



Puerto de Tánger-Med, ubicado en la región norte de Marruecos

Imagen tomada de: Canva educativo

Estudios sobre el costo del impacto por el incremento en el nivel del mar en los puertos y las metodologías empleadas para su cálculo: una revisión sistemática

Studies on the economic impact of sea-level rise on ports and the methodologies used for its calculation: a systematic review

Luis Jesús Rodríguez-Aguilar^{1*}, María Cristina Garza-Lagler², Violeta Zetzangari Fernández-Díaz³

RESUMEN

Los puertos son esenciales para el crecimiento económico de un país por sus actividades comerciales y la creación de empleos, sin embargo, debido a su ubicación geográfica son vulnerables a inundaciones, con un mayor impacto en los últimos años, derivado del derretimiento de las capas de hielo de los glaciares y el aumento de la temperatura en los océanos, que son los principales efectos asociados al cambio climático que han contribuido al incremento en el nivel del mar (INM). El objetivo del presente trabajo fue identificar y caracterizar las metodologías empleadas, a nivel mundial, para calcular los costos por el INM en los puertos con la finalidad de ofrecer una aproximación de las propuestas metodológicas existentes para abordar este importante efecto del cambio climático. Para el desarrollo del trabajo, se dio seguimiento al listado sugerido en el Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), además se procedió con un análisis de contenido. Los costos que se estimaron en los estudios variaron significativamente desde unos millones hasta miles de millones de dólares, siendo en su mayoría acciones de adaptación, seguidas de los aspectos económicos, rentabilidad y relación costo-beneficio. Es conveniente transitar de estrategias aisladas y particulares a una propuesta metodológica global y estandarizada que permita afrontar el riesgo de inundación que se considere posiblemente inevitable ante los efectos del cambio climático. La operatividad de los puertos frente al INM dependerá en gran medida de una adecuada estimación de inversión necesaria para afrontarla, mediante proyecciones climáticas estandarizadas, evaluando de forma global el costo que implica, para garantizar que la inversión en infraestructuras portuarias sea eficaz.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, incremento en el nivel del mar, puertos, metodología de costos, PRISMA.

ABSTRACT

Ports are essential for a country's economic growth because of their commercial activities and job creation. However, their geographic location makes them vulnerable to flooding, with a greater impact in recent years due to the melting of glacier ice sheets and rising ocean temperatures, which were the main effects associated with climate change that have contributed to sea-level rise (SLR). The objective of this work was to identify and characterize the methodologies employed, globally, to calculate the costs of SLR in ports with the aim of providing an overview of existing methodological approaches to address this important climate change effect. For the development of this work, the suggested list in the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) was followed, and a content analysis was also conducted. The costs estimated in the studies varied significantly, ranging from millions to billions of dollars, with the majority focusing on adaptation measures, followed by economic aspects, cost-effectiveness and cost-benefit analysis. It is advisable to shift from isolated and specific strategies to a standardized global methodological approach that can address the potentially inevitable risk of flooding due to the effects of climate change. The operability of ports in the face of SLR will largely depend on accurately estimating the necessary investment to confront it, through standardized climate projections, evaluating the global cost involved, to ensure that investments in port infrastructure are effective.

KEYWORDS: climate change, sea-level rise, ports, cost methodology, PRISMA.

*Correspondencia: rodriguez.dmayd@gmail.com/ Fecha de recepción: 4 de marzo de 2024/ Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2024/ Fecha de publicación: 2 de octubre de 2024.

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana, núm. 3917, Fracc. Playitas, Ensenada, Baja California, México, C. P. 22860. ²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD), Coordinación de Desarrollo Regional, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83304. ³Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, Baja California, México, C. P. 22860.

INTRODUCCIÓN

Los puertos son considerados infraestructuras que actúan como puertas de entrada al comercio mundial (Munim y Schramm, 2018). Además, son esenciales para el crecimiento económico de un país por sus actividades comerciales y la creación de empleos (Mudronja y col., 2020; Portillo y col., 2022). Las importaciones y exportaciones que se llevan a cabo en esos sitios incluyen el intercambio internacional de productos agrícolas, pesqueros y metálicos, así como artículos electrónicos, textiles y alimenticios, entre otros (Verschuur y col., 2022).

Según la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés: United Nations Conference on Trade and Development) (UNCTAD, 2022), el transporte marítimo constituye la columna vertebral del comercio internacional, debido a que más del 80 % del volumen total de mercancías a nivel mundial se moviliza por esta vía, siendo crucial para la economía de las regiones costeras. Por otra parte, en los puertos también se encuentran embarcaciones pesqueras y recreativas que son vitales para la industria alimenticia y turística, las cuales logran crear beneficios económicos y sociales para las comunidades locales (Kontogianni y col., 2018).

A nivel mundial, el 94.8 % de los puertos están expuestos a más de un peligro natural (Verschuur y col., 2023) que se suma al constante incremento en el nivel del mar (INM) (Taherkhani y col., 2020; McEvoy y col., 2021; Tebaldi y col., 2021). Las áreas costeras están constantemente expuestas a una variedad de fenómenos naturales como mareas, maremotos, movimientos de tierra (terremotos), tsunamis, mareas de leva, huracanes e inundaciones fluviales (Haigh y col., 2016; Kirezci y col., 2020). Estos eventos no solo provocan daños inmediatos, sino que también generan efectos a largo plazo en la infraestructura portuaria (Sierra, 2019). Por su ubicación geográfica, los puertos son vulnerables a inundaciones (Reyes-Bonilla y col., 2020; Ribeiro y col., 2023).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2023), se estima que, para finales de este siglo, el nivel del mar podría alcanzar hasta los 1.01 m, y con escenarios más extremos de INM, podría llegar hasta los 1.80 m, lo que generaría graves inundaciones en diversos lugares del planeta (Jevrejeva y col., 2014). En los puertos, las inundaciones de origen marino son unas de las principales amenazas para su infraestructura (Nazarnia y col., 2020; Izaguirre y col., 2021). Una inundación puede ocasionar la interrupción de las actividades comerciales portuarias y daños a la propiedad de las terminales marítimas (Brown y col., 2021; Amer, 2024).

En el sexto informe de evaluación (AR6) del IPCC (2022), se expuso que el INM continuará amenazando a los asentamientos costeros de varios países durante las próximas décadas. Este fenómeno es principalmente atribuible al derretimiento acelerado de las capas de hielo de los glaciares, así como al aumento de la temperatura en los océanos. Por lo tanto, las zonas costeras bajas serán las más afectadas y en donde exista infraestructura situada en primera línea de costa (Asariotis y col., 2018; Ehsan y col., 2019). Por ejemplo, en México, ante un INM de 1 m y 3 m, se estima que, entre el 1 % y el 2.5 % de la superficie del territorio insular del país quedaría completamente inundada (PNUD-INECC, 2016).

