

# Industria 4.0, aplicación y tecnologías de la información en instalaciones portuarias de América Latina.

## Industry 4.0, application and information technologies in port facilities in Latin America.

María Isabel Guerrero-Molina<sup>1</sup>, Yasmín Alexandra Vásquez-Suárez<sup>2</sup>, Diana Mercedes Valdés-Mosquera<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Católica Luis Amigó, Medellín - Colombia

<sup>3</sup>Politécnico Grancolombiano, Medellín - Colombia

ORCID: [10000-0002-8792-0832](https://orcid.org/0000-0002-8792-0832), [20000-0001-6926-5283](https://orcid.org/0000-0001-6926-5283), [30000-0002-6020-6305](https://orcid.org/0000-0002-6020-6305)

Recibido: 18 de agosto de 2023.

Aceptado: 05 de diciembre de 2023.

Publicado: 01 de enero de 2024.

**Resumen-** El artículo indaga la aplicación de la Industria 4.0, y tecnologías de la información en las instalaciones portuarias en América Latina. Se desarrolló un estudio mixto, seleccionando los puertos de Colón, Santos y Cartagena, empresas productoras, empresas de transporte internacional y agencias de aduana; luego se realizó una revisión de literatura incluyendo técnicas bibliométricas, se utilizó la base de datos Scopus, se analizan 5 variables: procesos de monitoreo, equipos y maquinaria, integración de sistemas, robótica y otras tecnologías y por medio de un instrumento semiestructurado aplicado a los representantes de las empresas, quienes son los que comprenden la realidad de las operaciones del comercio internacional en los puertos antes mencionados. Así, las tendencias que marcan futuros estudios en el área portuaria son: Nuevas aplicaciones de las industrias 4.0 en la operación portuaria, la sostenibilidad portuaria a partir del uso de nuevas tecnologías, la implementación de energías renovables en los puertos, fuentes de financiación para la digitalización portuaria.

**Palabras clave:** américa latina, comercio internacional, instalación portuaria, ingeniería portuaria y costera, puerto, tecnología de la información.

**Abstract—** The article investigates the application of Industry 4.0 and information technologies in port facilities in Latin America. A mixed study was developed, selecting the ports of Colon, Santos and Cartagena, producing companies, international transport companies and customs agencies; then a literature review was conducted including bibliometric techniques, through the Scopus database, 5 variables are analyzed: monitoring processes, equipment and machinery, systems integration, robotics and other technologies and through a semi-structured instrument applied to the representatives of the companies, who are those who understand the reality of international trade operations in the ports mentioned above. Thus, the trends that mark future studies in the port area are: New applications of industries 4.0 in port operations, port sustainability from the use of new technologies, implementation of renewable energies in ports, sources of funding for port digitalization.

**Keywords:** latin america, international trade, harbors, port and coastal engineering, port, information technology.

\*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [maria.guerreroool@amigo.edu.co](mailto:maria.guerreroool@amigo.edu.co) (María Isabel Guerrero Molina).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: M. I. Guerrero-Molina, Y. A. Vásquez-Suárez y D. M. Valdés-Mosquera, "Industria 4.0, aplicación y tecnologías de la información en instalaciones portuarias de América Latina", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 1, pp. 230-243 2024, doi: [10.15649/2346030X.3468](https://doi.org/10.15649/2346030X.3468)

## I. INTRODUCCIÓN

El internet de las cosas (IoT) ha sido considerado como una revolución tecnológica en diferentes sectores, en la puesta en marcha de los puertos inteligentes, vinculando sensores y optimizando la operación de manera automática [1], sin embargo, la integración de las operaciones permite una optimización logística en la operación. [2] El impacto de la IoT en el rendimiento en las operaciones portuarias, pueden determinar cambios significativos que permitan ser más eficientes y competitivos [3]. Asimismo, esta tecnología ha permitido gestionar los residuos oleosos generados por los buques, mitigar el alto impacto ambiental, llevando a las autoridades portuarias a pensar en tecnologías emergentes para agregar valor a los sistemas existentes [4], esto ha permitido desarrollar la transformación digital de las empresas portuarias, con un enfoque específico orientado al mejoramiento de las operaciones, diseño de innovación tecnológica y resiliencia operativa en el campo marítimo [5].

La revolución tecnológica, se ha implementado bajo la denominación de la industria 4.0, vinculando sistemas de logística portuaria existentes y mejorando los sistemas que son inconsistentes, antiguos e ineficaces y restringen las operaciones efectivas de la logística portuaria. [6].

La digitalización de los puertos ha dado lugar a una nueva era de puertos inteligentes que aprovechan la tecnología para mejorar su eficiencia y productividad. Los puertos inteligentes, ofrecen beneficios, como mayor eficiencia, mejora de la seguridad, mayor sostenibilidad, mejora de la calidad de los servicios y el flujo de tráfico es eficaz [7]. Estos beneficios se logran mediante el uso de tecnologías y dispositivos avanzadas como la IA, el IoT, la robótica, la automatización de un sistema portuario inteligente, además de permitir incluir la seguridad de toda la operación por medio de sistemas dinámicos de monitoreo y antirobo [8].

Pero, pese a la relevancia de la temática, se requiere aún de exploración, ya que se ha investigado el impacto de las tecnologías en el rendimiento de los puertos marítimos e incluir diferentes aplicaciones para determinar los cambios necesarios [3]. En este sentido, este estudio pretende indagar la aplicación de la Industria 4.0, y tecnologías de la información en las instalaciones portuarias en los puertos de Colón, Santos y Cartagena, ubicados en Latinoamérica, específicamente se abordan los siguientes interrogantes en relación con la automatización de los puertos ¿cuál es el impacto de la Industria 4.0 y su aplicabilidad en la logística operativa de los principales puertos de Latinoamérica? y ¿cómo se pueden establecer estrategias de competitividad para mejorar la gestión de los procesos operativos en estos puertos?.

De acuerdo con la revisión de literatura realizada, no se evidenciaron publicaciones que aborden y respondan estos cuestionamientos. Para dar respuesta al vacío de investigación detectado se realizó inicialmente una revisión de literatura, teniendo en cuenta la base de datos de Scopus, aplicando la herramienta R, posteriormente se contrastó la información hallada en la base de datos, con los representantes de los puertos de Colón, Santos y Cartagena, empresa productora, empresa de transporte internacional y agencia de aduana.

El documento está compuesto de tres partes: se inicia con el marco teórico y conceptual, allí se describe la problemática estudiada, luego se presenta la metodología, en la cual se detallan los procesos realizados para obtener los resultados, se continúa con la discusión y finalmente se presentan las conclusiones y las recomendaciones de las tendencias investigativas que pueden ser insumo para investigaciones futuras.

## II. MARCO TEÓRICO

En los años 70, los puertos en Latinoamérica empezaron la adopción de mejoras en los procesos de carga, como la introducción de modalidades de carga contenerizada, grandes buques petroleros y grandes naves portacontenedores. A partir de ello, han logrado una transformación y protección de la infraestructura en las instalaciones portuarias, con sistemas de seguridad para monitorear las áreas superficiales y submarinas [9].

Posterior a ello, se observó que la calidad de los servicios portuarios ofrecidos en Latinoamérica, no cumplían con los estándares, características y regulaciones internacionales respecto a los puertos ubicados en los Estados Unidos y en Europa. [9], [10]. Los puertos estaban bajo la regulación estatal, encargada de la gestión administrativa, las operaciones y los aspectos relacionados con el mantenimiento de las instalaciones portuarias, la aplicación de tarifas y gravámenes a los usuarios; por supuesto, esto implicaba que el presupuesto disponible dependía de las contribuciones y decisiones del gobierno y de empresas privadas vinculadas dentro de la operación portuaria, pero esto disminuyó la inversión de capital y aumentó las tarifas portuarias. [11] La inclusión de estas tecnologías en el puerto, pretendían mejorar la calidad del tráfico de carga y hacer que los puertos sean más eficientes y seguros, esta temática ha tomado fuerza en la última década, gracias a los desarrollos tecnológicos, la transformación digital y alineación con las prácticas de la Industria 4.0 [12].

En la última década se iniciaron varios estudios proponiendo innovaciones en el sector portuario, que han permitieron avances en el desarrollo de la industria como la optimización de los procesos de importación y exportación, el sistema de gestión dinámica o de monitoreo y despacho basado en la IoT [13]-[15] todo ello aplicado a la optimización de las operaciones en los puertos. Hoy, las innovaciones tecnológicas pueden desempeñar un papel crucial para contrarrestar los eventos impredecibles del pasado y respaldar la transición hacia una economía sostenible. La industria 4.0, es una nueva forma de industrialización que se caracteriza por la interconexión de los sistemas operativos de fabricación, los procesos productivos y las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) basadas en el Internet de las cosas (IoT) [16].

[17] afirman que existe una interconexión y una integración automatizada de la industria 4.0 dentro de la cadena de suministro, para construir un modelo de negocio que contemple más elementos tecnológicos que permitan administrar la información en tiempo real, por lo que además de la tecnología, es necesario comprender la legislación y los requisitos para evaluar las inversiones y el riesgo empresarial que conlleva.

Alemania fue el primer país en plantear un concepto relacionado con las industrias 4.0- industrie 4.0, el término fue utilizado como visión estratégica del gobierno alemán para ubicar al país como proveedor líder a nivel mundial de soluciones avanzadas de fabricación; en este sentido, Acatech [18] argumenta que si bien las primeras revoluciones surgieron como resultado de la mecanización (Revolución 1,0), la electricidad (Revolución 2.0) y la informática (revolución 3,0), en la actualidad la introducción del Internet de las Cosas - IoT y los servicios en el entorno manufacturero evidenciaron el comienzo de la revolución industrial 4.0 que hace referencia a la forma como las empresas establecen sistemas globales denominados Sistemas Ciber Físicos - CPS, que involucran máquinas y sistemas de aprendizaje autónomo e inteligentes capaces de

intercambiar información y autorregularse, estableciendo mejoras significativas en los procesos industriales y de manera especial en la cadena de suministro.

En años posteriores, diversos autores conceptualizan el término Industria 4.0, por ejemplo, Ning and Liu [19] parten de la elaboración del marco tecnológico y teórico del IoT como ciencias aplicadas emergentes asociada a la industria tecnológica; ellos sostienen que el concepto se caracteriza por una percepción integral, una transmisión confiable y un procesamiento inteligente para lograr la convergencia perfecta de los espacios ciberfísicos. En este orden de ideas, la industria 4.0 se asocia con la digitalización que se espera que logren las cadenas de valor con la utilización de tecnologías cuyos efectos transformadores incluyen convergencia, contenido, colección, informática, comunicación y conectividad.

