de recursos y gestión



Nota. El mapa localiza áreas clave del Canal de Panamá para aplicar IA: planificación y secuenciación del tránsito; asignación de esclusas y remolcadores; predicción de demoras; gestión hídrica y energética; monitoreo ambiental y seguridad operativa.

3.5. Reflexión crítica sobre riesgos, limitaciones y condiciones de éxito

Adaptar el Canal de Panamá no es simplemente trasladar algoritmos, sino que también implica rediseñar interfaces, flujos y reglas operativas para que sean compatibles con restricciones hidráulicas y de seguridad, operar con sistemas de control existentes por medio de APIs estables, latencias máximas, redundancias, etc. La parametrización del calibrado local deberá permitir la parametrización de prioridades de tránsito, calados, convoyes, ventanas de mantenimiento y costos hídricos-energéticos en la función objetivo, incluyendo también pruebas de sensibilidad para establecer márgenes seguros (Zhao et al., 2022; Guan et al., 2021; Ji et al., 2022; Zhang et al., 2024; Segovia et al., 2022; Andrei & Scarlat, 2024; El Maliki & Abbou, 2024).

El principal riesgo reside en los datos: sin calidad, sin completitud, sin sincronización, sin trazabilidad, los modelos optimizan sobre ruido. Es necesaria una gobernanza sólida que incluya catálogos y linaje de datos, así como validaciones automáticas previas a las inferencias. También se deben establecer bases de datos para pruebas y un plan de gestión de deriva que contemple umbrales de alerta, reentrenamientos controlados y un versionado que garantice la reproducibilidad.

Además, estas salvaguardas deben abarcar la ciberseguridad operativa en entornos de Tecnologías de la Información y Operación (TI/TO) que estén segmentados y sean auditables, así como mecanismos que permitan la trazabilidad de las decisiones (Guo et al., 2024; Ahmad et al., 2024; Balasubramani & Natarajan, 2024; Abdelshafie, 2023). La mitigación desde el punto de vista técnico requiere una escalera de validación. Esto implica el uso de simulaciones y gemelos digitales para analizar políticas y detectar cuellos de botella, pruebas de campo limitadas, implementaciones canarias y operaciones que cuenten con la capacidad de realizar una reversión inmediata.

En cada una de estas etapas es fundamental contar con criterios de salida bien definidos, que incluyan tiempos de espera, consumo de recursos hídricos y energéticos, además de la confiabilidad, todo esto sustentado por escenarios de alta demanda y variabilidad hidrológica (Mutschler et al., 2024; Yang et al., 2023; Miller & Hyodo, 2021). El cambio organizacional también es crucial. La adopción efectiva de nuevas estrategias requiere formación específica para cada rol (operaciones, planificación, mantenimiento, TI/TO), manuales operativos que se mantengan actualizados, simulacros y un equipo interno de soporte, tanto de primer como de segundo nivel, con acuerdos de atención establecidos.

Contar con un esquema de responsabilidades claro y una comunicación eficaz sobre objetivos, métricas y salvaguardas ayuda a disminuir la incertidumbre y resistencia, favoreciendo así la apropiación de las herramientas operativas (Miller & Hyodo, 2021; Chinnasami et al., 2024; Balasubramani & Natarajan, 2024). Asimismo, hay riesgos estratégicos que no se deben pasar por alto: la dependencia de proveedores, la opacidad de los modelos, la subestimación de los costos a lo largo de su ciclo de vida y la desalineación con las metas medioambientales y regulatorias.

Para mitigar estos riesgos, es recomendable exigir explicaciones claras y realizar auditorías periódicas, así como incluir cláusulas de portabilidad tecnológica y restricciones de sostenibilidad en las funciones objetivo. Además, es esencial fomentar la cooperación internacional para acelerar el aprendizaje y la comparabilidad en el desempeño. Implementar un monitoreo continuo con indicadores y umbrales de alerta es clave para mantener la mejora continua y la resiliencia operativa (Abdelshafie, 2023; Filom et al., 2022; Rosadi & Franciscus, 2024; Sardar, 2024; Miller & Hyodo, 2021).