Ante la creciente amenaza del INM en diversas regiones del mundo, se ha llevado a cabo una mayor inversión en estrategias de adaptación costera (Haasnoot y col., 2019). El INM no solo implica costos significativos para la adaptación y protección de infraestructuras, sino que también puede tener un impacto sustancial en la cadena de suministro de mercancías entre distintos países (Becker y col., 2017). Una práctica común para mitigar los impactos negativos de las inundaciones en la infraestructura portuaria, ha sido la implementación de estructuras de defensa. De acuerdo

con Galiatsatou y col. (2018), estas estructuras incluyen diques, rompeolas y barreras marítimas que son diseñadas para proteger las áreas costeras de las olas y mareas.

La infraestructura portuaria es crucial para el comercio global y enfrenta crecientes demandas y desafíos de adaptación, los cuales se estiman podrían ascender a miles de millones de dólares (Aerts y col., 2018). Según Hanson y Nicholls (2020), se proyecta que, para el año 2050, los costos globales de inversión para la adaptación ante el INM y la construcción de nuevas áreas portuarias serán de entre 223 000 a 768 000 millones de dólares.

Un ejemplo para el año 2100 es el puerto de Tánger-Med, ubicado en la región norte de Marruecos, en donde se identificó que los costos de adaptación excederían aproximadamente los 42 millones de dólares con un escenario de INM de 1.8 m. Además, por la inoperatividad, se afectaría el movimiento de 1.97 millones de contenedores y 19.9 millones de Toneladas de hidrocarburos, lo que podría generar aumentos significativos en los costos de transporte y en los precios de los productos (Jebbad y col., 2022).

Algunos trabajos que anteceden a la presente investigación muestran que, desde 1990, se manifiesta la necesidad de estudiar el INM y sus efectos, tanto en el medio ambiente como en la economía de varios países para determinar las zonas costeras vulnerables y hacer frente al cambio climático (IPCC, 1992). En América, una de las primeras publicaciones sobre la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura portuaria y los costos asociados al impacto del INM, la elaboró Sainzar (1997), en la costa de Montevideo en Uruguay. En esa investigación se calculó que los costos de adaptación asociados a la construcción de un rompeolas alcanzarían varios miles de dólares.

Dos años después, en África, específicamente en Egipto, El-Raey y col. (1999), aplicaron una metodología que comprende la evaluación de las estrategias de adaptación para estimar las

pérdidas socioeconómicas ante una inundación. Años más tarde, en Europa, Hallegatte y col. (2011), estimaron los impactos del cambio climático mediante una evaluación de los efectos económicos directos e indirectos en la producción, reconstrucción y los beneficios de la inversión para reforzar las defensas marítimas y sus implicaciones económicas en la ciudad portuaria de Copenhague, la capital de Dinamarca.

De acuerdo con Messner y col. (2013), con el transcurso del tiempo ha sido necesario elaborar y/o fortalecer metodologías consistentes para evaluar las consecuencias de una inundación portuaria mediante un análisis cuantitativo de los costos. Las metodologías constituyen herramientas útiles para aproximar los impactos monetarios potenciales del INM en la operatividad portuaria, ya que permiten diseñar e implementar las vías de adaptación ante una inundación (Gracia y col., 2019) y, en consecuencia, ayudan a consolidar los planes para la protección portuaria (Hoshino y col., 2016; Sriver y col., 2018). Sin embargo, en la actualidad, las publicaciones científicas que se enfocan específicamente para calcular los daños económicos del INM en los puertos no son abundantes, por lo que es una necesidad urgente identificar y estudiar sus rutas metodológicas (Portillo y col., 2022). Según Bosello y De-Cian (2014), para cuantificar los costos de los daños por las inundaciones costeras en los puertos, es esencial una comprensión detallada de las metodologías aplicadas para evitar los posibles daños a la infraestructura portuaria, como también la interrupción de las actividades comerciales (Zviely y col., 2015).

El objetivo del presente trabajo fue identificar y caracterizar las metodologías empleadas, a nivel mundial, para calcular los costos por el INM en los puertos, con la finalidad de ofrecer a los analistas, tomadores de decisiones y a la comunidad científica, una aproximación de las propuestas metodológicas existentes para abordar uno de los efectos del cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se partió de una revisión sistemática de la literatura especializada siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), debido a que permite evaluar los estudios de forma estructurada (Page y col., 2021). En el proceso de recopilación de información, solamente se incluyeron publicaciones de revistas científicas en inglés y español, en las cuales se desarrolló y/o aplicó una metodología para calcular los costos por el INM en los puertos.

Se tomaron en cuenta publicaciones de enero 1990 hasta agosto 2023, debido a que el Primer Informe de Evaluación del IPCC (AR1), en donde se presenta una evaluación de los efectos del INM, fue publicado en 1990. Se excluyeron los documentos que, aunque abordaban el INM, no presentaban una metodología para calcular los costos por su impacto en los puertos, y por lo cual, no contribuían al objetivo de esta investigación.

Las bases de datos que se utilizaron en la búsqueda de información fueron Scopus y Web of Science. La primera contiene referencias bibliográficas con una temática multidisciplinaria en materia de ingeniería, economía y ambiente, entre otras, fundamentales para el análisis que procura el tema de la presente investigación. En cuanto a Web of Science, además de abarcar aspectos de ingeniería también comprende temas relacionados con las ciencias sociales, humanidades y tecnológicas.

En la búsqueda bibliográfica se utilizó un conjunto de palabras para generar los registros,

mediante una combinación de los términos de búsqueda en inglés: “port”, “cost”, “sea level rise” y “methodology”. Y al descriptor booleano “AND”. La combinación de términos que arrojó un mayor número de publicaciones, en las dos bases de datos fueron: “port”, “cost” y “sea level rise” (Tabla 1). En la barra de búsqueda de Scopus, las palabras se escribieron entre comillas para un mejor resultado.

Una vez identificadas las publicaciones en las bases de datos, se realizó el proceso de selección de los estudios. Como primer aspecto se detectaron aquellos registros duplicados para ser descartados. Posteriormente, se llevó a cabo un cribado por medio de la lectura de los resúmenes para excluir aquellos que no estaban relacionados con el tema de esta investigación. A continuación, se examinó el texto completo de las publicaciones científicas para determinar si daban respuesta a la pregunta de la investigación relacionada con las metodologías empleadas a nivel mundial para calcular los costos por el impacto del INM en los puertos. Finalmente, se obtuvieron los registros definitivos que fueron organizados de acuerdo con su origen y periodo de estudio.

Con los registros se realizó un análisis de contenido, el cual es una técnica destinada a formular conclusiones a partir de ciertos datos para que sean reproducibles y válidos, haciendo énfasis en tres aspectos importantes, acorde a Krippendorff (1990): 1) deben quedar claros los datos que se analizan, 2) establecer la manera en que se van a definir y 3) precisar la población de donde se extrae la información.

■ **Tabla 1. Descriptores de búsqueda y sus resultados.**

Table 1. Search equations and their results.