[20] argumenta que la industria 4.0 combina tecnologías emergentes que impactan a todas las industrias del mundo gracias a la velocidad, el alcance y la interconexión de las personas mediante los dispositivos móviles; dificultando la diferenciación entre el ecosistema físico y el digital y poniendo en evidencia la necesidad de nuevas formas de producción, gobernanza y gestión.

De acuerdo con [21] la Industria 4.0 permite el desarrollo de “smart factories” o fábricas inteligentes, en donde los Sistemas Ciber Físicos-CPS vigilan los entornos físicos y crean un gemelo virtual del mismo que facilita la toma de decisiones y la disminución de los errores a partir de la simulación de posibles sucesos y la cooperación entre los Sistemas Ciber Físicos entre sí y con los humanos con la mediación del Internet de servicios - IoS. Esta visión de la Industria 4.0 vislumbra las ventajas de la interconexión e intercomunicación del mundo físico y su copia virtual.

Entonces, se evidencia que los diferentes autores coinciden al reconocer que la industria 4.0 se caracteriza por la generación de Sistemas Ciber Físicos y contempla la introducción al ambiente de la manufactura de tecnologías digitales que si bien algunas de ellas ya se utilizaban de manera aislada, ahora se interconectan e integran para lograr procesos productivos automatizados y optimizados; además, coinciden en enfatizar que aunque hay unas tecnologías emergentes asociadas a la industria 4.0; hay unas que se constituyen como pilares debido a sus características de escalabilidad análisis de datos, acceso global de los servicios de internet, procesamiento y creación de nuevos productos o modelos de negocios y procesos, estas son el Internet de las Cosas, el big data, la computación en la nube y la analítica avanzada. [22].

Por otra parte, los puertos son aquellas zonas de tierra y agua dotadas de equipos, infraestructuras y obras que permiten la recepción, cargue y descargue de buques, el almacenamiento, la recepción y entrega de mercancías [23], así como el embarque y desembarque de pasajeros; en esta definición se aborda la importancia de la dotación de los puertos con diferentes tipos de infraestructura y superestructura para prestar servicio a la carga pero además se menciona la importancia de las infraestructuras marítimas y terrestres de acceso al puerto; en este sentido, se refuerza la idea de que los puertos en la actualidad no solo son plataformas en donde se llevan a cabo operaciones logísticas tradicionales de carga y descarga de mercancía, de embarque y desembarque de pasajeros, de consolidación y desconsolidación de la carga, sino que se han convertido en plataformas intermodales de verdadero valor añadido que conectan las redes de transporte interno de los países con el transporte internacional; con demandas de rapidez, confiabilidad e integralidad en la trazabilidad de la carga desde el inicio de la cadena de suministro hasta el fin de la misma [24].

Los crecientes volúmenes de mercancías que se transportan por modo marítimo, las dimensiones de los buques cada vez más grandes y el creciente comercio transfronterizo demandan que las operaciones en los puertos sean más eficientes y cuenten con desempeños notables para responder a las exigencias de las industrias y ser competitivos, la eficiencia en las operaciones marca la competitividad de los puertos [25] [26] [27], consideran que para que un puerto sea competitivo debe ser primero eficiente, y luego contar con otras bondades como tener frecuencia en los embarques, una infraestructura adecuada, localización estratégica, tarifas, velocidad de respuesta a los usuarios y buena reputación frente al manejo de las cargas. En este sentido, es válido afirmar que no existen modelos estándares para medir esa eficiencia, sino que los indicadores utilizados por las terminales portuarias dependen de las particularidades y necesidades según sus operaciones; pero, al analizar la eficiencia portuaria, la literatura presenta indicadores, como la capacidad de almacenamiento disponible en toneladas métricas, la profundidad del calado de las terminales en sus muelles, la capacidad de transferencia de carga determinada por los tiempos de espera de carga de un buque en la terminal [28].

Los puertos marítimos, los aeropuertos y las plataformas multimodales son claves en el desarrollo del comercio internacional de los países y por ende de la economía, por esta razón se requiere de políticas realmente focalizadas en la mejora de su desempeño, en la inversión en infraestructura, en la adopción de tecnologías digitales, en las aduanas, en la competencia logística, en el seguimiento y localización de mercancías y en el cambio hacia energías y sistemas limpios y sostenibles; de acuerdo The World Bank [29] con las reformas en los países con los sistemas portuarios con deficiencias en su productividad son necesarias, y estas deben combinar la participación del sector privado en las operaciones de las terminales con la implementación de sistemas portuarios electrónicos, la modernización de las aduanas y agencias transfronterizas con un enfoque de automatización, la gestión del riesgo y la integralidad; en este orden de ideas, la digitalización de las cadenas de suministro, sobre todo en los países emergentes está siendo fundamental para reducir las demoras y aumentar la eficiencia portuaria, las economías emergentes con mejores índices de eficiencia y desempeño logístico han implementado verdaderas soluciones de seguimiento y rastreo de la mercancía.

La modernización de los puertos del mundo ha implicado la incorporación de Sistemas Inteligentes de Transporte - ITS que se caracterizan por combinar y coordinar distintas tecnologías para el control, análisis, e implementación de la información, de tal manera que se evidencia eficiencia en diferentes aspectos relacionados con la seguridad y la sostenibilidad dentro de la operación de la cadena logística; tecnologías emergentes asociadas a la industria 4.0 como los sellos electrónicos, los sensores de temperatura, de humedad y de vibración, los sistemas de identificación electrónica y automática, los sistemas para la gestión del tránsito, las estaciones para la medición de las condiciones meteorológicas, los mecanismos de pesaje en movimiento, el manifiesto y pago electrónico, los equipos guiados automáticamente, sistemas de procesamientos de imagen, sistemas de operación de terminales, sistemas de comunidad portuaria y sistemas de transmisión de data electrónica, se han venido implementando para satisfacer necesidades relacionadas con la trazabilidad y seguridad de la carga y la mejora de la eficiencia en la operación de las terminales portuarias y de los puertos en general [24].

En América Latina, han surgido varias iniciativas relacionadas con la industria 4.0, la cual está orientada a mejorar la transformación en la organización y la gestión de la producción dentro de toda la cadena logística [30] ha sido aplicada en la gestión portuaria la industria 4.0. El impacto ha sido positivo y se han implementado paulatinamente tecnologías emergentes de la información y la comunicación en cada proceso, para que se ofrezcan soluciones innovadoras para las necesidades dentro de la operación logística y portuaria y así se beneficie e incrementen los resultados dentro de la cadena de suministro [31], aunque [32] afirman que, desde la postura militar, aún hay una brecha digital en el desarrollo de las aplicaciones tecnológicas para implementarlas dentro de los puertos.

[33] por su parte, afirman que las empresas en Latinoamérica que han implementado las tecnologías de la Industria 4.0 como la IoT, realidad aumentada, conexión en tiempo real, minería de datos, Big Data, entre otros, dentro de sus procesos productivos han podido obtener flexibilidad, mejorar la calidad de sus productos o servicios, han mejorado la ventaja competitiva y el costo beneficio de los productos ofertados.

### III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

La investigación aplicada fue mixta, para indagar la aplicación de la Industria 4.0, y tecnologías de la información en las instalaciones portuarias de los puertos de Colón, Santos y Cartagena, ubicados en Latinoamérica, para lograrlo, se realizó un proceso con tres etapas.

Etapas 1. En primer lugar, se realizó una revisión de las variables asociadas a la Industria 4.0 propuestas por [34], [35] y la cadena de transporte propuesta por [36], con el fin de comprender el impacto y la aplicabilidad en la construcción y apropiación de los procesos logísticos en las terminales automatizadas y fueron aplicadas a los puertos marítimos de Colón, Panamá; Santos, Brasil y Cartagena, Colombia (Figura 1). Posteriormente, en la Etapa 2., se determinó el grado de adopción de estas tecnologías en las operaciones logísticas de los puertos estudiados y se evaluó el impacto en la competitividad de los mismos (Figura 3), y en las empresas: de transporte, productora y agencia de aduana (Tabla 3) cada representante tanto en puertos como en las empresas, evaluó con una calificación cuantitativa entre 0 y 5, siendo este último valor el más alto en la utilización de las diferentes tecnologías dentro del puerto. En la última etapa se analizan las estrategias de competitividad para la incorporación efectiva de estas tecnologías en los puertos analizados.

En la primera etapa, se hizo una búsqueda de información en la base de datos Scopus utilizando términos clave como "Smart Ports", "Internet of Things", "big data", "logística" y "seaport competitiveness". En un periodo comprendido entre 2018 y 2023, utilizando la base de datos de Scopus. Para ello, se realizó un análisis bibliométrico y así extraer la información más relevante para el estudio, utilizando el software R [37], se presenta la relación entre los términos portuarios y así definir las variables de estudio.

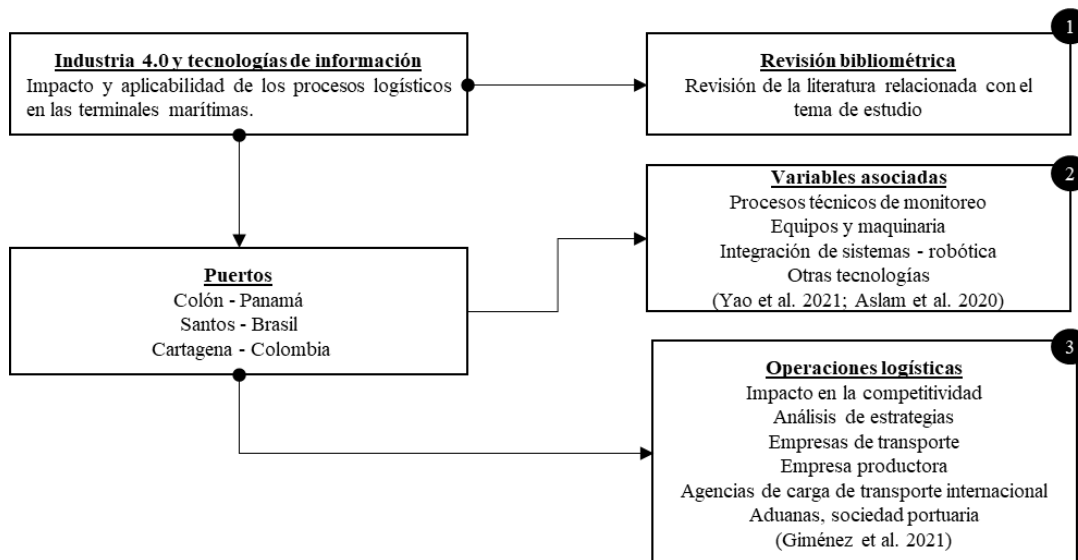


Figura 1: Método de investigación.  
Fuente: Elabación propia.

En la segunda fase, se analizan las variables asociadas a la temática de estudio, los datos primarios se contrastan con las respuestas de los representantes de diversas partes interesadas como: agencias de carga internacional, empresas productoras y empresa de transporte internacional. Estas entrevistas permitieron contrastar la información recopilada en la base de datos Scopus con la realidad operativa de los puertos estudiados. Es importante destacar que, debido a las operaciones en varios puertos del país y América Latina, algunos actores clave podrían influir en otros actores, como las navieras.

