

Ciudades portuarias, sostenibilidad y gestión de los ecosistemas marinos: un enfoque basado en indicadores y su implementación en puertos mexicanos.

Dr. Etelberto D. Serrano Flores. eserrano@imt.mx

Investigador de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México. C.P. 76703.

Resumen

Las ciudades portuarias constituyen espacios estratégicos donde convergen actividades económicas, infraestructura, urbanización, transporte marítimo y ecosistemas costeros. Su importancia para el comercio internacional es indiscutible; sin embargo, la expansión portuaria y urbana también genera presiones significativas sobre los ecosistemas marinos y sobre las comunidades que dependen de ellos. El trabajo de Ogara et al. (2023), publicado en *Frontiers in Marine Science*, propone un marco basado en indicadores para evaluar la sostenibilidad de las ciudades portuarias y la gestión marina en países del Sur Global.

El estudio identifica una importante limitación en la literatura científica: los marcos existentes para evaluar la sostenibilidad de las ciudades portuarias han sido desarrollados predominantemente en países del Norte Global y, por tanto, no siempre consideran las condiciones socioeconómicas, ambientales, institucionales y territoriales de los países en desarrollo. Para superar esta limitación, los autores proponen un sistema de 78 indicadores estructurado mediante el modelo DPSIR — fuerzas impulsoras, presiones, estado, impactos y respuestas— y complementado mediante una red causal. El análisis permitió identificar 12 redes DPSIR prioritarias y relacionarlas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (Ogara et al. 2023).

El principal aporte del estudio consiste en plantear que la sostenibilidad de una ciudad portuaria no puede evaluarse únicamente mediante variables económicas como el volumen de carga o la eficiencia logística. Es necesario incorporar simultáneamente la calidad ambiental, la biodiversidad, el uso del suelo, la contaminación, el bienestar social, la gobernanza y las interacciones entre tierra y mar.

Palabras clave: ciudades portuarias; sostenibilidad; ecosistemas marinos; gobernanza ambiental; DPSIR; indicadores ambientales.

1. Introducción

Los océanos constituyen uno de los principales sistemas de soporte de las sociedades humanas. Además de proporcionar alimentos, biodiversidad y servicios ecosistémicos, funcionan como vías fundamentales para el transporte internacional de mercancías. De acuerdo con el estudio analizado, aproximadamente el 80 % del comercio mundial se realiza por vía marítima (Zheng et al. 2020).

Esta situación convierte a las ciudades portuarias en nodos estratégicos de la economía mundial. En ellas se concentran puertos, industrias, carreteras, ferrocarriles, centros logísticos, zonas habitacionales y actividades comerciales. Esta concentración produce importantes beneficios económicos, pero simultáneamente genera conflictos entre desarrollo económico, urbanización y conservación ambiental.

El problema es particularmente relevante en los países en donde muchas ciudades portuarias experimentan procesos acelerados de urbanización y expansión de infraestructura. La ampliación de muelles, el dragado, la recuperación de terrenos al mar, el incremento del tráfico terrestre y marítimo, la generación de residuos y las emisiones contaminantes pueden alterar significativamente los ecosistemas costeros.

Por ello, la sostenibilidad portuaria requiere superar una visión exclusivamente económica y adoptar un enfoque socio-ecológico integrado, Hiranianiani V., (2014).

El artículo *An indicator-based approach to assess sustainability of port-cities and marine management in the Global South*, de Ogara et al. (2023) representa una contribución importante en esta dirección, al considerar a la ciudad y al puerto como un sistema conectado con el ambiente marino, en lugar de analizarlos como entidades independientes.

2. El problema de las ciudades portuarias

Una ciudad portuaria puede entenderse como un sistema territorial donde interactúan dos grandes componentes: el sistema portuario y el sistema urbano.

El primero está asociado con:

- transporte marítimo;
- comercio internacional;
- infraestructura portuaria;
- movimiento de mercancías;

- logística;
- industrias;
- eficiencia operacional.