4. Discusión

Los resultados teóricos y la propuesta de puesta en práctica se recogen en la literatura que documenta mejoras importantes en la programación y asignación de cuellos y recursos, mediante meta-heurísticas y modelos predictivos, pero quizás los resultados más robustos son correspondientes con contextos de ríos interiores o terminales portuarias que deben ser extrapolados con precaución a un sistema de esclusas interoceánicas, con estrictas limitaciones de agua.

De hecho, los resultados alcanzados para la programación de esclusas y cuellos de botella (Zhao et al., 2022; Ji et al., 2022; Yang et al., 2023) y para hubs complejos como el de las Tres Gargantas (Zhang & Ke, 2024) avalan que las reducciones en esperas son plausibles, si bien también muestran que el comportamiento está condicionado por determinadas reglas operativas locales y por la función objetivo utilizada. En el Canal, la eficiencia no puede optimizarse solo por tiempo, sino que debe interiorizar los costes de agua y de energía en forma de restricciones primarias, matiz que resulta menos evidente en varios estudios de referencia.

La propuesta destaca gobernanza, calidad y trazabilidad en datos e integración, habiendo sido ya documentados en literatura previa que estos factores explican más el éxito que la elección concreta del algoritmo a implementar; revisiones sobre IA en puertos han constatado que integración de sistemas legados, existencia de telemetría confiable y monitoreo de deriva son los determinantes del desempeño sostenido (Filom et al., 2022);

Trabajos recientes sobre predicción y gestión energética han reafirmado una necesidad de arquitecturas explicadas y de versionado reproducible para la toma de decisiones arquitecturales críticas (Guo et al., 2024; Balasubramani & Natarajan, 2024), así como experiencias logísticas han advertido sobre complejidad y dependencia de supuestos, exigiendo portabilidad tecnológica y auditoría continua (Abdelshafie, 2023). La estrategia de "simulación primero" planteada responde a la brecha teoría-práctica también descrita en la literatura: los beneficios calculados deben someterse a validación en gemelos digitales y pruebas controladas antes del escalado (Mutschler et al., 2024).

Los modelos de cuellos de botellas y tránsito secuencial presentan sensibilidad a las perturbaciones y a las reglas locales, por lo que son necesarios escenarios con alta carga, variabilidad hidrológica y fallos de la infraestructura para desarrollo de curvas de respuesta y de umbrales operativos (Yang et al., 2023). Desde el punto de vista de las organizaciones, la propuesta del despliegue por fases y gestión del cambio está alineada con la evidencia sobre el enfoque gradual de las infraestructuras críticas: pilotos con criterios de salida, escalada con aprendizaje y métricas de las prestaciones, y finalmente integración total con evaluación y formación por roles (Miller & Hyodo, 2021).

La literatura también señala que la resistencia al cambio, y las habilidades que a menudo considerarían para el cambio pueden desdeñar los beneficios, por lo cual existen equipos de soporte interno y manuales de operación versionados (Chinnasami et al., 2024). Desde el punto de vista de estudios de puertos y de navegación interior, se entiende que los retornos se sostienen valiéndose idénticas capacidades logradas por la organización no solo en modelos.

Una parte de la evidencia que asocia la IA con mejoras energéticas y medioambientales en puertos puede ser transferida, pero es necesario traducir "energía por operación" a "agua por tránsito" y "energía por ciclo de esclusaje", pero también debe incluir restricciones ambientales explícitas (Rosadi & Franciscus, 2024; Durlík et al., 2024). La literatura reporta beneficios en torno a la programación y el consumo, pero es menos categórica en relación con métricas de resiliencia y seguridad; recomiendan incluir objetivos de sostenibilidad, de explicación en las funciones objetivo y ensayar en formato A/B operativo para calcular efectos netos e impactos

secundarios (Zhang & Ke, 2024; Filom et al., 2022; Abdelshafie, 2023).