Se elaboró un cuestionario semiestructurado con preguntas orientadoras hacia la aplicación de las diferentes tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en los puertos cuyas terminales están dotadas de tecnología para llevar a cabo las operaciones, aumentado así su eficiencia. En la tercera fase, con la información recopilada se presenta la operación portuaria, analizando los puertos de Colón, Santos y Cartagena y los diferentes actores que intervienen dentro de la cadena de abastecimiento.

#### IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En la primera fase se analizaron los términos clave del estudio, la búsqueda de información se realizó con: "Smart Ports", "Internet of Things", "big data", "logistics" y "seaport competitiveness", en un periodo de tiempo entre 2018 y 2023. Después, se realizó un análisis bibliométrico para extraer la información relevante, con la data obtenida se determinó que los términos más relevantes corresponden primero a la integración de los sistemas (11,4%), seguido de la robótica (10,3%), pero la frecuencia de uso más alta de la data corresponde a los equipos, tecnologías y maquinarias vinculados en la operación marítima con 630 reportes. En la tabla 1. Se presentan las cinco variables de estudio.

Tabla 1: Variables de estudio.

Ranking	Clúster	Impacto	Densidad	Frecuencia
1	Integración de sistemas	11,4	112,9	270
2	Robótica	10,3	70,9	281
3	Equipos y maquinaria	8,1	52,8	630
4	Procesos técnicos de monitoreo	10,3	48,9	448
5	Otras tecnologías	0	38,9	6

Fuente: Elaboración propia bajo resultados de búsqueda de Scopus.

Posterior a ello, se contrastaron los resultados de la primera fase con los representantes de los puertos de Colón, Puerto de Santos y Puerto de Cartagena. Se realizaron entrevistas semiestructuradas utilizando un instrumento que permitió obtener información relevante para el estudio, El diseño del instrumento, fue basado en los resultados de las variables de estudio presentadas en la Tabla 1, y se establecieron cinco aspectos, como los elementos más representativos: procesos técnicos, equipos y maquinaria, integración de sistemas, integración robótica y otras tecnologías como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Temáticas del instrumento de recolección.

Equipos y maquinaria	Integración de sistemas	Procesos técnicos de monitoreo	Integración de sistemas - robótica	Otras tecnologías
Inteligencia artificial - IA	Drones y aparatos no tripulados	Reconocimiento de buques	Optimización de rutas	Uso de la Nube
Internet de las cosas - IoT	Sistemas de seguridad automatizados - ciberseguridad	Reconocimiento de contenedores	Seguimiento de carga	Blockchain
Internet de los barcos - IoS	Realidad aumentada	Sistemas de localización satelital	Operaciones en puerto	
Acceso de información en tiempo real en cada área del puerto	Simulaciones	Monitoreo ambiental	Gemelo digital de puerto	
Grúas pórtico con sistemas de reconocimiento de contenedores	Robótica			
Programas en la nube				

Fuente: Elaboración propia.

El diseño del instrumento permitió tener acceso a la historia del puerto, nacimiento como terminal portuaria y evolución en términos de movimiento de carga; ventajas competitivas y desventajas del puerto analizado frente a las operaciones portuarias de los demás puertos de América latina frente a la operación de cargue, descargue y almacenamiento; uso y aplicación de las tecnologías en la operación portuaria, procesos técnicos de monitoreo, equipos y maquinaria, integración de sistemas robóticos, camiones autónomos, drones no tripulados, grúas pórtico inteligentes, monitores de reconocimiento de buques y contenedores, prevención de colisiones y rastreo de contenedores en la distribución física y en la operación de cargue, descargue y almacenamiento y uso de otras tecnologías que permitan la automatización de los procesos del puerto.

En los Procesos técnicos de monitoreo PTM, se determina la implementación de un monitoreo oportuno y de alta calidad para garantizar la eficiencia del funcionamiento técnico de las máquinas [38], además de incluir los recursos y mejorar la eficiencia inteligente de operación y mantenimiento de los sistemas y equipos marinos [39], respecto a los equipos y maquinarias en los puertos, La integración de IoT y AI ha ganado una atención significativa como un medio emergente para digitalizar las industrias manufactureras e impulsar la sostenibilidad en el contexto de la Industria 4.0. En los últimos tiempos, se ha producido una fusión de tecnologías de IA e IoT para formar una infraestructura de "Inteligencia Artificial de las Cosas" (AIoT) [40]. Esta integración tiene como objetivo mejorar diversos aspectos, como las interacciones hombre-máquina, las operaciones en el campo de IoT, el análisis de big data y más [41]. Además, se vinculan otras tecnologías, producidas directamente por las empresas, así implementan soluciones digitales para mejorar la productividad y la eficiencia de sus procesos [42].

En la investigación participó una empresa de transporte internacional, una empresa de aduana y una empresa productora, que son factor clave dentro de la operación y la competitividad en el comercio exterior, los procesos elegidos para ser estudiados, se incorporaron elementos de innovación ya sea en el transporte de mercancías o en la operación de los puertos que permitan ser competitivos, además de la vinculación de una agencia de carga de transporte internacional, otra de servicios aduaneros las cuales también aportan en gran medida en la competitividad en el sector industrial.

La utilización de la IA dentro de la operación puede ser útil para optimizar sus procesos de distribución y transporte, esto puede llevar a una mayor eficiencia y rentabilidad. [43] La IA puede ser útil para analizar todas las variables presentadas y organizar todo de una manera mucho más efectiva, los puertos marítimos están presionados a transformar cómo operan para manejar los flujos de tráfico [7]. Los Agentes del ecosistema portuario deben realizar estos análisis, pero a veces la logística no es perfecta y surgen imprevistos que dificultan la operación. En este sentido, la IA puede considerar todos los elementos pertinentes y seguir la operación completa.

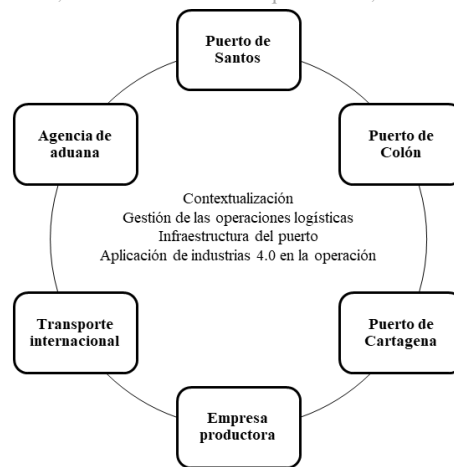


Figura 2: Agentes del ecosistema portuario.  
Fuente: Elaboración propia.

### Puerto de Colón - Panamá

El puerto de Colón del Grupo Evergreen, es una empresa de transporte marítimo a nivel mundial, inició operaciones en 1997, cuenta con una terminal de contenedores y por su ubicación geográfica, cuenta con una ventaja competitiva en términos marítimos y logísticos, además de los servicios logísticos y marítimos que se realizan por medio de la conectividad interna del puerto, el cual permite manejar de manera más eficiente y eficaz los contenedores, la carga líquida, granel y de mercancías [44]. A su vez, las diferentes inversiones extranjeras directas e indirectas, comercio y turismo en evolución y demanda constante en sus puertos, han consolidado al país como punto estratégico para la entrega y salida de mercancías para Asia, Europa, Norte y Sur América.

Los puertos de una región son nodos esenciales en el comercio marítimo mundial [45], esto permite que cada región tenga un crecimiento y un desarrollo oportuno por tal razón existen indicadores que sirven para lograr establecer estrategias que ayuden a un mejoramiento continuo de los procesos portuarios como lo son por ejemplo aspectos económicos, políticos, calidad de la infraestructura portuaria, logística, conectividad de carga y movilización de cargas con Twenty foot Equivalent Unit - TEUS [46]. Para la última década la demanda de las economías emergentes y la ampliación del canal de Panamá han sido un factor de impacto en los puertos de Latinoamérica, como lo es Puerto Colón, donde se ha venido manejando un alto flujo de contenedores con una capacidad de infraestructura física y logística que demuestran la eficiencia del puerto. Entendiendo que la gran mayoría de mercancía es transportada por mar se debe conocer los principales aspectos que dan claridad sobre la eficiencia y eficacia de un puerto buscando siempre optimizar recursos y bajar costos logísticos como lo es el caso de Puerto Colón en Panamá. (Ibarra Wilfredo A, 2021)

Para mostrar el comportamiento logístico en recibo y despacho de cargas, almacenamiento, transbordos, movilización y apoyos de naves en los puertos. [34] afirma que la propuesta del puerto inteligente también plantea nuevos requisitos para el futuro desarrollo como un instrumento bajo características claves sobre el funcionamiento portuario en América Latina, el cual ha sido una herramienta clave para la propuesta de estrategias y planes de mejoramiento continuos para la logística portuaria.

Puerto de Colón en Panamá cuenta con una terminal contenedorizadora con capacidad de operación en manejos de TEUS de 2.4 millones, con una carga sobresaliente de contenedores de 134.418, y en descargue 137.882, transbordos de contenedores cargados de 97.494 y transbordos de contenedores descargados de 101.845, en articulación con el monitoreo, control y planificación en los patios de contenedores, manejo de refrigerados y con las naves cargue y descargue de contenedores, manejo de atraque de mercancías y seguimiento constante al tema de combustibles y agua potable. [44]. El puerto de Colón junto con el Puerto de San Cristóbal, ambos ubicados en Panamá, suman un flujo de TEUS de 3,891,209, demostrando con esto un puerto con mayor eficiencia y competitividad frente a los demás, gracias a su capacidad de cargue y manejo de contenedores esto refleja que hay inversiones constantes en infraestructura y tecnología haciéndolos más interesantes para las líneas navieras en manejo de cargas.

A medida que los puertos obtengan infraestructuras modernas como por ejemplo en tecnología, serán más competitivos en el mercado, satisfaciendo la demanda del mercado, tal es así que el análisis que se hizo para 7 terminales portuarias de la región en relación con su capacidad de almacenamiento, transbordos, eficiencia portuaria, Puerto Colón lideró este hallazgo gracias a 13 muelles, 45 equipos de grúas pórticos, sitios de almacenamiento y uniones de ferrocarril. Entre el número de muelles y equipos que solventan el movimiento de mercancías, se llega a una capacidad óptima para el manejo de carga y descarga de mercancías, logrando un equilibrio entre infraestructura y tecnología portuaria. (Rudy, 2018). La industria 4.0, ha vinculado una serie de herramientas digitales, que han sido aplicadas a los procesos industriales [47], como por ejemplo la digitalización, interacción de la IA, implementación de diferentes tecnologías, optimización de recursos, encaminada en la creación de efectivas metodologías comerciales [48]; esto precisamente es el camino a seguir de las organizaciones y los diferentes aliados estratégicos del comercio exterior tales como empresas productoras, agencias de carga internacional, agencias de aduana y operadores logísticos de puertos, los cuales son precisamente los protagonistas de la operación logística en los puertos, para precisar en este aparte el puerto de Colón en Panamá.