El segundo comprende:

- población;
- vivienda;
- empleo;
- actividades económicas;
- infraestructura urbana;
- servicios;
- movilidad;
- calidad de vida.

Ambos sistemas se encuentran conectados por una zona de transición tierra-mar particularmente dinámica. El crecimiento de uno puede generar transformaciones en el otro.

La expansión de un puerto, por ejemplo, puede aumentar el empleo y la actividad económica, pero también provocar ocupación de terrenos costeros, incremento del tráfico, contaminación atmosférica, descargas de aguas residuales, generación de residuos y pérdida de hábitats.

Ogara et al. (2023), señala que los estudios tradicionales sobre desarrollo portuario han tendido a utilizar indicadores económicos y logísticos, como la población y el volumen de carga, mientras que las funciones ecológicas del océano han recibido menor atención.

Esta limitación es particularmente importante cuando se pretende evaluar ciudades portuarias de países en desarrollo.

3. Una limitación de los actuales sistemas de evaluación

Uno de los resultados más relevantes de la investigación es la identificación de un fuerte sesgo geográfico en la literatura científica.

En su artículo *An indicator-based approach to assess sustainability of port-cities and marine management in the Global South*, Ogara et al. (2023), los autores realizaron

una búsqueda sistemática utilizando bases de datos académicas, particularmente Scopus. Inicialmente identificaron 1,666 artículos según los criterios de búsqueda establecidos y posteriormente registraron 1,934 publicaciones asociadas con diferentes combinaciones de términos relacionados con ciudades portuarias, sostenibilidad, interacción tierra-mar y monitoreo ambiental (Ogara et al. 2023).

El análisis mostró una marcada concentración de investigaciones en países del Norte Global. Estados Unidos, China y Canadá aparecieron entre los países con mayor número de publicaciones relacionadas con sistemas de ciudades portuarias, mientras que numerosas regiones del Sur Global presentaron una producción científica mucho menor. En la región del océano Índico occidental, Sudáfrica fue el país con mayor representación científica.

Este resultado tiene una consecuencia importante: un indicador diseñado para evaluar la sostenibilidad de una ciudad portuaria europea, norteamericana o australiana no necesariamente representa adecuadamente la realidad de una ciudad portuaria africana, latinoamericana o asiática.

Las diferencias económicas, institucionales, demográficas, ambientales y territoriales condicionan la manera en que deben evaluarse los procesos de sostenibilidad.

4. El modelo DPSIR como herramienta de análisis

El principal componente metodológico del trabajo de Ogara et al. (2023) es el modelo DPSIR:

- D — Drivers: fuerzas impulsoras
- P — Pressures: presiones
- S — State: estado
- I — Impacts: impactos
- R — Responses: respuestas

Este modelo permite representar una cadena causal entre las actividades humanas y las modificaciones ambientales.

4.1 Fuerzas impulsoras

Las fuerzas impulsoras representan las actividades sociales y económicas que generan cambios.

En una ciudad portuaria pueden incluir:

- crecimiento demográfico;
- comercio internacional;
- industrialización;
- expansión urbana;
- crecimiento del transporte;
- incremento del movimiento de contenedores;
- desarrollo de infraestructura.

El crecimiento económico y comercial constituye, por tanto, una de las principales fuerzas detrás de la expansión portuaria.

4.2 Presiones

Las fuerzas impulsoras producen presiones ambientales.

Entre ellas se encuentran:

- emisiones de CO₂;
- contaminación atmosférica;
- descargas industriales;
- aguas residuales;
- residuos sólidos;
- dragado;
- tráfico marítimo y terrestre;
- ocupación de terrenos;
- transformación de hábitats.

En su artículo Ogara et al. (2023) destaca que la contaminación representa una de las principales presiones asociadas al crecimiento de puertos y ciudades.

4.3 Estado ambiental

El estado describe las condiciones físicas, químicas y biológicas del sistema.