Búsqueda	Palabras de búsqueda	Resultado
Scopus		
1	“Port” AND “Cost” AND “Sea level rise” AND “Methodology”	10
2	“Port” AND “Cost” AND “Sea level rise”	54
Web of Science		
1	Port AND Cost AND Sea level rise AND Methodology	7
2	Port AND Cost AND Sea level rise	62

De esta forma, se identificaron los elementos que se describen en las metodologías aplicadas y se analizaron los aspectos más importantes para la investigación. Es importante destacar que la información obtenida se clasificó en tres tipos de categorías analíticas: métodos utilizados para calcular los costos, tipos de costos estimados y evaluaciones realizadas en las investigaciones. Dichas categorías surgen del análisis de contenido resultante de la revisión de literatura sobre el cálculo de los costos por el INM en los puertos, cuyas definiciones, para fines de esta investigación, se estructuraron acorde a lo mencionado por los autores de cada uno de los artículos.

La primera categoría abarcó todo el contenido relacionado con los procedimientos orientados a recopilar, examinar y analizar la información por medio del uso de diferentes modelos o herramientas (Tabla 2). La categoría de los tipos de costos estimados comprendió la información en materia económica que, acorde a los estudios, se generan por el impacto del INM. Finalmente, la última categoría destaca el propósito del análisis que se llevó a cabo en cada una de las investigaciones. Este propósito abarca la identificación de cada tipo de evaluación que fue realizada por los diferentes autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe una reducida evidencia científica del impacto económico de las INM en los puertos, ya que solamente 16 publicaciones (12.03 % del total de registros identificados inicialmente) abordan esta problemática (Figura 1).

Métodos utilizados en los estudios y tipos de costos estimados

En las 16 publicaciones se utilizaron diferentes métodos agrupados como estadísticos (50 %), probabilísticos (37.50 %), empíricos (25 %), analíticos (12.50 %) y numéricos (6.25 %).

También se establecieron los tipos de costos que se estimaron en las investigaciones, los cuales fueron: adaptación, económicos, rentabilidad y costo-beneficio (Tabla 3). La mayo-

ría de las investigaciones (87.50 %) elaboraron el cálculo de los costos de adaptación, en tanto que, solo el 25 % realizó el cálculo de los costos económicos. Esto pone de relieve la importancia de los análisis cuantitativos para comprender y gestionar los costos asociados con los efectos del INM. A pesar de que la rentabilidad y el costo-beneficio se presentaron con menor frecuencia, con un 18.75 % y 6.25 %, respectivamente, estos fueron cruciales para determinar la viabilidad en la inversión y la eficacia para la toma de decisiones.

Distribución geográfica de las investigaciones

De manera general, un factor distintivo encontrado en las publicaciones subyace en el continente donde los autores realizaron las investigaciones (Figura 2 y Tabla 4). Durante el periodo de 1990 a 1999, solamente se publicaron 2 estudios en América (Uruguay: 1997) y África (Egipto: 1999). De 2000 a 2009, no se registraron publicaciones que abordaran el tema. Sin embargo, de 2010 a 2019 se identificó un aumento significativo en la cantidad de publicaciones con un total de 11, distribuidas en los continentes de Europa (Dinamarca, Grecia, España y Francia), Asia (Japón e Israel y puertos principales) y América (Estados Unidos). Este aumento reflejó una mayor preocupación global sobre los impactos del cambio climático, especialmente en las infraestructuras estratégicas para el comercio internacional, como los puertos. Finalmente, de 2020 a 2023, solamente se identificaron 3 estudios, uno a nivel mundial, y otros dos en África (Marruecos) y América (Chile).

Evaluaciones realizadas

Las publicaciones se dividen en tres categorías, acorde a la revisión de contenido: vulnerabilidad, riesgo y financiera. La vulnerabilidad se expresa como el nivel de susceptibilidad al daño por un desastre debido a la falta de prevención o adaptación, ante un evento de origen marítimo (Saizar, 1997; El-Raey y col., 1999; Hallegatte y col., 2011; Aerts y col., 2018; Kontogianni y col., 2018; Sriver y col., 2018; Sierra, 2019; Jebbad y col., 2022; Winckler y col., 2022).

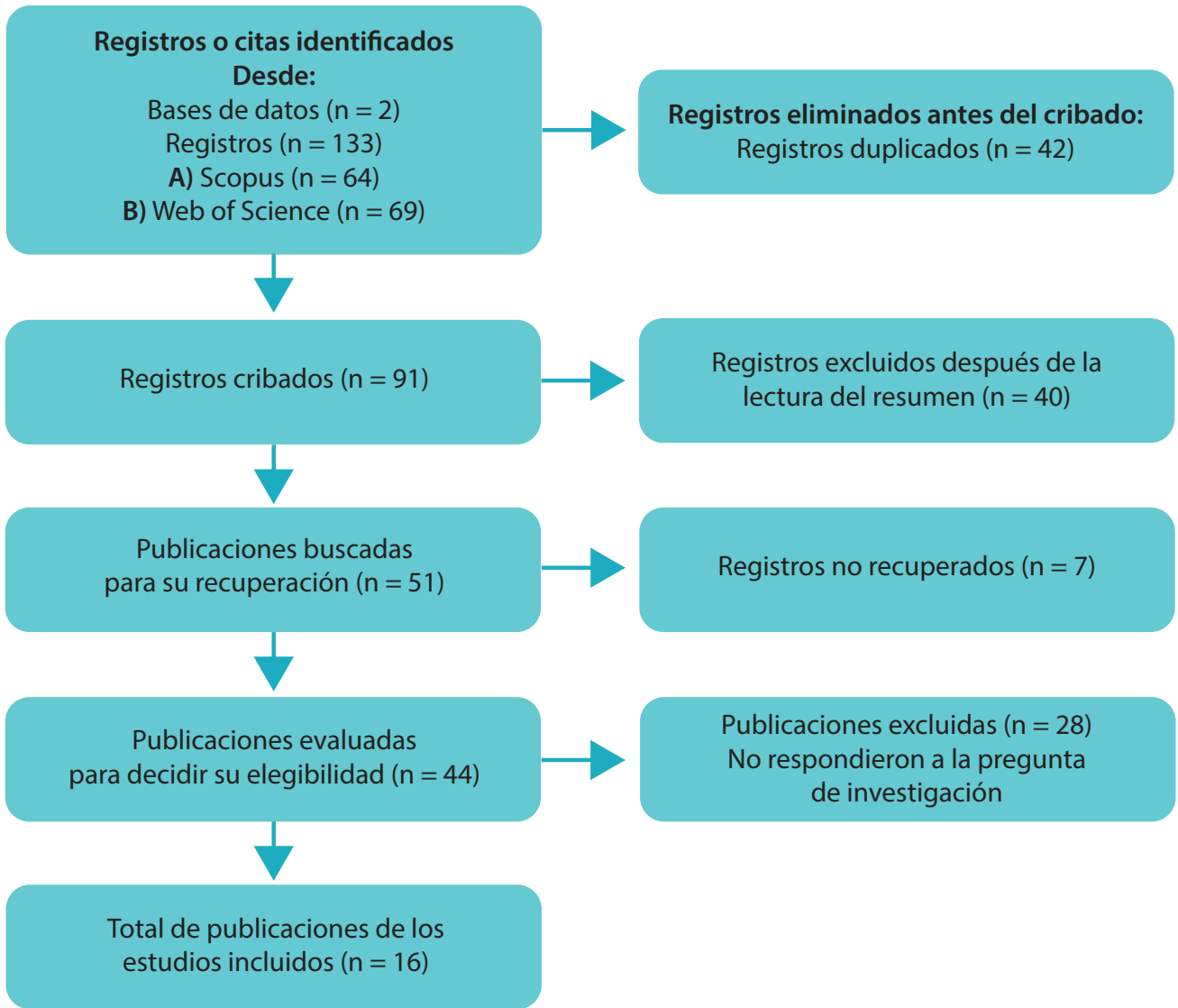
■ **Tabla 2. Modelos o herramientas utilizadas en los estudios.**

Table 2. Models or tools used in the studies.