Cabe resaltar algunas herramientas de la industria 4.0 que utilizan algunas compañías del sector externo, que les ayudan a ser más eficientes en cada puerto, además de convertirse en centro de transporte marítimo y recientemente [49] un ejemplo, es el puerto de Colón, las empresas productoras en el proceso logístico, de almacenamiento manejan la herramienta Sistemas de Análisis en la Programación - SAP, se convierte en la base para hacer las operaciones, tanto de ingreso como de salida, el tema de facturación, todo se controla bajo la herramienta digital, adicional a eso, permite verificar el ingreso con tiquetes y otros.

En la figura 3, se presenta la calificación cuantitativa realizada a cada puerto estudiado, la evaluación la realizó directamente cada participante en el estudio.

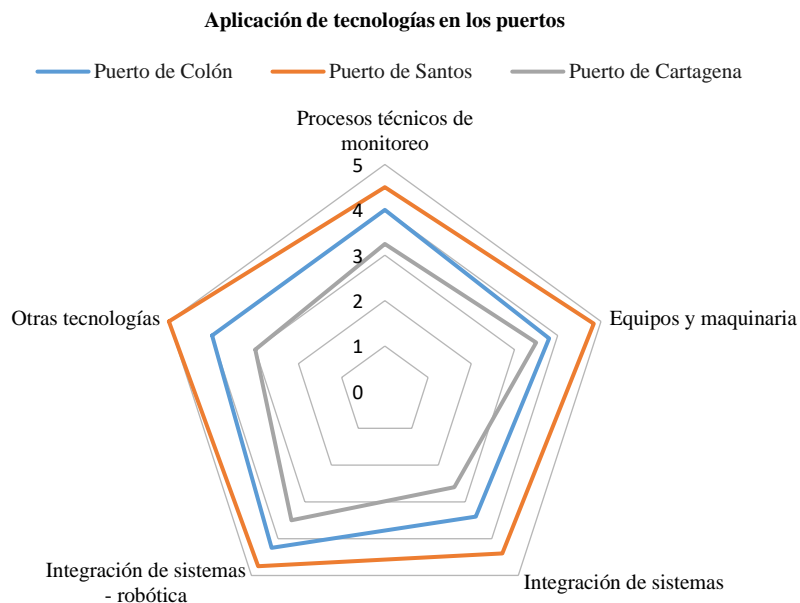


Figura 3: Aplicación de tecnologías en los puertos.  
Fuente: Elaboración propia.

### Puerto de Santos- Brasil

El Puerto de Santos es una terminal multipropósito, ubicado en Sao Paulo, en los límites de las ciudades de Guarujá y Santos en Brasil a 70 km de la capital del país Brasilia, su canal de navegación lo constituyen las islas de Sao Vicente y Santo Amaro; inició operaciones en el siglo XVI como un puerto del estado con almacenes simples, operaciones rudimentarias y pocas rutas de acceso; luego hacia el siglo XVIII, debido a la evolución de la producción azucarera en la región y el aumento de las exportaciones de café, se construyó la primera carretera pavimentada y el ferrocarril para mayor facilidad de acceso al puerto y disminuir los tiempos de conectividad.

En 1890 las necesidades de expansión y de desarrollo de estructuras portuarias obligaron a que el gobierno de Brasil abriera la administración portuaria al capital privado, otorgándole la primera concesión por un periodo de 90 años a la empresa Companhia Docas de Santos- CDS, con unos compromisos de inversión que incluían la construcción de los primeros 260 metros del muelle que permitió a Santos convertirse en el primer puerto organizado del país. En 1980 finalizó el periodo de la concesión y la administración del puerto volvió al estado a través de la empresa Companhia Docas do Estado de Sao Paulo- Codesp, que luego tomó el nombre de Autoridad Portuaria de Santos- SPA; la SPA es una empresa pública de capital privado, en proceso de privatización desde 2019, vinculada al Ministerio de Infraestructura.

El comercio internacional, ha evolucionado y con ello, los avances legislativos en materia de puertos se empezaron a vislumbrar alrededor del mundo, impulsaron una serie de reformas en Brasil en materia portuaria; en 1993 el congreso nacional promulgó la Ley 8630 donde se establecen las medidas para la exploración de los puertos organizados y de las instalaciones portuarias, fue la primera ley de puertos y de modernización portuaria que tuvo el país, con esta, luego de 20 años de administración del puerto por parte el gobierno, se abrió la posibilidad a que organizaciones privadas solas o en grupos de asociados pudieran participar de las licitaciones para la exploración del puerto y realizar operaciones de carga comprometiendo inversiones públicas enfocadas en infraestructura portuaria, dragado del canal de navegación y capacitación, así, las instalaciones portuarias podrían ser exploradas para uso público, privado, exclusivo para el movimiento de carga propia, mixto para movimiento de cargas propias y de terceros, para turismo o movimiento de pasajeros y para transbordo de carga [51] [52].

Posterior a la ley de puertos Ley 8630 de 1993 se establecieron otras disposiciones adicionales en materia portuaria; ésta se deroga y se promulgó la Ley 12.815 Ley de Puertos, que permite la exploración de los puertos, en operación y de infraestructura ya sea directa o indirecta. Por parte de las uniones, las actividades desempeñadas por los operadores portuarios, la instalación de Terminales de Uso Privado – TUPs y dictaminó que ya no sería la Autoridad Portuaria de Sao Paulo- SPA la encargada del proceso de planificación y licitación de los arrendamientos portuarios sino que este procedimiento quería a cargo del gobierno central en Brasilia [53]; aunque la gestión y supervisión de las instalaciones portuarias y de las infraestructuras públicas el interior del puerto, la precalificación de los operadores portuarios, el cobro de los valores de las tarifas portuarias, la fiscalización de las operaciones portuarias de atraque, desatraque, fondeo y tráfico, el establecimiento del calado máximo y las dimensiones máximas de los buques que pueden navegar por el puerto, son funciones que siguen a cargo de la SPA [54].

Actualmente, el Puerto de Santos es uno de los principales centros de comercio internacional de América Latina, conecta a más de 600 destinos y mueve cargas de casi todos los países del mundo; es el responsable del 25% del comercio exterior de Brasil, a través del puerto se mueven cargas de exportación como soja, azúcar, carne bovina, café, aceite crudo, algodón, residuos de aceite de soja, maíz, aleaciones y de hierro y celulosa; y cargas de importación como fungicidas y herbicidas, partes de automóviles, aceites de petróleo, medicamentos, fertilizantes, partes de motores, transmisores de vehículos y compuestos orgánicos e inorgánicos. De acuerdo con Barleta and Sánchez [55] es el segundo puerto de la región después del Puerto de Colón en Panamá en rendimiento determinado por el número de contenedores movilizados, y es el puerto número 41 del mundo en el Ranking de los 100 puertos de contenedores más grandes del mundo por Lloyd’s List; en 2021 el puerto

movilizó cerca de 4,8 millones de TEU, es decir un aumento del 14,2% en comparación con el número de unidades movilizadas en 2021 que fueron 4,2 millones de TEU [56]. En el año 2021 arribaron 4.904 barcos al puerto.

La gestión que se realiza en el Puerto, relacionado con las operaciones logísticas, al igual que en todos los puertos del Brasil, se soporta en tres herramientas definidas por el Gobierno Federal; la primera herramienta es el Plan Nacional de logística Portuaria- PNL, que es el documento a través del cual se planifica a corto, mediano y largo plazo las intervenciones en infraestructura y en los sistemas de gestión de los puertos organizados de Brasil. La segunda herramienta es el Plan Maestro del Complejo Portuario que es el encargado de orientar las acciones e inversiones para la relación puerto-ciudad, proyectando la demanda y la capacidad para atender los movimientos portuarios y los accesos terrestres y fluviales. La tercera herramienta es el Plan de Desarrollo y Zonificación-PDZ que es el instrumento de planificación de la Autoridad Portuaria que incluye las acciones y estrategias para promover el desarrollo sostenible de los puertos organizados, integrar modos de transporte, optimizar el uso de las instalaciones y la infraestructura, definir la organización del espacio al interior del puerto considerando las operaciones de movimiento de carga y recibo de pasajeros y proponer alternativas de uso para las áreas afectadas y las no afectadas por las operaciones portuarias [57].

En cuanto a la infraestructura portuaria, el puerto cuenta con una red de transporte completa que contempla acceso férreo y por carretera, infraestructura fluvial, infraestructura de oleoductos, infraestructura eléctrica y de tratamiento de aguas residuales. La infraestructura de acceso al puerto- Hinterland, se compone de una malla vial y ferroviaria extensa; el Sistema Achietá-Imigrantes- SAI, conformado por las carreteras junto con las interconexiones Planalto e Inferior que conectan al puerto en menos de una hora con las ciudades y carreteras cercanas; igualmente, el puerto cuenta con dos líneas ferroviarias: el Sistema Ferroviario Rumo y el Ferrocarril Santos -Jundiá-MRS, que movilizan el 30% de la carga. La tendencia de la industria naviera encaminada al diseño y construcción de naves o buques superiores con el que se cuenta para responder a los volúmenes del comercio ha supuesto la evolución constante del Puerto de Santos para responder con su infraestructura fluvial de manera eficiente a las operaciones portuarias que implica; esto significa que las operaciones de dragado se hagan estratégicamente para recibir buques de mayor calado.

El canal de navegación del puerto cuenta con una longitud de 25km, dentro de los que se incluyen 16km de muelles, permite la navegación de embarcaciones de hasta 340 mts de eslora y un calado máximo de 15 metros; en total, el puerto cuenta con 60 posiciones de amarre que pueden variar de acuerdo al tamaño de los buques y 53 terminales distribuidas entre terminales del puerto organizado (39), terminales de tránsito (8) y Terminales de Uso Privado- TUPs (6); estas terminales a su vez se especializan en todo tipo de carga: contenedores, granel sólido, granel líquido, carga general, pasajeros, Roll-on Roll-off. El puerto tiene 33 bodegas y 118 silos para almacenamiento de vegetales y 13 bodegas para almacenamiento de minerales; para la carga general y contenerizada el puerto tiene 1.422.950 m<sup>2</sup> de patios y para el servicio a la carga granel, el puerto cuenta con 967 tanques con una capacidad estática de 2.178.695m<sup>3</sup> [58].