Entre los indicadores relevantes se encuentran:

- calidad del agua;
- estado de los ecosistemas;

- biodiversidad;
- condiciones de los hábitats;
- calidad del aire;
- disponibilidad de recursos marinos.

Este componente es fundamental porque permite determinar si las presiones están produciendo modificaciones detectables en el ecosistema.

4.4 Impactos

Los cambios ambientales pueden producir impactos ecológicos y sociales.

Entre ellos:

- pérdida de biodiversidad;
- deterioro de hábitats;
- reducción de recursos pesqueros;
- afectaciones a la salud humana;
- conflictos por el uso del territorio;
- disminución de servicios ecosistémicos.

Los autores Ogara et al. (2023) destacan particularmente la vulnerabilidad de ecosistemas como manglares, arrecifes coralinos y praderas de pastos marinos frente a la expansión de infraestructura portuaria.

4.5 Respuestas

Finalmente, las respuestas representan las acciones de la sociedad y de las instituciones.

Pueden incluir:

- políticas ambientales;
- regulación;
- planificación territorial;
- gestión de residuos;
- reducción de emisiones;
- infraestructura verde;

- monitoreo ambiental;
- cooperación entre autoridades;
- participación comunitaria.

Este componente transforma el diagnóstico científico en instrumentos potenciales de política pública.

5. Los cuatro pilares de la sostenibilidad portuaria

El marco desarrollado por Ogara et al. (2023) integra cuatro grandes dimensiones:

Economía

Considera aspectos como:

- contribución económica del puerto;
- eficiencia;
- transporte;
- infraestructura;
- generación de empleo.

Sociedad y cultura

- Incluye:
- población;
- empleo;
- relaciones puerto-ciudad;
- participación comunitaria;
- patrimonio y cultura.

Medio ambiente y ecología

Integra:

- contaminación atmosférica;
- contaminación marina;
- calidad del agua;
- residuos;

- dragado;
- biodiversidad;
- cambio climático;
- ecosistemas.

Gobernanza

Considera:

- legislación;
- políticas públicas;
- instituciones;
- coordinación entre actores;
- mecanismos de participación;
- ética y transparencia.

Chen y Lam (2018), sostienen que la incorporación de la gobernanza como una cuarta dimensión resulta fundamental para la gestión sostenible de sistemas costeros y marinos.

6. Los 78 indicadores propuestos

Uno de los principales resultados del estudio es el desarrollo de un sistema compuesto por 78 indicadores destinados a identificar y reportar las complejas interdependencias entre tierra y mar (Ogara et al. 2023).

Estos indicadores permiten pasar de una concepción abstracta de la sostenibilidad hacia un sistema potencialmente medible.

El valor del enfoque no radica únicamente en la cantidad de indicadores, sino en la posibilidad de relacionarlos causalmente.

Por ejemplo:

Crecimiento del comercio → aumento del tráfico portuario → expansión de infraestructura → incremento del consumo energético → mayores emisiones → deterioro de la calidad ambiental → impactos sobre ecosistemas y población → necesidad de nuevas políticas ambientales.

Esta secuencia demuestra que los problemas ambientales portuarios no son fenómenos aislados.

Tabla 1.