Autor	Modelos o herramientas
Saizar (1997)	<ul style="list-style-type: none"> Regla de Brunn (1962) para estimar los impactos del INM
El-Raey y col. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de criterios múltiples Evaluador de Simulación para la Adaptación (ASE, por sus siglas en inglés: Adaptation Simulation Evaluator) Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat de 1995 Una matriz de decisiones para las medidas de adaptación
Hallegatte y col. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo Regional Adaptativo de Entrada-Salida (ARIO, por sus siglas en inglés: Adaptive Regional Input-Output) Evaluación económica de los impactos directos e indirectos del INM
Zviely y col. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo físico para calcular la restauración o extensión para estructuras marinas al tener en cuenta las propiedades físicas y ambientales de las estructuras marinas Para recopilar información se utilizaron entrevistas
Hoshino y col. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> Funciones de distribución de la probabilidad
Becker y col. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de puerto genérico (GenPort, por sus siglas en inglés: Generic Port) que se utiliza como base para estimar los costos de la elevación del terreno y la modernización de la infraestructura para disminuir los efectos del INM Base de datos de estimaciones de costos de construcción denominada RSMMeans
DiSegni y col. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Metodología de evaluación de daños que proporciona un marco físico para analizar la vulnerabilidad de los puertos y las marinas ante el INM
Aerts y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Se utilizó el sistema de modelado de tormentas costeras CoSMoS 3.0 del Servicio Geológico de los Estados Unidos En las condiciones regionales se aplicaron los modelos de onda anidada Delft3.D
Galiatsatou y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Estado límite último para el colapso del montículo de escombros del rompeolas Estado límite de servicio para la interrupción de las operaciones portuarias
Kontogianni y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Metodología del IPCC para evaluar la vulnerabilidad de las zonas costeras. Índice de vulnerabilidad climática que generalmente se obtiene mediante la combinación de diversos indicadores: físicos, sociales y económicos Para recopilar información se utilizaron entrevistas
Sriver y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Método de decisiones robustas: Una herramienta desarrollada para suplir la falta de un proceso formal en el pensamiento ordenado y que es adaptable a la resolución de problemas en contextos de alta complejidad
Yang y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de toma de decisiones para la selección de las medidas de adaptación ante el cambio climático Modelo bayesiano de riesgos climáticos Herramienta denominada: Análisis de modos de falla y efectos (FMEA, por sus siglas en inglés: Failure Mode and Effect Analysis)
Sierra (2019)	<ul style="list-style-type: none"> Ecuaciones de los métodos empíricos propuestos en el Manual Europeo de Sobreelevación (EurOtop, por sus siglas en inglés: European Overtopping)
Hanson y Nicholls (2020)	<ul style="list-style-type: none"> Versión mejorada de la primera estimación de los costos globales de protección contra el INM, desarrollada por el Instituto Delft Hydraulics, al diferenciar entre mercancías transportadas por graneles y contenedores Modelo para el comercio a granel y para el área requerida de contenedores Se utilizaron los materiales criterios de diseño, incluidas las variaciones entre importación y exportación de su manejo y almacenamiento

Continúa...

<p>Jebbad y col. (2022)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución de Weibull del año 1951 • Recomendaciones para el proyecto de las obras de atraque y amarre denominada ROM 20-11 de España • Análisis de la interrupción en el movimiento de mercancías y el tiempo de inoperatividad
<p>Winckler y col. (2022)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés: General Circulation Model) • Modelos de ondas locales con datos de INM de 20 GCM para diferentes periodos de retorno (Impactos en la infraestructura) • Análisis históricos del tiempo de inoperatividad



Fuente: Modificado a partir de Page y col. (2021).

■ **Figura 1. Proceso de selección de las publicaciones científicas.**
 Figure 1. Selection process for scientific publication.

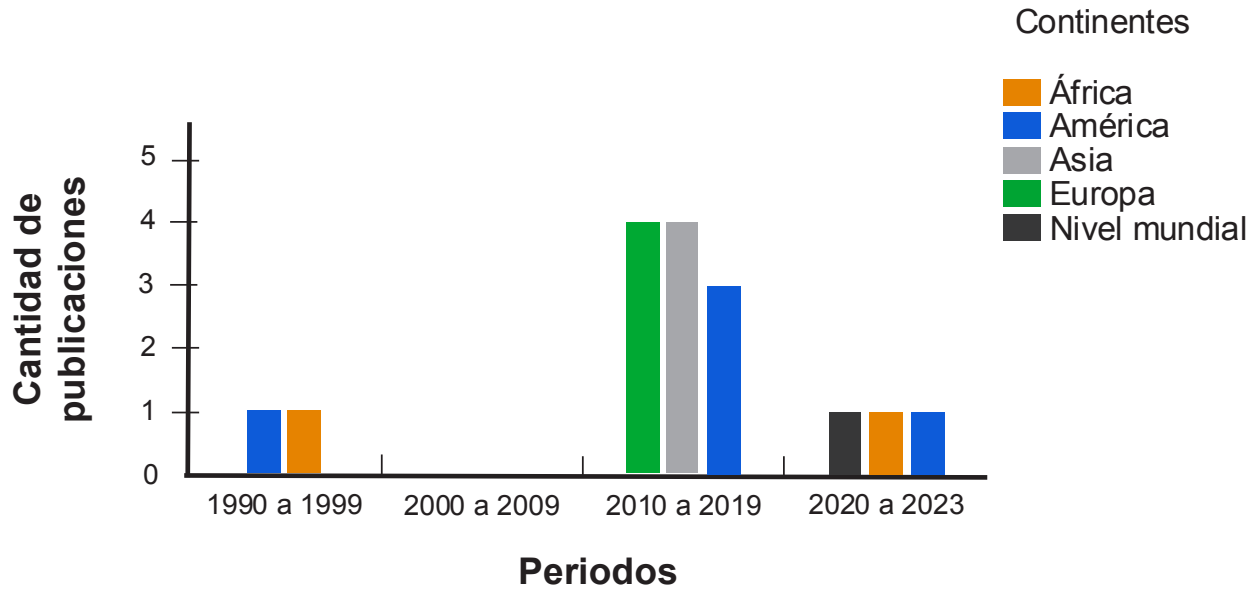
■ **Tabla 3. Tipos de métodos utilizados y costos estimados en los estudios.**
 Table 3. Types of methods used and estimated costs in the studies.