La red de oleoductos compuesta por 4 sistemas o redes permite el transporte de petróleo y sus derivados entre los municipios de Baixada Santista, permitiendo el trasbordo y recepción de graneles líquidos y de combustible para el suministro a buques; así como también permite la recepción y envío de líquidos crudos a terminales y refinerías y el envío de gas licuado a empresas de la región. La infraestructura eléctrica con la que cuenta el puerto garantiza el suministro de energía, el 85% de la energía comercializada y utilizada por la Autoridad Portuaria de Santos proviene de la hidroeléctrica Usina de Itatinga y es complementada en alta tensión por la empresa concesionaria local Companhia Piratinga de Força e Luz- CPFL.

Finalmente, el esquema de uso y reutilización de aguas y aguas residuales es una de las banderas de sostenibilidad del puerto; el puerto de Santos cuenta con un sistema propio para la captación, tratamiento y provisión de agua potable. El puerto realiza pruebas de laboratorio que le permiten monitorear la calidad y potabilidad del agua potable y del agua reutilizada para su posterior reintegración en las operaciones portuarias.

Análisis de la aplicación de industrias 4.0 a las operaciones logísticas de ese puerto.

Como en los grandes puertos del mundo, la implementación de industrias 4.0 en las operaciones logística del puerto de Santos está altamente ligada a los procesos de innovación y a la forma como el Brasil como país y el Gobierno federal entiende la innovación y la contempla en sus políticas públicas. En 2004 el Gobierno Federal promulgó la Ley 10.973 que establece diferentes incentivos en los procesos de innovación, I+D+i en ambientes productivos [59].

El Banco Interamericano de Desarrollo – BID, ha prestado recursos al gobierno del Brasil por un valor US\$ 1500 millones como crédito condicional, evidenciaron la apuesta decidida por la innovación como estrategia para impulsar el desarrollo económico, aumentar el crecimiento de los emprendimientos tecnológicos, esto con el fin de mejorar y optimizar los procesos productivos, además permite dinamizar el sistema comercial nacional, en todos los sectores, incluyendo el portuario, el cual también ha contado con inversión del gobierno, en relación a las inversiones en innovación, se evidenció la necesidad de la Autoridad Portuaria de tener un proceso administrativo y desburocratizado para atraer empresas interesadas en la creación de alianzas para la innovación y la adopción tecnológica; de esta manera el puerto se alineó con lo establecido en la Ley 10.973 de 2004 y adoptó la innovación como uno de sus objetivos estratégicos.

Así, en 2021 se creó el Programa de Innovación Abierta del Puerto de Santos con seis objetivos específicos; incentivar la creación de un ecosistema de innovación portuario y logístico en el puerto, avanzar en la agenda de transformación digital a través de la implementación de tecnologías disponibles, desarrollar nuevas soluciones y oportunidades de negocios, establecer alianzas con empresas para la innovación, realizar y participar en eventos, implementar un programa de prácticas en innovación y establecer convenios con instituciones de educación. En este mismo año se lanzó la Norma de la Autoridad Portuaria- NAP de Innovación, que es la norma o proceso de cooperación para compartir información con empresas que necesitan desarrollar o validar nuevas tecnologías.

A la fecha, la implementación del programa anteriormente descrito ha traído varios resultados para el Puerto de Santos, el primero está relacionado con la formalización de cooperaciones con startups y empresas para dar soluciones tecnológicas a los problemas del puerto; la alianza con Wilson Sons y Docktech permitió el desarrollo del concepto cloud sourcing de datos batimétricos que permite una mayor precisión en el levantamiento y la identificación de capas exteriores, y la implementación de herramientas adicionales como las vistas 2D que permiten una comprensión visual de la evolución sedimentológica del Puerto de Santos para anticipar la necesidad de dragado y proporcionar mayor



seguridad en la navegación. Esta alianza es fundamental teniendo en cuenta que de acuerdo a los funcionarios de la SPA entrevistados para el desarrollo de este artículo, la condición física del puerto dadas las necesidades constantes de dragado es una de las desventajas del puerto, esto hace que se requieran grandes inversiones para la manutención del calado y limita la posibilidad de que al puerto puedan arribar buques de mayor envergadura que podrían consolidar aún más el Puerto de Santos como puerto de contenedores. La alianza con i4sea está permitiendo mediante el uso de modelos matemáticos mantener el control de la planificación con pronósticos marítimos y meteorológicos hiper localizados, dando mejor manejo a los factores relacionados con el clima que son la causa número uno de los retrasos que sufre la carga en el viaje y del 60% de las ineficiencias de programación en los puertos. Por último, la plataforma inteligente de gestión de vías navegables que integra la programación de los barcos y estaciones con notificaciones para brindar conocimiento en tiempo real y de manera automática de las etapas a la comunidad interesada, desarrollado gracias a la alianza con NavalPort, constituye una solución a las dificultades en el seguimiento de la zona de fondeo y de las operaciones que se desarrollan en el puerto por la falta de herramientas para gestionar la programación de los buques.

El segundo resultado es la implementación del programa de prácticas en innovación en alianza con la Facultad de Tecnología Rubens Lara-FATEC, enfocado en el desarrollo de soluciones innovadoras para problemas internos de la Autoridad Portuaria de Sao Paulo; como resultado de esta alianza, se ha logrado la creación de nuevas tecnologías como el Dashboard Power BI, la automatización con Forms para la obtención de datos de manipulación de la carga en las terminales portuarias, Minería de datos con la construcción de un Robot de verificación de consentimiento y la monitorización geoespacial del tráfico de naves. El tercer resultado es la desburocratización del proceso administrativo para posibilitar la entrada de nuevas tecnologías al puerto, logrando la disminución del tiempo desde el ingreso de la solicitud hasta la firma del acuerdo de cooperación. El cuarto resultado es la participación en eventos relacionados con la innovación por parte de la Autoridad Portuaria del Puerto de Santos, tales como Inova portos 2022 y Porto Hack 2022, el primero tuvo como tema principal la sustentabilidad en el sector portuario a través de la innovación, la modernización y la reducción de costos y, el segundo tuvo como objetivo reconocer y divulgar en el entorno empresarial las soluciones y transformaciones digitales desarrolladas por el Puerto de Santos que tienen potencial innovador, evidenciándose así el compromiso del puerto por participar en los espacios de discusión en torno al desarrollo tecnológico y de la innovación del país y de los puertos.

### **Puerto de Cartagena**

El Puerto de Cartagena constituye uno de los principales epicentros logísticos de Colombia, desempeñando un papel importante en la interconexión entre la región del Caribe y el escenario global. Evidenciando su relevancia, se encuentra vinculado a una amplia red de 288 muelles distribuidos en 80 naciones, estableciendo relaciones estratégicas con las principales compañías navieras [60]. En su conjunto, este puerto se responsabiliza de alrededor de la mitad de las operaciones de exportación en el país, facilitando el envío de productos de unos 2.800 empresarios a más de 500 puertos de 133 países. Estas notables conexiones y el despliegue geográfico del Grupo Puerto de Cartagena son fundamentales en esta operación.

En particular, los destinos preeminentes para las exportaciones de carga son los Estados Unidos, Brasil y México. No obstante, el Puerto de Cartagena no se limita a ser un mero intermediario logístico, sino que demuestra un compromiso enriquecedor. Consciente de las demandas de la era digital, se ha orientado hacia la capacitación de su personal, fortaleciendo tanto competencias técnicas como habilidades interpersonales. Este enfoque busca promover la resiliencia, la flexibilidad y la innovación en su equipo. En paralelo, la organización ha invertido en fuentes de energía renovable y sostenibilidad, y se ha orientado a una comprensión más profunda del mercado, para enfrentar los retos futuros y ajustarse a las cambiantes dinámicas de la industria [61].

En la última década, el puerto ha experimentado una serie de mejoras en su infraestructura y equipos para mantenerse a la vanguardia del sector. La Terminal de Contenedores de Cartagena se construyó en 1993, y desde entonces, se han construido nuevas terminales de carga y se han mejorado las instalaciones portuarias.

En la década de los años treinta, se llevó a cabo la construcción de la primera fase del canal de acceso al Puerto de Cartagena, una infraestructura vital para la operatividad del puerto. Posteriormente, en 2012, se emprendió una significativa expansión, que marcó un hito en su desarrollo [62]. Este puerto, conocido como el Grupo Puerto de Cartagena, ha recibido en múltiples ocasiones el reconocimiento como el principal puerto en la región del Caribe, en gran parte debido a su infraestructura de vanguardia y la eficiencia de su equipo de colaboradores. La implementación de altos estándares internacionales ha permitido que el puerto ofrezca servicios de alta calidad y cumpla rigurosamente con las normativas vigentes.

En este sentido, el Grupo Puerto de Cartagena no solo se destaca en términos de infraestructura y eficiencia operativa, sino que también demuestra un firme compromiso con la sostenibilidad y la innovación. Esto se traduce en inversiones en fuentes de energía renovable, en la promoción de prácticas sostenibles y en un profundo análisis de mercado. Estas acciones pretenden enfrentar los desafíos futuros y adaptarse de manera ágil a los cambios en la industria [63].

Este puerto ofrece una gama completa de servicios relacionados con la carga contenerizada, manteniendo estándares de calidad que satisfacen los requisitos más exigentes a nivel internacional. Entre sus operaciones se incluyen el cargue, descargue, movilización y almacenaje de contenedores destinados a importación, exportación y tránsito. Además, en su Terminal de Contenedores se han realizado inversiones para la construcción de nuevas terminales de carga y mejoras en las instalaciones portuarias, destacando un área de patio con una capacidad de almacenamiento de contenedores de 56,000 celdas distribuidas en 40 hectáreas. Para satisfacer las necesidades específicas de sus clientes, el Grupo Puerto de Cartagena ofrece servicios especializados diseñados a medida [63].

La Industria 4.0 ha sido una tendencia emergente en la digitalización de las industrias manufactureras y logísticas, aunque la integración de IoT y AI ha mejorado diversos aspectos, como las interacciones hombre-máquina, las operaciones en el campo de IoT, el análisis de big data y más, también existen desafíos que limitan su aplicación. Algunos de estos desafíos incluyen la falta de estándares comunes, la interoperabilidad limitada entre sistemas, la seguridad y privacidad de los datos. Además, la implementación de tecnologías avanzadas puede requerir una inversión significativa en infraestructura y capacitación del personal. En el contexto del Puerto de Cartagena, se ha realizado una significativa inversión en nuevas fuentes de energías renovables, iniciativas sostenibles y una mayor comprensión del mercado, orientadas hacia la afronta de los desafíos venideros y la adaptación ágil a las dinámicas cambiantes de la industria.

El Grupo Puerto de Cartagena obtuvo un destacado quinto lugar en el Índice de Desempeño de los Puertos de Contenedores (CPPI) elaborado por el Banco Mundial y Standard & Poor's en el año 2022. Este estudio evalúa el rendimiento de 348 puertos de contenedores a nivel global, considerando su eficiencia según el tiempo requerido desde la llegada de un buque al puerto hasta su partida, tras completar el intercambio de carga. El puntaje alcanzado por el Puerto de Cartagena lo posiciona como un puerto más eficiente que otros de renombre internacional, tales como Ningbo, Guangzhou, Hong Kong, Singapur, Nueva York, Barcelona y Busan, entre otros.