Indicadores de sostenibilidad Puerto-Ciudad

Marco DPSIR: Indicadores de Sostenibilidad Puerto-Ciudad y Metas ODS Modelo Integrado de Impulsores, Presiones, Estados, Impactos y Respuestas con Alineación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)				
1. IMPULSORES (DRIVERS)	2. PRESIONES (PRESSURES)	3. ESTADOS (STATES)	4. IMPACTOS (IMPACTS)	5. RESPUESTAS E IMPACTO EN ODS
Rendimiento anual del puerto de contenedores (mTEU)	Área total de terreno ganado al mar en la puerto-ciudad (km²)	Área total protegida para la conservación marina	% Cambio anual de cobertura de manglares / praderas marinas	Planes / Sistemas de Gestión Ambiental Portuaria ODS 12.2 ODS 14.2
% Tasa de expansión portuaria (superficie terrestre km²)	Volumen de agua de lastre no tratada emitida (m³)	Área total de hábitats seminaturales (arrecifes de coral / praderas marinas)	Área de cobertura saludable de manglares / arrecifes / praderas (km²)	Políticas / Planes de Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC) ODS 12.1 ODS 14.c ODS 15.9
Longitud máxima de atracadero (m)	Volumen de descarga de aguas residuales industriales (m³)	% Basura marina en el océano	% Tasa anual de erosión costera	Planes de Desarrollo y Expansión Portuaria ODS 9.1, 9.2, 9.4 ODS 12.2
% Economía nacional basada en industrias portuarias y marítimas	Volumen de aguas residuales domésticas de la puerto-ciudad (m³)	% Desembarque anual de pesca	Calidad del agua costera cercana a la orilla	Políticas promulgadas para el Uso Sostenible y Conservación del Océano ODS 14.1, 14.2
% Empleo relacionado con el puerto	Volumen de tráfico en autopistas y carreteras principales costeras	Número de especies por tipo de hábitat	% Tasa de eutrofización	Planes de Indicadores de Puerto Verde (Green Port) ODS 9.2 ODS 12.5
Producto Interno Bruto (PIB) Directo del Turismo	Emisiones de CO ₂ per cápita	% Carga portuaria transportada por carretera	% Captura incidental (by-catch) anual de peces	Planes de Desarrollo Urbano / Zonificación Puerto-Ciudad ODS 11.3, 11.6, 11.a
% Economía puerto-ciudad basada en pesca de altura	Emisiones de CO ₂ de los buques (puerto y fondeadero)	% Carga portuaria transportada por ferrocarril	Cambio en la temperatura de la superficie marítima	Certificación y Planes de Gestión de Agua de Lastre ODS 6.3, 6.5 ODS 15.8
% Economía puerto-ciudad basada en pesca costera	Índice de Calidad del Aire (contaminantes PM2.5, PM10)	Área de espacio verde per cápita	Proyección de cambio anual del nivel del mar	Zonas de Gestión de Dragado ODS 14.1, 14.2
% Tasa de crecimiento anual del PIB	Volumen de sedimentos/limo de actividades de dragado (m³)	Número de parques urbanos	% Tasa de desempleo poblacional	Planes de Gestión Pesquera ODS 14.b
Nº de empresas de conservación del patrimonio y cultura marítima	% Tasa de cambio de áreas protegidas	Esperanza de vida en la ciudad portuaria	% Tasa de cambio de terreno edificado (km²)	Modelo de Gestión Portuaria Tipo Arrendatario (Landlord Port) ODS 17.17 ODS 16.6, 16.7
Área urbana de la ciudad portuaria (km²)	% Tasa de crecimiento poblacional	Población de la ciudad portuaria	Emisiones de CO ₂ de camiones de acceso al puerto (Mt)	
Tasa anual de contenerización (%)	% Tasa de crecimiento poblacional	Estado de las reservas pesqueras costeras	Emisiones de CO ₂ por operaciones ferroviarias (Mt)	
	Número de especies costeras en la Lista Roja de la UICN	Longitud de conexión vial efectiva con el puerto	Volumen de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del puerto (Mt)	
	Proporción de tierra agrícola cultivada intensivamente	Longitud de conexión ferroviaria efectiva con el puerto	Número de eventos de inundación en la puerto-ciudad	
	% Tasa de intensidad de uso del suelo	% Tasa de urbanización		
		Número de eventos meteorológicos extremos		

Fuente: Adaptado de Ogara et al. (2023)

7. La red causal y las interdependencias

Para complementar el DPSIR, los investigadores Ogara et al. (2023) utilizaron una Red Causal (Causal Network, CN).

Esta herramienta permite identificar relaciones entre indicadores y comprender cómo un cambio en una variable puede afectar otras, (Bell y Morse 2018).