Autores	Método utilizado					Costos estimados			
	Análítico	Empírico	Númérico	Estadístico	Probabilístico	Adaptación	Económico	Rentabilidad	Costo-Beneficio
Saizar (1997)				X		X		X	
El-Raey y col. (1999)				X		X			
Hallegatte y col. (2011)				X		X	X		
Zviely y col. (2015)				X		X			
Hoshino y col. (2016)					X	X	X		
Becker y col. (2017)		X				X			
DiSegni y col. (2017)					X	X			
Aerts y col. (2018)				X		X			
Galiatsatou y col. (2018)				X	X	X			
Kontogianni y col. (2018)	X	X				X		X	
Sriver y col. (2018)					X				X
Yang y col. (2018)	X		X			X		X	
Sierra (2019)		X				X			
Hanson y Nicholls (2020)				X		X			
Jebbad y col. (2022)					X	X	X		
Winckler y col. (2022)		X		X	X		X		
Porcentajes	12.50	25	6.25	50	37.50	87.50	25	18.75	6.25

El riesgo es descrito como el grado de incertidumbre de que ocurra un desastre marítimo en un momento determinado, el cual puede ocasionar pérdidas económicas. Este tipo de evaluación se enfoca en la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y sus impactos potenciales. Su aplicación tiene como objetivo priorizar las acciones de mitigación y respuesta ante el INM (Hallegatte y col., 2011; Zviely y col., 2015; Hoshino y col., 2016; DiSegni y col., 2017; Aerts y col., 2018; Galiatsatou y col., 2018; Sriver y col., 2018; Yang y col., 2018; Winckler y col., 2022). En torno a la evaluación financiera, esta se expresó en los trabajos que estimaron una amplia definición de costos, como los de adaptación, económicos, costo-beneficio y la rentabilidad, la cual permitió la

estimación del impacto económico del INM en los puertos (Tabla 4).

En la Tabla 4, se proporcionó una visión amplia y comparativa de los costos por el impacto del INM proyectado para diferentes regiones y horizontes temporales. Uno de los aspectos más llamativos de los resultados es la marcada variabilidad en los costos que fueron estimados. Esta variabilidad no solo refleja las diferencias en la magnitud del INM esperado, sino también en las características socioeconómicas y geográficas de cada ubicación. Por ejemplo, el estudio de Saizar (1997) en Uruguay, se consideró un costo de entre 17 000 a 41 000 dólares para la construcción del rompeolas. En contraste, Becker y col. (2017)



■ **Figura 2. Distribución geográfica de las publicaciones.**
 Figure 2. Geographical distribution of publications.

estimaron que la adaptación de 100 puertos costeros en Estados Unidos podría costar entre 57 000 y 78 000 millones de dólares, lo que subraya la diferencia en la escala de infraestructura y en las necesidades de adaptación entre las diferentes regiones.

La fluctuación de costos estimados también puede estar influenciada por las metodologías empleadas en cada estudio. Hallegatte y col. (2011) en Dinamarca, utilizaron modelos económicos específicos para estimar el impacto del INM, mientras que otros, como el de Hanson y Nicholls (2020), adoptaron un enfoque más amplio, que incluye proyecciones de costos a nivel global basadas en escenarios de cambio climático. La diversidad de enfoques metodológicos sugiere que las estimaciones de costos pueden estar sujetas a un grado significativo de incertidumbre, lo que destaca la importancia de utilizar múltiples escenarios y metodologías para capturar la gama completa de posibles impactos.

Otro factor importante en la variabilidad de los costos es el escenario de INM considerado

y el horizonte temporal. La mayoría de los estudios proyectaron escenarios para el año 2100, con un INM de entre 0.30 m y 2.0 m, por lo que los costos fueron menores. Sin embargo, El Raey y col. (1999) y Hallegatte y col. (2011), estimaron costos significativamente más altos. La variación de costos se debe a que los efectos del cambio climático, como el INM, tienden a intensificarse con el tiempo, lo que aumenta tanto la magnitud de los impactos como los costos asociados a su mitigación y adaptación. Por ejemplo, El-Raey y col. (1999) en Egipto, calcularon un costo de entre 2 000 a 4 000 millones de dólares para un INM de 0.50 m en 2050 y 1.0 m en 2100, demostrando que los costos aumentan con el tiempo y con la severidad del escenario considerado. Un caso particular, es el de Hoshino y col. (2016), en Japón, quienes utilizaron un INM de 1.90 m para el año 2100, y estimaron costos significativamente más altos, que la mayoría de los estudios con INM más bajos. En este caso, aproximadamente de 1 000 a 3 000 millones de dólares. Tiempo después Hanson y Nicholls (2020), mostraron costos muy por encima de todos los anteriores, pero

■ **Tabla 4. Análisis comparativo de los costos estimados.**
 Table 4. Comparative analysis of estimated costs.

Autores	Región	Escenario de INM	Costo estimado	Consideraciones
Saizar (1997)	Uruguay	0.50 m para 2085 y 1.0 m para el año 2100	17 000 a 41 000 dólares	Construcción del rompeolas
El-Raey y col. (1999)	Egipto	0.50 m para el año 2050 y 1.0 m para el 2100	2 000 a 4 000 millones de dólares	Evaluación de los impactos potenciales y costos asociados ante el INM
Hallegatte y col. (2011)	Dinamarca	0.50 m a 1.0 m para el año 2100	Aproximadamente de 6 000 a 11 000 millones de dólares*	Construcción de diques y estimación de pérdidas
Zviely y col. (2015)	Israel	0.50 m y 1.0 m para el año 2100	200 a 500 millones de dólares	Renovación o ampliación de las estructuras marinas
Hoshino y col. (2016)	Japón	1.90 m para el año 2100	Aproximadamente de 1 000 a 3 000 millones de dólares*	La adaptación de diques antiguos y la construcción de nuevos diques
Becker y col. (2017)	100 puertos costeros, E.U.	0.60 m a 2.0 m para el año 2100	57 000 y 78 000 millones de dólares	Materiales necesarios y la mano de obra para la elevación de infraestructura
DiSegni y col. (2017)	Israel	0.50 m a 1.0 m para el año 2050	280 y 505 millones de dólares	Construcciones marinas en la costa sudeste del Mediterráneo
Aerts y col. (2018)	Áreas costeras del condado de Los Ángeles, E.U.	0.30 m a 2.0 m para el año 2100	4 300 y 6 400 millones de dólares	Incluyen construcción de diques y restauración de dunas
Galiatsatou y col. (2018)	Francia	0.40 m, 0.60 m y 1.0 m para el año 2100	Aproximadamente 9 millones de dólares*	Mejorar las estructuras de protección del rompeolas
Kontogianni y col. (2018)	47 puertos pesqueros y comerciales, Grecia	Datos del IPCC de la vulnerabilidad costera para el año 2100	Aproximadamente de 3 000 dólares a 5 millones de dólares*	Mantener la eficiencia y resistencia de los puertos para reducir la vulnerabilidad
Sriver y col. (2018)	Puerto de Los Angeles, E.U.	2.0 m para el año 2100	Se evaluó con relación a los parámetros del costo-beneficio	Mejorar o actualizar la infraestructura de protección

Continúa...