Este logro refleja la eficiencia operativa del puerto, su compromiso con la mejora continua y la adopción de prácticas avanzadas, como la inversión en energías renovables y enfoques sostenibles, que lo posicionan como un actor clave en la industria portuaria global, listo para afrontar los retos futuros y adaptarse eficazmente a las transformaciones del mercado [63].

Tabla 3: Aplicación de las tecnologías en el sector empresarial.

Variables	Empresa productora	Empresa de transporte internacional	Agencia de aduana
<b>Procesos técnicos de monitoreo</b>	<b>4,5</b>	<b>4,7</b>	<b>4,7</b>
Rastreo de buques en tiempo real	5	5	5
Rastreo de contenedores en tiempo real	5	5	5
Rastreo de la mercancía por parte del cliente en tiempo real	5	5	5
Sistemas de localización satelital	4	5	4
Administración del tráfico	4	4	4
Asignación de prioridades en los servicios portuarios	4	4	5
Equipos y maquinaria	<b>3,6</b>	<b>3,6</b>	<b>3,6</b>
Inteligencia artificial - IA	4	4	4
Internet de las cosas - IoT	3	4	4
Internet de los barcos - IoS	2	3	2
Acceso de información en tiempo real en cada área del puerto	5	4	5
Programas en la nube	4	3	3
Integración de sistemas	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,8</b>
Manejo eficiente del proceso con la terminal portuaria	4	3	5
Sistemas de seguridad automatizados - ciberseguridad	4	5	4
Realidad aumentada	0	0	0
Simulaciones	0	0	0
Aplicación de la jurisdicción portuaria	5	5	5
Integración de sistemas - robótica	<b>3,8</b>	<b>4,5</b>	<b>3,8</b>
Optimización de rutas	4	5	4
Seguimiento de carga	4	5	4
Operaciones en puerto	4	4	4
Optimizar los procesos existentes	3	4	3
Otras tecnologías	<b>3,5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
Computación en la nube	4	4	3
Blockchain	3	4	3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 se presenta la aplicación de las tecnologías en las empresas productoras, de transporte internacional y de agencia de aduana. En el ecosistema portuario, se entrevistó al gerente de comercio exterior de una empresa productora, coordina toda la operación y la función principal es controlar el volumen de la carga a granel, la empresa también maneja operaciones contenerizadas, transporte terrestre y cargas aéreas. Su visión está encaminada en el mejoramiento continuo de la operación, y entre ellas la inclusión de las tecnologías dentro de los procesos.

Afirma el entrevistado que la IA, “llegará a un punto en que va dejar al área de logística sin que hacer, explicándolo de la siguiente manera, la empresa tiene varias plantas en el país y deben distribuirla de la mejor manera entre la Costa Norte y a la Costa del Pacífico, puntualmente Buenaventura, hacer todo este análisis dependiendo de las necesidades específicas de la compañía, demanda que una persona esté pendiente de hacer reparto de todas las cargas y eso también aplica para los contenedores, lo que hace que a veces el proceso sea muy complejo”.

Afirmación que avalan autores como [64], [65] que indican que la industria marítima moderna está produciendo datos a un ritmo sin precedentes, además las características tecnológicas de rápido crecimiento actuales impulsan a todas las empresas de todos los sectores a la mecanización con automatización mediante IA ([64], [65]), teniendo en cuenta todas las variables que se le presenten y organizando todo de una manera mucho más efectiva, debido a que los encargados de las áreas logísticas deben realizar estos análisis, y teniendo en cuenta que la logística tiene limitaciones y se presentan novedades o surge situaciones el instante del cargue, del tránsito o cualquier anomalía y eso a veces dificulta la operación, entonces con seguridad que se va a llegar a un punto donde ya la IA se encargará de tener en cuenta todos los elementos pertinentes y empezar a hacer un seguimiento total de la operación completa.

Empresas productoras y agencias de carga y aduana participaron de estos procesos de aplicación de industrias 4.0, que hacen que sus procesos logren mayor seguimiento control y manipulación de las cargas antes y después de llegar a puerto, algunas afirmaciones de la agencia de carga. La empresa productora cuenta con SAP [66] un software que permite la gestión empresarial, y ofrece la base para hacer las operaciones, tanto de ingreso como de salida, incluyendo la facturación, también se incluye el manejo de los almacenes con la herramienta WSM, que permite inventarios, en las plantas con las que la empresa cuenta.

La segunda empresa intervenida fue una agencia de carga, aduana y logística a nivel internacional tiene una empresa de seguimiento a las cargas, la cual permite que cualquier cliente pueda ver dónde está su carga en un punto determinado en el mundo y en tiempo real, enviando

notificaciones día a día del estado de la carga, esta tecnología es apropiada porque se está revisando constantemente los tracking o seguimientos de la naviera, las transportadoras automáticamente.

Ahora bien, los puertos también se están automatizando, con una proyección para que los puertos inteligentes pueden considerarse como la solución que aborda los nuevos desafíos que enfrentan los sistemas de comercio y logística internacional. [67], anteriormente se debían pedir citas manuales, ahora se hace por medio de la plataforma del operador portuario, con el número de PIN asignado como cliente, con tu autorización como transportador para cargar o descargar un contenedor, eso ha facilitado el manejo de las cargas, sin necesidad de tener una persona presencial que realice el proceso documental, La compañía, afirma que todas las empresas migrarán a las Aplicaciones informáticas o App's, donde intervienen robots que recogerán la información y rectificaran su solicitud, donde el cliente pueda ingresar en cualquier momento teniendo la información en directo.

Por su parte, la empresa de transporte internacional o agencia de carga y aduanas afirma que se debe estar al día con la tecnología, porque los procesos manuales se convierten en desgaste para la organización, para hoy se cuenta con firmas electrónicas, automatizaciones, herramienta WMS, para acceder a la data en tiempo real, estos sistemas de recursos empresariales - ERP como la herramienta SAP, cada vez se democratizan más, incluso la empresa afirma que tiene un desarrollo de ERP en la facturación para que los procesos en documentación con los clientes sean más eficientes como la realización de pagos electrónicos.

El impulso de la competitividad internacional de los puertos marítimos en el contexto globalizado, mediante la modernización de su infraestructura, la adopción de tecnologías avanzadas en sus operaciones administrativas y logísticas, y la mejora continua de la calidad y eficiencia de los servicios portuarios, se erige como un objetivo fundamental en el escenario actual. Para lograr esta potenciación, se proponen tres estrategias clave: 1) Implementación de Sistemas Tecnológicos: Una estrategia fundamental radica en la incorporación de tecnologías de vanguardia de la industria 4.0. Estas tecnologías, como la automatización, el uso de datos en tiempo real, el Internet de las cosas y la inteligencia artificial, contribuyen significativamente a optimizar la operación portuaria, incrementando la eficiencia y reduciendo costos; 2) Calidad y Eficiencia en los Servicios Portuarios: Aunque los puertos marítimos ya son reconocidos por su capacidad de vinculación, es crucial mantener un proceso de mejora continua en la calidad y eficiencia de los servicios. Esto implica la optimización de la gestión de recursos, la reducción de tiempos de espera y la adopción de estándares internacionales que aseguren la satisfacción de los clientes y usuarios y 3) Infraestructura Portuaria: la inversión sostenida en infraestructura portuaria es esencial para mantener la competitividad a largo plazo. La expansión, renovación y mantenimiento constante de las instalaciones portuarias es fundamental para garantizar la capacidad de manejar un creciente volumen de carga y cumplir con los estándares de seguridad y eficiencia.

## V. CONCLUSIONES

La industria 4.0 se ha articulado en los procesos logísticos portuarios y genera datos rápidos, la captura y el procesamiento de dichos datos es fundamental para crear valor añadido para las empresas marítimas y otras partes interesadas, como todas las empresas vinculadas en la cadena de abastecimiento, como las productoras, agentes de carga internacional, agencias de aduana. Sin embargo, para desbloquear su verdadero potencial, se necesitan tecnologías innovadoras como el análisis a escala extrema, la inteligencia artificial y los gemelos digitales. Los enfoques tradicionales no pueden manejar big data de manera efectiva. Se espera que estas tecnologías aborden eficazmente los macrodatos marítimos y creen herramientas que ayuden a las empresas marítimas en un entorno complejo y en evolución. Este entorno requiere que los buques marítimos aumenten su seguridad y rendimiento generales y reduzcan su consumo y emisiones. Un desafío integral para el desarrollo de estas aplicaciones marítimas de próxima generación radica en combinar e incorporar efectivamente las tecnologías innovadoras antes mencionadas en un sistema integrado.

La industria 4.0 en el sistema de puertos ha logrado unos avances significativos desde el tema de monitoreo hasta la entrega final al cliente estableciendo una amplia dinámica y ágil cadena de valor, la propiedad emergente que surge de la integración de los resultados y cómo ellos cambian la realidad teórica o práctica percibida.

Los puertos con mayor implementación de industrias 4,0 en su operación portuaria, son aquellos que han utilizado las alianzas con otras organizaciones como estrategias para avanzar en su implementación; Se percibe que las alianzas más importantes de han realizado con la academia, específicamente con las escuelas de tecnologías, sistemas y programación de softwares, organizaciones privadas y entre administraciones o sociedades portuarias. En este sentido, las alianzas permiten lograr metas en conjunto, además de ser oportunidad para realizar la operación portuaria que, de respuesta al monitoreo y rastreo de buques y contenedores en tiempo real, administración del tráfico, asignación de de prioridades en los servicios portuarios, manejo eficiente de la terminal portuaria y sobre todo que el proceso sea transparente para el cliente final, de tal manera que se pueda realizar el seguimiento de la mercancía en tiempo real. La automatización de la operación de la operación de las empresas vinculadas en la operación y dentro del puerto, permite que la operación sea eficiente.

El marco legal es fundamental para favorecer el avance en la implementación de industrias 4,0 en los puertos; países como Brasil han avanzado en la creación de políticas y normas que abrazan la innovación y la implementación de tecnologías en los puertos organizados y para lograr la aplicación de la norma han abierto la posibilidad a la inversión externa y a la cooperación entre organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para el logro de la competitividad portuaria impulsada por las tecnologías emergentes de la industria 4,0; otros países como Colombia y Panamá establecen un marco legal fuerte para la operación portuaria y la incursión de terceros en las inversiones y administración de la sociedad, sin embargo no se evidencian políticas o planes de innovación específicos relacionados con la implementación de tecnologías 4,0 en la operación, aunque la aplicación de las mismas en los puertos de estos países ha estado orientada al fortalecimiento de la seguridad en las operaciones.