Es congruente con el estado del arte, pero su cualidad necesitará de contexto y como el Canal integre sus restricciones hídricas y mantenga su andamiaje de datos y modere escalado con evidencia operacional.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizó el reto operativo que representa la congestión en el sistema de esclusas del Canal de Panamá, considerando simultáneamente los tiempos de espera y las restricciones crecientes sobre recursos críticos como el agua y la energía. A partir de una síntesis de literatura y de experiencias en operaciones análogas, se argumenta que la inteligencia artificial puede aportar valor cuando se emplea como un binomio integrado: modelos predictivos para anticipar arribos, picos de demanda y requerimientos operacionales, y métodos de optimización/meta-heurísticas para mejorar la secuenciación de tránsitos y la asignación de recursos bajo restricciones y objetivos múltiples. En conjunto, la evidencia revisada sugiere un potencial de mejora relevante en eficiencia operativa y sostenibilidad, siempre condicionado por la disponibilidad de datos confiables, la correcta representación de reglas locales y la integración con sistemas existentes.

Como principal resultado propositivo, el artículo plantea una hoja de ruta de implementación por fases basada en el principio de “simulación primero”, recomendando el uso de gemelos digitales y experimentación controlada antes de escalar a operación integral. Esta secuencia —pilotos controlados, extensión progresiva e integración institucional— permite reducir incertidumbre técnica, medir beneficios reales y establecer criterios de avance verificables mediante métricas alineadas a la operación: tiempos de espera, agua por tránsito, consumo energético por ciclo, capacidad efectiva y confiabilidad. Asimismo, se destaca que el desempeño esperado no depende únicamente del algoritmo seleccionado, sino del andamiaje socio-técnico que lo sostiene: gobernanza y linaje de datos, monitoreo de deriva, ciberseguridad TI/TO, capacitación por roles y gestión del cambio organizacional.

Se reconoce que la transferencia de resultados desde contextos portuarios y de vías interiores hacia una infraestructura interoceánica como el Canal exige cautela y validación empírica contextual. Por ello, la agenda futura debe priorizar: (i) formalizar el problema con funciones objetivo y restricciones hidráulicas/operativas propias del Canal; (ii) construir y calibrar un gemelo digital con escenarios de alta demanda y variabilidad hidrológica; y (iii) ejecutar pilotos con evaluación A/B, trazabilidad y auditoría de decisiones para cuantificar efectos netos y posibles impactos secundarios. En síntesis, la IA es una vía plausible para elevar eficiencia y sostenibilidad del sistema de esclusas, pero su éxito dependerá de una adopción gradual, medible y gobernada, coherente con el carácter crítico de la infraestructura y con las particularidades del contexto panameño.

6. Referencias

- Abdelshafie, A. (2023). Managing the complexity of empty container movements through repositioning strategies and routing practices under certain demand and supply [Doctoral dissertation, University of Maribor]. DKUM. <https://hdl.handle.net/20.500.12556/DKUM-83993>
- Ahmad, S., Priyadharshini, S. L., Hosen, M. S., & Ng, A. (2024). The impact of artificial intelligence on business and social values: Benefits, challenges, and future directions. *Educational Administration: Theory and Practice*, 30(6), 3174–3180. <https://doi.org/10.53555/kuey.v30i6.6012>
- Andrei, N., & Scarlat, C. (2024). Marine applications: The future of autonomous maritime transportation and logistics. En R. M. Abdalla (Ed.), *Revolutionizing earth observation: New technologies and insights*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004275>