Yang y col. (2018)	14 principales puertos de contenedores, Asia	Los daños del INM y la marea de tormenta para menos de 1 año hasta más de 20 años	Se empleó el índice de la rentabilidad para generar resultados	Evaluación de riesgos y seleccionar las medidas de adaptación más rentables
Sierra (2019)	47 puertos catalanes, España	INM entre los 0.36 m y 1.80 m para diferentes periodos hasta el año 2100	Aproximadamente de 39 mil dólares a 3 millones de dólares*	La construcción o elevación del rompeolas
Hanson y Nicholls (2020)	Nivel mundial	Se analizaron los efectos del aumento de la temperatura global entre 2 °C y 4 °C con sus implicaciones en el INM para el año 2050	223 000 a 768 000 millones de dólares	Expansión y la adaptación de las infraestructuras portuarias ante el cambio climático
Jebbad y col. (2022)	Marruecos	1.8 m para el año 2100	Aproximadamente 42 millones de dólares*	Elevación de los muelles de cada terminal del puerto y la estimación debido a la inoperatividad
Winckler y col. (2022)	Chile	INM entre los 0.12 m a 2 m para diferentes periodos hasta el año 2100	2 a 38 millones de dólares	Evaluación de los costos económicos debido al tiempo de inoperatividad

*Tasa de cambio de acuerdo al año de publicación.

en su estudio realizan cálculos a nivel mundial, y no en ubicaciones específicas (Tabla 4).

Con respecto a las estrategias de mitigación y adaptación que fueron propuestas en los diferentes estudios, las soluciones varían desde la construcción de nuevas infraestructuras, como diques y rompeolas, hasta la mejora o adaptación de infraestructuras existentes. En el caso de los estudios realizados en Israel por Zviely y col. (2015) y DiSegni y col. (2017) se destacó la importancia de la construcción, renovación o ampliación de las estructuras marinas como una medida clave para reducir los impactos del INM. Estas estrategias, aunque costosas, son esenciales para mantener la operatividad de los puertos y proteger las comunidades costeras de los efectos adversos del cambio climático.

La eficacia de estas estrategias depende en gran medida de la correcta evaluación de los

riesgos y de la implementación oportuna de las medidas de adaptación. En este sentido, el estudio de Yang y col. (2018) sobre los puertos de contenedores en Asia es especialmente relevante, ya que utiliza un índice de rentabilidad para seleccionar las medidas de adaptación más efectivas. Dicho enfoque cuantitativo no solo optimiza la asignación de recursos, sino que también asegura que las inversiones en adaptación generen el mayor retorno posible en términos de reducción de riesgos y protección de los activos.

Algunos estudios como el de Aerts y col. (2018) en Los Ángeles, Estados Unidos, recalcan la necesidad de combinar medidas estructurales, como la construcción de diques y con enfoques no estructurales, la restauración de dunas, para ofrecer una protección integral contra el INM. Esta combinación de estrategias sugiere que las soluciones más efectivas serán aquellas que integren una variedad de en-

foques, adaptados a las características específicas de cada puerto y región.

Los costos estimados para la adaptación por el INM tienen importantes implicaciones económicas y sociales. Los altos costos proyectados para algunos puertos, especialmente en países desarrollados, como por ejemplo en Estados Unidos, Dinamarca y Japón, indican que los recursos necesarios para la adaptación podrían ser elevados, lo que plantea desafíos para la financiación de estas medidas. Sin embargo, los beneficios de estas inversiones, en términos de reducción de riesgos y protección de la infraestructura crítica, son sustanciales y justifican los costos.

A través del paso del tiempo, la problemática del INM en los puertos ha sido multifacética, involucrando no solo el impacto físico y estructural sino también consideraciones económicas y de planificación a largo plazo para atender las necesidades de protección en cada país. Es relevante mencionar que en 2014

se presentó el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5), el cual sigue siendo crucial debido que se recalcó la importancia de contar con una mejor evaluación de los costos ante los desastres naturales. Este informe impulsó la investigación sobre metodologías para disminuir los impactos del cambio climático a nivel mundial (IPCC, 2014). Además, la influencia de este informe es evidente en la concentración de publicaciones en esos años, ya que proporcionó un marco científico y una urgencia que catalizaron la investigación y la implementación de estrategias más robustas para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Los métodos identificados en las publicaciones emergen como mecanismos fundamentales para el cálculo de los costos. Por lo tanto, son esenciales para generar información de gran utilidad para la toma de decisiones en el contexto de la gestión portuaria, sin embargo, según los autores cada uno tiene sus ventajas y limitaciones (Tabla 5). Es importante señalar que la combinación de varios métodos em-

■ **Tabla 5. Ventajas y limitaciones de los métodos empleados en los estudios.**

Table 5. Advantages and limitations of the methods used in the studies.

Características de su empleo	Ventajas	Limitaciones
Analíticos		
Evaluación de las causas de determinados fenómenos con el fin de conocer sus características generales y particulares mediante la aplicación de algoritmos	Ofrecen una comprensión detallada de los acontecimientos identificados y pueden mejorar la precisión de las estimaciones	Las fallas en su medición pueden afectar la validez de los resultados generados
Empíricos		
Permiten reunir información por medio de la observación científica de distintos fenómenos	Al emplear datos observacionales directos se puede aumentar la confiabilidad de las estimaciones en contextos específicos	Generalmente dependen de factores contextuales específicos, por lo cual, pueden no ser replicables en otros entornos
Numéricos		
Engloban las herramientas útiles para generar soluciones eficientes y prácticas en el diseño de ingeniería costera sobre problemas complejos que no pueden resolverse analíticamente	Contribuyen a enfrentar los problemas que analíticamente son demasiado difíciles de resolver al considerar múltiples variables dinámicas	Para su implementación se ocupan recursos computacionales específicos, esto puede suponer una barrera tecnológica para los usuarios

Continúa...

Estadísticos		
Se utilizan para analizar y recopilar datos por medio de técnicas estadísticas a fin de identificar, describir, estimar parámetros y establecer hipótesis a partir del uso de modelos o fórmulas matemáticas para resolver un problema	Permiten realizar estimaciones rápidas y de gran utilidad para la toma de decisiones	Su capacidad de detectar eventos extremos sin precedentes históricos podría ser insuficiente
Probabilísticos		
Estimar diferentes posibilidades, de acuerdo con una distribución de parámetros inciertos, con la finalidad de conocer su comportamiento en un determinado periodo mediante el uso de modelos matemáticos	Ayudan a modelar la incertidumbre mediante la elaboración de evaluaciones bajo diferentes condiciones climáticas futuras	Necesitan información detallada y de alta calidad para ser efectivos, lo que puede ser un desafío en algunas regiones

pleados en algunos de los estudios ofrece una perspectiva y fortaleza única que, cuando se integran, pueden proporcionar una comprensión más completa y robusta del fenómeno estudiado.