Finalmente, se evidencia que en los puertos analizados de Latinoamérica, existe implementación de tecnologías emergentes de la industria 4,0 en la seguridad portuaria, en el manejo de las predicciones climáticas, en el control de temperatura mediante sensores en contenedores, depósitos y almacenamientos, en el pesaje de camiones en movimiento, en la simulación de las operaciones portuarias a través de gemelos digitales, pero se evidencia que la eficiencia portuaria se podría elevar con la implementación de tecnologías de la industria 4.0 en operaciones de cargue y almacenamiento como grúas y carros autónomos.

Las investigaciones en términos de eficiencia y competitividad portuaria están abordando la necesidad de la implementación de tecnologías emergentes de la industria 4.0 para lograr mayor eficiencia en las operaciones, mejorar la seguridad en la cadena de suministros puerta a puerta, lograr la sostenibilidad en las operaciones portuarias y mejorar la calidad de los servicios. En este orden de ideas el concepto de “Puertos 4.0” está logrando relevancia y es pertinente abordar las formas como el capital humano y las tecnologías pueden co-trabajar en la labor portuaria.

En línea con lo anterior, el marco referencial para futuras investigaciones ya no deberían girar en torno a la conceptualización de las tecnologías de la industria 4.0 como IoT, Blockchain, Automatización, Robótica, IA, Nube, Realidad Aumentada y Virtual, Big Data, Energías renovables y drones, porque su definición ha sido abordada en múltiples estudios; las futuras investigaciones deberían seguir indagando y descubriendo la manera como dichas tecnologías pueden ampliar su campo de aplicación en la operación portuaria para mejorar la eficiencia y la competitividad y, la manera como estas se conjugan con los seres humanos en el trabajo, esto último es lo que se ha denominado por múltiples autores como la quinta revolución industrial, que será aquella en la que las máquinas no desplazan a los humanos sino que por el contrario colaboran en la construcción y ejecución de los procesos y las operaciones.

Otro insumo para futuros estudios es el relacionado con cómo los puertos se convierten en sostenibles en emisiones de carbono; a mayor automatización y utilización de energías renovables, el impacto positivo con el medio ambiente y la rentabilidad y eficiencia de los puertos avanzará proporcionalmente; como aporte al avance del área de estudio, es pertinente medir la implementación de maquinarias con energías limpias en los puertos.

Así, las tendencias que marcan futuros estudios en el área portuaria son: Nuevas aplicaciones de las industrias 4.0 en la operación portuaria, la sostenibilidad portuaria a partir del uso de nuevas tecnologías, la implementación de energías renovables en los puertos, fuentes de financiación para la digitalización portuaria.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Católica Luis Amigó y al Politécnico Grancolombiano por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Y. Yang, M. Zhong, H. Yao, F. Yu, X. Fu, and O. Postolache, “Internet of things for smart ports: Technologies and challenges”, *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 34–43, Feb. 2018, doi: [10.1109/MIM.2018.8278808](https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278808).
- [2] V. Bracke, M. Sebrechts, B. Moons, J. Hoebeke, F. De Turck, and B. Volckaert, “Design and evaluation of a scalable Internet of Things backend for smart ports”, *Softw. Pract. Exp.*, vol. 51, no. 7, pp. 1557–1579, Jul. 2021, doi: [10.1002/spe.2973](https://doi.org/10.1002/spe.2973).
- [3] A. Bouhlal, R. Aitabdelouahid, and A. Marzak, “The internet of things for smart ports”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 203, pp. 819–824, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.procs.2022.07.123](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.07.123).
- [4] B. Abdellaoui, H. Ech-Cheikh, M. Sadik, A. Rachid, S. Lissane Elhaq, and A. Mounadel, “Improvement of ship-generated oily waste collection process from ports through the use of virtual Internet of Things system”, *Environ. Monit. Assess.*, vol. 195, no. 7, p. 896, Jun. 2023, doi: [10.1007/s10661-023-11517-x](https://doi.org/10.1007/s10661-023-11517-x).
- [5] X. He, W. Hu, W. Li, and R. Hu, “Digital transformation, technological innovation, and operational resilience of port firms in case of supply chain disruption”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 190, p. 114811, May 2023, doi: [10.1016/j.marpolbul.2023.114811](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114811).
- [6] B. D. Sarkar, R. Shankar, and A. K. Kar, “Port logistic issues and challenges in the Industry 4.0 era for emerging economies: an India perspective”, *Benchmarking*, vol. 30, no. 1, pp. 50–74, Jan. 2023, doi: [10.1108/bij-08-2021-0499](https://doi.org/10.1108/bij-08-2021-0499).
- [7] H. Min, “Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0”, *Maritime Economics & Logistics*, vol. 24, no. 2, pp. 189–207, Jun. 2022, doi: [10.1057/s41278-022-00211-3](https://doi.org/10.1057/s41278-022-00211-3).
- [8] X. Jiang and L. Huang, “Design of dynamic monitoring and anti-theft system for port commodity vehicle’s moving track based on Internet of things”, in *2022 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Mar. 2022, pp. 384–388, doi: [10.1109/ICITBS55627.2022.00089](https://doi.org/10.1109/ICITBS55627.2022.00089).
- [9] M. Kastek et al., “Multisensor system for the protection of a critical harbour infrastructure”, in *Safety and Security Engineering V*, Southampton, UK: WIT Press, Sep. 2013, doi: [10.2495/safe130271](https://doi.org/10.2495/safe130271).
- [10] A. N. Rakhmangulov and D. S. Muravyov, “The development of the regional sea port infrastructure on the basis of dry port”, *Econ. Reg.*, pp. 924–936, Sep. 2016, doi: [10.17059/2016-3-26](https://doi.org/10.17059/2016-3-26).
- [11] R. Compés López and N. Poole, “Quality assurance in the maritime port logistics chain: the case of Valencia, Spain”, *Supply Chain Manage.: Int. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 33–44, Mar. 1998, doi: [10.1108/13598549810200915](https://doi.org/10.1108/13598549810200915).
- [12] I. de la Peña Zarzuelo, M. J. Freire Soeane, and B. López Bermúdez, “Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review”, *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 20, p. 100173, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.jii.2020.100173](https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100173).
- [13] X. Song and L. Huang, “Optimization of import business process and system design in bulk port based on internet of things”, in *Proceedings of the 13th International Conference on Enterprise Information Systems*, SciTePress - Science and Technology Publications, 2011, doi: [10.5220/0003588805090512](https://doi.org/10.5220/0003588805090512).
- [14] C. Hu and J. Y. Du, “Study of dynamic management in digital harbor based on Internet of Things”, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 203, pp. 212–215, Oct. 2012, doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.203.212](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.203.212).
- [15] D. F. Liu, “The internet of things’ monitoring and dispatching system for port based on SOCKET communication,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 241–244, pp. 3245–3248, Dec. 2012, doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.241-244.3245](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.241-244.3245).
- [16] F. Siekmann, H. Schlör, and S. Venghaus, “Linking sustainability and the Fourth Industrial Revolution: a monitoring framework accounting for technological development”, *Energy Sustain. Soc.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-18, Aug. 2023, doi: [10.1186/s13705-023-00405-4](https://doi.org/10.1186/s13705-023-00405-4).
- [17] D. Sinitò, V. Santarcangelo, F. Stanco, and M. Giacalone, “Industry 4.0: Machinery integration with supply chain and logistics in compliance with Italian regulations”, *MethodsX*, vol. 11, p. 102269, Dec. 2023, doi: [10.1016/j.mex.2023.102269](https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102269).