- Balasubramani, K., & Natarajan, U. M. (2024). A fuzzy wavelet neural network (FWNN) and hybrid optimization machine learning technique for traffic flow prediction. *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 121–132. <https://doi.org/10.58496/BJML/2024/012>
- Bilican, M. S., Iris, Ç., & Karataş, M. (2024). A collaborative decision support framework for sustainable cargo composition in container shipping services. *Annals of Operations Research*, 342, 79–111. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05827-7>
- Castillo Salamín, J. A. (2025). Resiliencia logística panameña ante proteccionismo estadounidense: reconfiguración de rutas, desafíos para el canal y zona libre. *Revista FAECO Sapiens*, 9(1), 7–21. <https://doi.org/10.48204/j.faeco.v9n1.a9022>
- Chinnasami, S., Ramachandran, M., Saravanan, V., & Sharma, R. (2024). Space and underwater robots using the SPSS method. *Aeronautical and Aerospace Engineering*, 2(1), 16–25. <https://doi.org/10.46632/aae/2/1/3>
- Deng, Y., Sheng, D., & Liu, B. (2021). Managing ship lock congestion in an inland waterway: A bottleneck model with a service time window. *Transport Policy*, 112, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.08.017>
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., & Kostecki, T. (2024). Harnessing AI for sustainable shipping and green ports: Challenges and opportunities. *Applied Sciences*, 14(14), 5994. <https://doi.org/10.3390/app14145994>
- El Maliki, S., & Ben Abbou, W. (2024). Artificial intelligence integration in transportation marketing: A literature review. En *Proceedings of the 2024 IEEE 15th International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA61063.2024.10571540>
- Filom, S., Amiri, A. M., & Razavi, S. (2022). Applications of machine learning methods in port operations: A systematic literature review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 161, Article 102722. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102722>
- Golak, J. A. P., Defryn, C., & Grigoriev, A. (2022). Optimizing fuel consumption on inland waterway networks: Local search heuristic for lock scheduling. *Omega*, 109, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102580>
- Grancharova, V. (2022). Reflection of expanded Panama Canal to supply chains and port infrastructure in North America. *Pomorstvo*, 36(1), 85–94. <https://doi.org/10.31217/p.36.1.10>
- Guan, H., Xu, Y., Li, L., & Huang, X. (2021). Optimizing lock operations and ship arrivals through multiple locks on inland waterways. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, Article 6220559. <https://doi.org/10.1155/2021/6220559>
- Guo, X., Lang, X., Yuan, Y., Tong, L., Shen, B., Long, T., & Mao, W. (2024). Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives. *Ocean Engineering*, 310, 118638. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>
- Hammedi, W., Senouci, S. M., Brunet, P., & Ramirez-Martinez, M. (2022). Two-level optimization to reduce waiting time at locks in inland waterway transportation. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 13(6), Article 91. <https://doi.org/10.1145/3527822>
- Ji, B., Zhang, Z., Zhang, D., Yu, S. S., & van Woensel, T. (2022). The generalized serial-lock scheduling problem on inland waterway: A novel decomposition-based solution framework and efficient heuristic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 168, 102935. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102935>