Cada tipo de costos tiene sus ventajas y limitaciones al momento de planear su implementación (Tabla 6). El análisis de los costos no solamente permite una mejor gestión de recursos, sino que también ayuda a optimizar

■ **Tabla 6. Ventajas y limitaciones de los tipos de costos.**
 Table 6. Advantages and limitations of the types of costs.

Costos	Ventajas	Limitaciones
Adaptación		
Abarcan la construcción y mantenimiento de las estructuras de protección del puerto, con el propósito de reducir el riesgo de una inundación derivada del INM, así como también el desarrollo de nuevas áreas portuarias para enfrentar y adaptarse ante el cambio climático	Proporcionan una asignación eficiente de recursos y facilitan la aplicación de las medidas preventivas que pueden reducir de gran manera los daños	Las proyecciones a muy largo plazo pueden ser inciertas debido a la variabilidad climática y los cambios en el uso del suelo
Económicos		
Resultan debido al tiempo de inoperatividad o inactividad de un puerto por una inundación, lo que incluye pérdidas directas e indirectas en la economía	Permiten cuantificar los efectos directos e indirectos de la economía local y nacional e internacional	La estimación precisa puede ser muy compleja debido a la necesidad de utilizar múltiples variables económicas

Continúa...

Rentabilidad		
Rendimiento que se obtiene por la inversión realizada en un proyecto, lo cual facilita la aplicación racional de las medidas necesarias para la implementación de las estrategias de adaptación	Ayuda a estimar la eficiencia en el rendimiento de la inversión para la selección de proyectos que tienen un mayor retorno económico	Enfocarse en el rendimiento puede obstaculizar el análisis de las consecuencias sociales y ambientales de las inundaciones
Costo-beneficio		
Para respaldar y justificar las decisiones de inversión en materia de proyectos de infraestructura portuaria con la finalidad de mitigar los daños por el INM	Genera una visión integral de los impactos del INM y justifican la inversión en ámbitos sociales y ambientales, no solo económicos	Se necesitan datos detallados y precisos para ser efectivos al momento de implementar su análisis

la precisión en las estimaciones económicas, asegurando que las decisiones tomadas sean eficientes y sostenibles.

CONCLUSIONES

El impacto económico del INM en los puertos se ha abordado poco en la literatura científica (solo el 12.03 % de los registros encontrados en las bases de datos correspondieron a esta temática) y se ha realizado mediante diferentes estrategias metodológicas analíticas, empíricas, numéricas, estadísticas y probabilísticas; cada una con características particulares y cuya adecuada implementación requiere un enfoque específico y contextualizado. Ante un problema que se considera grave e inminente como es el INM, es conveniente desarrollar y seguir metodologías específicas para cuantificar los costos asociados con las inundaciones provocadas por este fenómeno. Las estimaciones de los costos asociados con el INM variaron ampliamente, según las características socioeconómicas y geográficas de cada región, pero también debido a los diferentes escenarios considerados en las metodologías empleadas. Los tipos de costos, identificados como adaptación, económicos, rentabilidad y el costo-beneficio de infraestructu-

ras portuarias, destacaron la necesidad de establecer acciones oportunas para enfrentar el cambio climático. Por lo tanto, la capacidad de los puertos para mantener su operatividad frente al INM dependerá en gran medida de una adecuada estimación de costos. La implementación de los últimos avances en proyecciones climáticas y en la modelización económica, es vital para garantizar que las decisiones de inversión en infraestructuras portuarias sean eficaces. Esto requiere un compromiso continuo con la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías o enfoques que puedan mejorar la resiliencia de los puertos ante el INM y para ello, es esencial que los futuros estudios en este ámbito continúen refinando las metodologías existentes y el alcance de las investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de esta investigación, Luis Jesús Rodríguez Aguilar agradece el apoyo por la Beca otorgada al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Aerts, J. C., Barnard, P. L., Botzen, W., Grifman, P., Hart, J. F., De-Moel, H., Mann, A. N., de-Ruig, L. T., & Sadrpour, N. (2018). Pathways to resilience: adapting to sea level rise in Los Angeles. *Annals*

of the *New York Academy of Sciences*, 1427, 1-90. <https://doi.org/10.1111/nyas.13917>

Amer, R. (2024). Assessing vulnerability and enhancing resilience of port systems in southeast Texas facing sea-level rise. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1369833. <https://www.doi.org/10.3389/fbuil.2024.1369833>

Asariotis, R., Benamara, H., & Mohos, V. (2018). Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation. UNCTAD. Research Paper No. 18. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28176.66569>. Fecha de consulta: 21 de agosto de 2023.

Becker, A., Hippe, A., & Mclean, E. L. (2017). Cost and Materials Required to Retrofit US Seaports in Response to Sea Level Rise: A Thought Exercise for Climate Response. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3),44. <https://doi.org/10.3390/jmse5030044>

Bosello, F., & De-Cian, E. (2014). Climate change, sea level rise, and coastal disasters. A review of modeling practices. *Energy Economics*, 46, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.002>

Brown, S., Jenkins, K., Goodwin, P., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Tol, R. S. J., Jenkins, R., Warren, R., Nicholls, R. J., Jevrejeva, S., Sanchez, A., & Haigh, I. D. (2021). Global costs of protecting against sea-level rise at 1.5 to 4.0 °C. *Climatic Change*, 167, 4. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03130-z>

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, 117-130. <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000252>

DiSegni, D. M., Bitan, M., & Zviely, D. (2017). Assessing the costs for adaptation of marine constructions to sea-level rise. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(11), 2056-2070. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1272441>

El-Raey, M. E., Dewidar, K., & El-Hattab, M. (1999). Adaptation to the Impacts of Sea Level Rise in Egypt. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 343-361. <https://doi.org/10.1023/A:1009684210570>

Ehsan, S., Begum, R. A., Nor, N. G. M., & Maulud, K. N. A. (2019). Current and potential impacts of sea level rise in the coastal areas of Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 228, 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/228/1/012023>

Galiatsatou P., Makris C., & Prinos P. (2018). Optimized Reliability Based Upgrading of Rubble Mound Breakwaters in a Changing Climate. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 92. <https://doi.org/10.3390/jmse6030092>

Gracia, V., Sierra, J. P., Gómez, M., Pedrol, M., Sampé, S., García-León, M., & Gironella, X. (2019). Assessing the impact of sea level rise on port operability using LiDAR-derived digital elevation models. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111318>

Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., & Wood, R. M. (2011). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*, 104, 113-137. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9978-3>

Haigh, I. D., Wadey, M. P., Wahl, T., Ozsoy, O., Nicholls, R. J., Brown, J. M., Horsburgh, K., & Gouldby, B. (2016). Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK. *Scientific Data*, 3, 160107. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.107>

Hanson, S. E. & Nicholls, R. J. (2020). Demand for Ports to 2050: Climate Policy, Growing Trade and the Impacts of Sea-Level Rise. *Earth's Future*, 8, e2020EF001543. <https://doi.org/10.1029/2020EF001543>

Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jiménez, J. A., Vafeidis, A. T., & Nicholls, R. J. (2019). Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environmental Research Communications*, 1, 071006. <https://www.doi.org/10.1088/2515-7620/ab1871>

Hoshino, S., Esteban, M., Mikami, T., Takagi, H., & Shibayama, T. (2016). Estimation of increase in storm surge damage due to climate change and sea level rise in the Greater Tokyo area. *Natural Hazards*, 80, 539-565. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1983-4>

IPCC, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (1992). Cambio Climático: Las Evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf. Fecha de consulta: 20 de julio de 2023.