- [18] Acatech, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group”, acatech - National Academy of Science and Engineering, Apr. 08, 2013. [Online]. Available: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>.
- [19] H. Ning and H. Liu, “Cyber-physical-social-thinking space-based science and technology framework for the Internet of Things”, *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 1–19, Mar. 2015, doi: [10.1007/s11432-014-5209-2](https://doi.org/10.1007/s11432-014-5209-2).
- [20] K. Schwab and World Economic Forum, “The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond”, World Economic Forum, Jan. 14, 2016. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>.
- [21] Y. Cohen, M. Faccio, F. G. Galizia, C. Mora, and F. Pilati, “Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14958–14963, Jul. 2017, doi: [10.1016/j.ifacol.2017.08.2550](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2550).
- [22] C. B. Y. Cortés, J. M. I. Landeta, J. G. B. Chacón, F. A. Pereyra, and M. L. Osorio, “El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras”, *Conciencia Tecnológica*, no. 54, 2017. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631006>.
- [23] C. R. Costa, *Los puertos en el transporte marítimo*. 2006. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Los\\_puertos\\_en\\_el\\_transporte\\_mar%C3%ADtimo.html?hl=&id=6TxRzweEACAAJ](https://books.google.com/books/about/Los_puertos_en_el_transporte_mar%C3%ADtimo.html?hl=&id=6TxRzweEACAAJ).
- [24] CEPAL, “Sistemas inteligentes de transporte en la logística portuaria latinoamericana”, Repositorio CEPAL, 2012. [En línea], Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e2842023-85da-40c5-bebc-9c9d2144ce4f/content>.
- [25] X. Clarka, D. Dollara, A. Miccob, “Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade”, *J. Dev. Econ.*, vol. 75, no. 2, pp. 417–450, Dec. 2004, doi: [10.1016/j.jdeveco.2004.06.005](https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2004.06.005).
- [26] P. Coto-Millan, J. Banos-Pino, and A. Rodríguez-Alvarez, “Economic efficiency in Spanish ports: some empirical evidence”, *Marit. Policy Manage.*, vol. 27, no. 2, pp. 169–174, Apr. 2000, doi: [10.1080/030888300286581](https://doi.org/10.1080/030888300286581).
- [27] D. Demirbas, H. Flint, and D. Bennett, “Supply chain interfaces between a port utilizing organisation and port operator”, *Supply Chain Manage.: Int. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 79–97, Jan. 2014, doi: [10.1108/scm-04-2013-0137](https://doi.org/10.1108/scm-04-2013-0137).
- [28] C. Daniel, F. Mariano, and C. Ricardo, “EFICIENCIA PORTUARIA: ANÁLISIS DE LOS INDICADORES PARA SU DETERMINACIÓN”, Unpublished, 2014, doi: [10.13140/2.1.2287.3285](https://doi.org/10.13140/2.1.2287.3285).
- [29] World Bank, “The Logistics Performance Index and Its Indicators 2023”, The World Bank, 2023. [Online]. Available: [https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI\\_2023\\_report\\_with\\_layout.pdf](https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report_with_layout.pdf).
- [30] H. El-kaime and S. L. Elhaq, “Methodology for implementation of industry 4.0 technologies in supply chain for SMEs”, in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, in *Advances in intelligent systems and computing*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 59–76. doi: [10.1007/978-3-030-51186-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51186-9_5).
- [31] G. Zhang, Y. Yang, and G. Yang, “Smart supply chain management in Industry 4.0: the review, research agenda and strategies in North America”, *Ann. Oper. Res.*, vol. 322, no. 2, pp. 1075–1117, 2023, doi: [10.1007/s10479-022-04689-1](https://doi.org/10.1007/s10479-022-04689-1).
- [32] G. D. Corzo-Ussa, E. L. Álvarez-Aros, and F. Chavarro-Miranda, “La industria 4.0 y sus aplicaciones en el ámbito militar: Oportunidad estratégica para Latinoamérica”, *Rev. Cient. Gen. José María Córdova*, vol. 20, no. 39, pp. 717–736, Jul. 2022, doi: [10.21830/19006586.882](https://doi.org/10.21830/19006586.882).
- [33] M. A. Mendoza P. and S. Cuellar, “Industry 4.0: Latin America SMEs Challenges”, in *Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*, IEEE, Sep. 2020. doi: [10.1109/coniiti51147.2020.9240428](https://doi.org/10.1109/coniiti51147.2020.9240428).
- [34] H. Yao, T. Xue, D. Wang, Y. Qi, and M. Su, “Development direction of automated terminal and systematic planning of smart port”, in *IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, IEEE, Mar. 2021, doi: [10.1109/icbaie52039.2021.9389884](https://doi.org/10.1109/icbaie52039.2021.9389884).
- [35] S. Aslam, M. P. Michaelides, and H. Herodotou, “Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges”, *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 10, pp. 9714–9727, Oct. 2020, doi: [10.1109/ijiot.2020.2993411](https://doi.org/10.1109/ijiot.2020.2993411).
- [36] P. Giménez, M. Llop, J. Meseguer, F. Martin, and A. Broseta, “INTER-LogP: INTER-IoT for Smart Port Transportation”, in *Interoperability of Heterogeneous IoT Platforms: A Layered Approach*, C. E. Palau, G. Fortino, M. Montesinos, G. Exarchakos, P. Giménez, G. Markarian, V. Castay, F. Fuat, W. Pawłowski, M. Mortara, A. Bassi, F. Gevers, G. Ibáñez-Sánchez, and I. Huet, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 257–277. doi: [10.1007/978-3-030-82446-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82446-4_9).
- [37] M. Aria and C. Cucurullo, “bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis”, *J. Informetr.*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: [10.1016/j.joi.2017.08.007](https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007).
- [38] V. Kochergin, D. Plotnikov, A. Ilinykh, and S. Glushkov, “Optimization of Technical Monitoring Processes”, *Transportation Research Procedia*, vol. 54, pp. 166–172, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.trpro.2021.02.061](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.061).
- [39] P. Zhang et al., “Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy”, *Machines*, vol. 10, no. 2, p. 72, Jan. 2022, doi: [10.3390/machines10020072](https://doi.org/10.3390/machines10020072).
- [40] A. Matin, M. R. Islam, X. Wang, H. Huo, and G. Xu, “AIoT for sustainable manufacturing: Overview, challenges, and opportunities”, *Internet of Things*, vol. 24, p. 100901, Dec. 2023, doi: [10.1016/j.iot.2023.100901](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100901).
- [41] A. Mishrif and A. Khan, “Technology adoption as survival strategy for small and medium enterprises during COVID-19”, *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, vol. 12, no. 1, pp. 1–23, Aug. 2023, doi: [10.1186/s13731-023-00317-9](https://doi.org/10.1186/s13731-023-00317-9).
- [42] P. Clausen, “Towards the Industry 4.0 agenda: Practitioners’ reasons why a digital transition of shop floor management visualization boards is warranted”, *Digital Business*, vol. 3, no. 2, p. 100063, Dec. 2023, doi: [10.1016/j.digbus.2023.100063](https://doi.org/10.1016/j.digbus.2023.100063).
- [43] X. Du, “Research on the path of artificial intelligence to empower intelligent port upgrading and transformation”, *E3S Web of Conferences*, vol. 372, p. 02001, 2023, doi: [10.1051/e3sconf/202337202001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337202001).
- [44] “Terminal de Contenedores,” *Autoridad Marítima De Panamá | Autoridad Marítima De Panamá*, Feb. 14, 2019. [Online]. Available: <https://www.amp.gob.pa/servicios/puertos-e-industrias-maritimas-auxiliares/infraestructura/terminal-de-contenedores/>.
- [45] A. Belsa Pellicer et al., “Design of a next-generation interoperable cognitive port solution”, in *Internet of Things*, in *Lecture notes in computer science*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 149–160. doi: [10.1007/978-3-031-20936-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20936-9_12).
- [46] C. Jahn and N. Nellen, “Smart Port Concept: Strategic Development, Best Practices, Perspectives of Development”, in *Arctic Maritime Logistics: The Potentials and Challenges of the Northern Sea Route*, I. Ilin, T. Devezas, and C. Jahn, Eds., Cham: Springer International Publishing, pp. 81–93, 2022, doi: [10.1007/978-3-030-92291-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92291-7_5).
- [47] B. B. Szymanowska, A. Kozłowski, J. Dąbrowski, and H. Klimek, “Seaport innovation trends: Global insights”, *Mar. Policy*, vol. 152, p. 105585, Jun. 2023, doi: [10.1016/j.marpol.2023.105585](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105585).

- [48] C. Chen and Y. Li, “Real-time tracking and dynamic berthing information extraction system with 2D LiDAR data”, *Ocean Eng.*, vol. 276, p. 114181, May 2023, doi: [10.1016/j.oceaneng.2023.114181](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114181).
- [49] K. Makkawan and T. Muangpan, “Developing Smart Port with Crucial Domains and Indicators in the Thai Port Case: A Confirmatory Factor Analysis”, *Trans. Marit. Sci.*, vol. 12, no. 1, Apr. 2023, doi: [10.7225/toms.v12.n01.w03](https://doi.org/10.7225/toms.v12.n01.w03).
- [50] O. M. Belcore, M. Di Gangi, and A. Polimeni, “Connected Vehicles and Digital Infrastructures: A Framework for Assessing the Port Efficiency”, *Sustain. Sci. Pract. Policy*, vol. 15, no. 10, p. 8168, May 2023, doi: [10.3390/su15108168](https://doi.org/10.3390/su15108168).
- [51] “Presidência de la Republica de Brasil”, [En línea]. Disponible en: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=8630&ano=1993&ato=404ITTU5ENFpWT7de>.
- [52] “Lei no 8.630 de 25 de fevereiro de 1993”, [En línea]. Disponible en: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=8630&ano=1993&ato=404ITTU5ENFpWT7de>.
- [53] P. de la República de Brasil, “Ley 12.815 de 5 de junio de 2013”, 5 de junio de 2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.planalto.gov.br/CCIVIL\\_03/ Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm](http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/ Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm).
- [54] A. P. Porto de Santos, “Porto de Santos” Compromiso con el desarrollo del Puerto de Santos y del país, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.portodesantos.com.br/santos-port-authority/a-companhia/>.
- [55] E. Barleta and R. J. Sánchez, Boletín 391. Facilitación, comercio y logística en América Latina y el Caribe. Informe Portuario 2021: las primeras señales de recuperación en el transporte marítimo internacional vía contenedores de América Latina y el Caribe. in Boletín 391. . CEPAL, 2022. [En línea]. Available: [https://perfil.cepal.org/l/en/pub/2021\\_ES.pdf](https://perfil.cepal.org/l/en/pub/2021_ES.pdf).
- [56] L. List, “One Hundred Ports 2022”, One Hundred Ports 2022, [Online]. Available: [https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/-/media/lloyds-list/images/top-100-ports-2022/top100ports2022\\_ebook.pdf?rev=bc3fa2a77e134864bcc7dde4518e07d9&hash=D54445A74F150E76C09174D21AB1ABA5](https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/-/media/lloyds-list/images/top-100-ports-2022/top100ports2022_ebook.pdf?rev=bc3fa2a77e134864bcc7dde4518e07d9&hash=D54445A74F150E76C09174D21AB1ABA5).
- [57] A. P. de Santos, “Porto de Santos”, 2023. [Online]. Available: <https://www.portodesantos.com.br/opportunidades-de-negocios/planejamento-logistico/#pm>.
- [58] Santos Port Authority, “Connecting Brazil Worldwide. Facts and Figures 2021”, Santos Port Authority, 2021. [Online]. Available: <https://www.portodesantos.com.br/wp-content/uploads/Facts-en-figures-2021.pdf>.
- [59] P. de la República de Brasil, “Ley No. 10.973 de 2 de diciembre de 2004”, Ley No. 10.973 de 2 de diciembre de 2004, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=10973&ano=2004&ato=884UTRE5UeRpWT79e>.
- [60] C. Suárez-Gargallo and P. Zaragoza-Sáez, “Port Authority of Cartagena: Evidence of a Sustainability Balanced Scorecard”, *Sustain. Dev.*, vol. 31, no. 5, pp. 3761–3785, Oct. 2023, doi: [10.1002/sd.2624](https://doi.org/10.1002/sd.2624).
- [61] United Nations, Provisión de infraestructura de transporte en América Latina: experiencia reciente y problemas observados. CEPAL, 2005. [Online]. Available: <https://play.google.com/store/books/details?id=O9FqzOEACAAJ>.
- [62] “Infraestructura”, [En línea]. Disponible en: <http://www.puertocartagena.com/es/nosotros/quienes-somos/infraestructura>.
- [63] “Un viaje a través de la historia y la evolución del Puerto de Cartagena, el más importante de Colombia”, *THE LOGISTICS WORLD*, May 18, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://thelogisticsworld.com/logistica-y-distribucion/un-viaje-a-traves-de-la-historia-y-la-evolucion-del-puerto-de-cartagena-el-mas-importante-de-colombia/>.
- [64] L. Ilias et al., “Leveraging extreme scale analytics, AI and digital twins for maritime digitalization: the VesselAI architecture”, *Front Big Data*, vol. 6, p. 1220348, Jul. 2023, doi: [10.3389/fdata.2023.1220348](https://doi.org/10.3389/fdata.2023.1220348).
- [65] G. Ç. Ceyhun, “Recent Developments of Artificial Intelligence in Business Logistics: A Maritime Industry Case”, in *Digital Business Strategies in Blockchain Ecosystems: Transformational Design and Future of Global Business*, U. Hacioglu, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 343–353. doi: [10.1007/978-3-030-29739-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29739-8_16).
- [66] “Softwares para la transformación digital en todos los sectores”, SAP. [En línea]. Disponible en: <https://www.sap.com/latinamerica/index.html>.
- [67] K. X. Li, M. Li, Y. Zhu, K. F. Yuen, H. Tong, and H. Zhou, “Smart port: A bibliometric review and future research directions”, *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 174, p. 103098, Jun. 2023, doi: [10.1016/j.tre.2023.103098](https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103098).