- Khatua, S., Maity, S., De, D., Nielsen, I. E., & Maiti, M. (2024). IoT-ML-enabled multipath traveling purchaser problem using variable length genetic algorithm. *Annals of Operations Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06180-5>
- Kirilenko, A. A. (2024). Вебресурс для покращення комфортного перевезення пасажирів автобусного транспорту [Web resource to improve comfortable transportation of bus passengers]. KRS. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/3612>
- Liu, Q. (2023). Improved deep reinforcement learning for intelligent logistics supply chain transportation decision model. En *Proceedings of the 2023 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIICS59993.2023.10421169>
- Miller, K., & Hyodo, T. (2021). Impact of the Panama Canal expansion on Latin American and Caribbean ports: Difference-in-differences method. *Journal of Shipping and Trade*, 6, Article 8. <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00091-5>
- Mohamed, M. E., & Hassan, H. M. (2024). Empirical analysis of drivers' merging and diverging responses to autonomous truck platooning on freeway weaving segments. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 150(10), 04024065. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-8409>
- Mutschler, C., Münzenmayer, C., Uhlmann, N., & Martin, A. (Eds.). (2024). *Unlocking artificial intelligence: From theory to applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-64832-8>
- Oztanriseven, F., Nachtmann, H., & Moradpour, S. (2022). Economic impact of investment scenarios in the McClellan–Kerr Arkansas River Navigation System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 923. <https://doi.org/10.3390/jmse10070923>
- Rinaudo, C. H., Leonard, W. B., Morey, C., Hopson, J. E., Hilborn, R., & Coumbe, T. R. (2024). *Artificial intelligence (AI)-enabled wargaming agent training* (ERDC/ITL TR-24-5). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Information Technology Laboratory. <https://doi.org/10.21079/11681/48419>
- Rosadi, I., Franciscus, F., & Widanto, M. H. (2024). A machine learning-based method for predicting the classification of aircraft damage. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 10(1), 121–132. <https://doi.org/10.4108/eetiot.6936>
- Sardar, A. (2024). *Improving safety and efficiency in the maritime industry: A multi-disciplinary approach* [Doctoral thesis, University of Tasmania]. UTAS Research Repository (Figshare). https://figshare.utas.edu.au/articles/thesis/Improving_safety_and_efficiency_in_the_maritime_industry_a_multi-disciplinary_approach/26011102
- Sedaghat, A. (2024). Real-time vessel tracking and location prediction using AIS data: A case study of Gulf Intracoastal Waterway [Doctoral dissertation]. ProQuest. <https://search.proquest.com/openview/6e57f711cd17048cc7e31c5441b495d2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Segovia, P., Pesselse, M., Van den Boom, T. J. J., & Reppa, V. (2022). Scheduling inland waterway transport vessels and locks using a switching max-plus-linear systems approach. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 3, 748–762. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3218334>
- Shafik, W. (2024). Biosensor-based drones anomaly detection integration for sustainable agriculture development. En W. F. Abobatta & W. S. Hussain (Eds.), *Achieving food security through sustainable agriculture* (pp. 285–318). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-4240-4.ch012>
- Subhan, F. E., Yaqoob, A., Muntean, C. H., & Muntean, G.-M. (2024). A survey on artificial intelligence techniques for improved rich media content delivery in a 5G and beyond network slicing context. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(2), 1427–1487.

<https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3442149>

Waghmare, A. A., Ganesan, S., & Chen, J. (2024). Role of artificial intelligence in autonomous vehicles. *Preprint*.

<https://doi.org/10.20944/preprints202408.0974.v1>

Yang, X., Gu, W., & Wang, S. (2023). Optimal scheduling of vessels passing a waterway bottleneck. *Ocean & Coastal Management*, 244, 106809. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106809>

Zhang, H., & Ke, J. (2024). An intelligent scheduling system and hybrid optimization algorithm for ship locks of the Three Gorges Hub on the Yangtze River. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 110974. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110974>

Zhang, R., Zhao, C., & Pan, M. (2024). Efficient resource allocation for offshore intelligent navigational aids using deep reinforcement learning. En *Proceedings of the 34th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2024)*. International Society of Offshore and Polar Engineers. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE24/All-ISOPE24/ISOPE-I-24-036/546182>

Zhao, X., Liu, S., Gao, P., & Yu, H. (2022). Modelling an improved ship appointment system for lockage operations of waterway transport. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108638. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108638>

Financiación

El autor no recibió financiación para el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autoría

Conceptualización: Gabriel Montúfar Chiriboga

Curación de datos: Gabriel Montúfar Chiriboga

Análisis formal: Gabriel Montúfar Chiriboga

Investigación: Gabriel Montúfar Chiriboga

Metodología: Gabriel Montúfar Chiriboga

Gestión del proyecto: Gabriel Montúfar Chiriboga

Software: Gabriel Montúfar Chiriboga

Redacción - borrador original: Gabriel Montúfar Chiriboga

Redacción, revisión y edición: Gabriel Montúfar Chiriboga