IPCC, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. [Archivo PDF]. [En línea]. Dispo-

nible en: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf. Fecha de consulta: 8 de noviembre de 2023.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). Summary for Policymakers. En H. O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, & A. Okem (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-33). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Fecha de consulta: 17 de julio de 2023.

Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Vigh, J. L., & Stenek, V. (2021). Climate change risk to global port operations. *Nature Climate Change*, 11, 14-20. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00937-z>

Jebbad, R., Sierra, J. P., Mösso, C., Mestres, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2022). Assessment of harbour inoperability and adaptation cost due to sea level rise. Application to the port of Tangier-Med (Morocco). *Applied Geography*, 138, 102623. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102623>

Jevrejeva, S., Grinsted, A., & Moore, J. C. (2014). Upper limit for sea level projections by 2100. *Environmental Research Letters*, 9, 104008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104008>

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Muis, S., Nicholls, R. J., Lincke, D., & Hinkel, J. (2020). Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Scientific Reports*, 10, 11629. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>

Kontogianni, A., Damigos, D., Kyrtzoglou, T., Tourkoulas, C., & Skourtos, M., (2018). Development of a composite climate change vulnerability index for small craft harbours. *Environmental Hazards*, 18, 173-190. <https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1512469>

Krippendorff, K. (1990). Metodología de análisis de contenido. Teoría y práctica. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.media3turdera.com.ar/mediosyrealidad/Klaus-krippendorff.pdf>. Fecha de consulta: 20 de julio de 2023.

McEvoy, S., Haasnoot, M., & Biesbroek, R. (2021). How are European countries planning for sea level rise? *Ocean & Coastal Management*, 203, 105512. <https://www.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105512>

Messner, S., Moran, L., Reub, G., & Campbell, J. (2013). Climate change and sea level rise impacts at Ports and a consistent methodology to evaluate vulnerability and risk. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 169, 141-153. <https://doi.org/10.2495/CP130131>

Mudronja, G., Jugović, A., & Škalamera-Alilović, D. (2020). Seaports and Economic Growth: Panel Data Analysis of EU Port Regions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 1017. <https://doi.org/10.3390/jmse8121017>

Munim, Z. H. & Schramm, H. J. (2018). The impacts of port infrastructure and logistics performance on economic growth: the mediating role of maritime trade. *Journal of Shipping and Trade*, 3, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0027-0>

Nazarnia, H., Nazarnia, M., Sarmasti, H., & Wills, W. O. (2020). A Systematic Review of Civil and Environmental Infrastructures for Coastal Adaptation to Sea Level Rise. *Civil Engineering Journal*, 6, 1375-1399. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091555>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Ghanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... y Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Portillo, J. N., Negro-Valdecantos, V., & del-Campo, J. M. (2022). Review of the Impacts of Climate Change on Ports and Harbours and Their Adaptation in Spain. *Sustainability*, 14, 7507. <https://doi.org/10.3390/su14127507>

PNUD-INECC, United Nations Development Programme-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). Impacto de la elevación del nivel del mar en la superficie y línea de costa de 35 islas pobladas y prioritarias de México. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: https://datos.abiertos.inecc.gob.mx/Datos_abiertos_INECC/CGA

CC/DocumentosRIslasMarias/Eje3_ImpactosDelCambioClimaticoEnTerritorioInsularMexicano/EstudiosAguirreEtAl/IslasMarLineaDeCosta.pdf. Fecha de consulta: 12 de julio de 2023.

Reyes-Bonilla, H., Diaz-Castro, S. C. y González-Baheza, A. (2020). El incremento del nivel del mar: afectación en costas mexicanas. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2241/1/CapituloReyes-BonillaDiaz-CastroGonzalez-Baheza2020.pdf>. Fecha de consulta: 12 de julio de 2023.

Ribeiro, A. S., Lopes, C. L., Sousa, M. C., Gómez-Gesteira, M., Vaz, N., & Dias, J. M. (2023). Reporting Climate Change Impacts on Coastal Ports (NW Iberian Peninsula): A Review of Flooding Extent. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 477. <https://doi.org/10.3390/jmse11030477>

Saizar, A. (1997). Assessment of impacts of a potential sea-level rise on the coast of Montevideo, Uruguay. *Climate Research*, 9, 73-79. <https://doi.org/10.3354/cr009073>

Sierra, J. P. (2019). Economic Impact of Overtopping and Adaptation Measures in Catalan Ports Due to Sea Level Rise. *Water*, 11(7), 1440. <https://doi.org/10.3390/w11071440>

Sriver, R. L., Lempert, R. J., Wikman-Svahn, P., & Keller, K. (2018). Characterizing uncertain sea-level rise projections to support investment decisions. *PLoS ONE*, 13(2), 0190641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190641>

Taherkhani, M., Vitousek, S., Barnard, P. L., Frazer, N., Anderson, T. R., & Fletcher, C. H. (2020). Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency. *Scientific Reports*, 10, 6466. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62188-4>

Tebaldi, C., Ranasinghe, R., Vousdoukas, M., Rasmussen, D. J., Vega-Westhoff, B., Kirezci, E., Kopp, R. E., Sriver, R., & Mentaschi, L. (2021). Extreme sea levels at different global warming levels". *Nature Climate Change*, 11, 746-751. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01127-1>

UNCTAD, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (2022). Informe sobre el transporte marítimo. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022overview_es.pdf. Fecha de consulta: 27 de julio de 2023.

Verschuur, J., Koks, E. E., & Hall, J. W. (2022).

Ports' criticality in international trade and global supply-chain". *Nature Communications*, 13, 4351. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32070-0>

Verschuur, J., Koks, E. E., Li, S., & Hall, J. W. (2023). Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses. *Communications Earth & Environment*, 4, 5. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00656-7>

Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., & Sactic, M. I. (2022). Impacts in ports on a tectonically active coast for climate-driven projections under the RCP 8.5 scenario: 7 Chilean ports under scrutiny. *Coastal Engineering Journal*, 64, 387-405. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2088194>

Yang, Z., Ng, A. K. Y., Lee, P. T. W., Wang, T., Qu, Z., Sanchez-Rodrigues, V., Pettit, S., Harris, I., Zhang, D., & Lau, Y. Y. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444-458. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.004>

Zviely, D., Bitan, M., & DiSegni, D. M. (2015). The effect of sea-level rise in the 21st century on marine structures along the Mediterranean coast of Israel: An evaluation of physical damage and adaptation cost. *Applied Geography*, 57, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.12.007>