El análisis identificó 12 redes DPSIR prioritarias, lo cual constituye una de las aportaciones metodológicas más importantes del artículo, porque evita interpretar los indicadores de forma independiente, (Gari, S. R., Newton, A., e Icely, J. D. 2015).

Por ejemplo, aumentar la eficiencia portuaria puede ser económicamente positivo, pero si el aumento de actividad produce mayores emisiones, residuos y pérdida de hábitat, el resultado global podría ser ambientalmente negativo.

Por tanto:

La sostenibilidad no debe medirse únicamente por el desempeño individual de cada indicador, sino por las interacciones entre indicadores.

8. El conflicto entre crecimiento económico y conservación ambiental

Ogara et al. (2023), plantean una cuestión fundamental: el desarrollo portuario puede generar simultáneamente beneficios económicos y costos ambientales.

La actividad portuaria puede incrementar el comercio, generar empleos y estimular la economía regional. Sin embargo, la misma actividad puede aumentar:

- emisiones;
- tráfico;
- contaminación;
- consumo energético;
- generación de residuos;
- presión sobre los ecosistemas;
- ocupación del territorio.

Por ejemplo, el crecimiento de la infraestructura puede requerir recuperación de terrenos al mar, modificación de la línea costera o ampliación de muelles.

En el contexto analizado por los autores (Ogara et al. (2023), la expansión portuaria puede reducir áreas de hábitats naturales y generar impactos sobre manglares, arrecifes y praderas marinas.

Por ello, el concepto de desarrollo sostenible exige incorporar los costos ambientales dentro de la planificación económica (Hiranandi V., 2014).

9. La importancia de la economía circular

Una ciudad portuaria sostenible no debería limitarse a reducir impactos, sino avanzar hacia sistemas capaces de:

- reducir el consumo de materias primas;
- reutilizar materiales;
- recuperar residuos;

- aprovechar subproductos;
- mejorar la eficiencia energética;
- disminuir emisiones;
- utilizar energías renovables;
- recuperar ecosistemas;
- cerrar ciclos de agua y materiales.

La gestión de residuos portuarios constituye, en este contexto, una oportunidad particularmente importante.

Los puertos concentran grandes cantidades de materiales, combustibles, mercancías, embalajes, residuos industriales y aguas residuales. Transformar estos flujos lineales en ciclos de recuperación podría generar simultáneamente beneficios económicos y ambientales. Ducruet, C., y Berli, J. (2018).

Así, la ciudad portuaria puede evolucionar desde un modelo:

extraer → producir → transportar → consumir → desechar

hacia:

extraer menos → producir eficientemente → utilizar → recuperar → reutilizar → regenerar.

10. Relevancia para México y América Latina

México cuenta con ciudades portuarias que albergan importantes actividades comerciales, industriales, pesqueras y turísticas. Entre ellas se encuentran Veracruz, Altamira, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Ensenada y otros sistemas urbanos costeros.

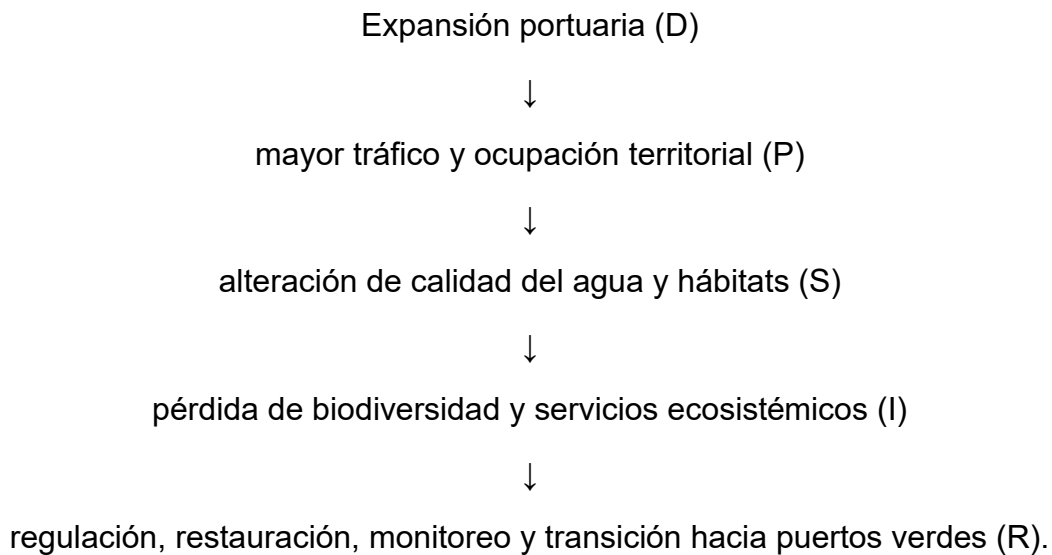
En estos territorios pueden presentarse problemas similares a los descritos en el artículo:

- expansión urbana;
- crecimiento de infraestructura;
- tráfico de mercancías;
- contaminación;
- generación de residuos;

- presión sobre ecosistemas costeros;
- conflictos por el uso del territorio;
- pérdida de biodiversidad;
- vulnerabilidad climática.

La aplicación de un sistema DPSIR permitiría analizar estos problemas de manera integrada (Gari, S. R., Newton, A., e Icely, J. D. 2015).

Por ejemplo:



Este esquema podría convertirse en una herramienta de planificación para las ciudades portuarias mexicanas.

11. Discusión crítica

El mayor valor del artículo Ogara et al. (2023) no consiste únicamente en presentar 78 indicadores, sino en modificar la forma de entender la ciudad portuaria.

Tradicionalmente, el puerto se ha evaluado como infraestructura económica. El enfoque presentado propone entenderlo como un sistema socio-ecológico tierra-mar.

Esta diferencia conceptual es fundamental.

Una evaluación exclusivamente económica podría considerar positivo el incremento del movimiento de mercancías. Una evaluación ambiental podría identificar simultáneamente un incremento de emisiones y contaminación. Una evaluación social podría detectar aumento del empleo, pero también conflictos territoriales.

La sostenibilidad requiere integrar todas estas dimensiones.

El estudio también pone de manifiesto una limitación importante: los indicadores no pueden aplicarse de manera idéntica en todos los territorios. Los propios autores señalan que cada país y región posee características geográficas, socioculturales y económicas particulares.

Por tanto, el marco debe funcionar como una estructura adaptable y no como una lista universal e inmutable de indicadores.

12. Limitaciones del enfoque

A pesar de sus aportaciones, el estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse.

Primero, el marco es principalmente conceptual y metodológico. Su utilidad práctica dependerá de la disponibilidad de datos confiables para cada ciudad portuaria.

Segundo, algunos indicadores pueden ser difíciles de medir de manera homogénea entre países debido a diferencias en sistemas estadísticos, capacidad institucional y disponibilidad de información.

Tercero, las relaciones causales identificadas mediante redes conceptuales no necesariamente implican causalidad estadística demostrada. Para convertir el marco en una herramienta predictiva sería necesario realizar estudios empíricos longitudinales.

Finalmente, los indicadores ambientales deberían incorporar información suficientemente sensible para detectar cambios ecológicos antes de que se produzcan daños irreversibles.

13. Hacia una nueva generación de puertos sostenibles

El estudio permite plantear una transición desde el concepto tradicional de puerto eficiente hacia el de puerto sostenible y regenerativo.

Un puerto del futuro debería evaluar simultáneamente:

- eficiencia logística;
- productividad económica;
- empleo;
- calidad del aire;

- calidad del agua;
- emisiones de gases de efecto invernadero;
- consumo energético;
- generación de residuos;
- biodiversidad;
- estado de los ecosistemas;
- movilidad urbana;
- bienestar social;
- participación comunitaria;
- gobernanza;
- resiliencia climática.

La integración de estas variables permitiría desarrollar auténticos sistemas de puertos verdes, ciudades costeras sostenibles y economías azules circulares.

14. Conclusiones

El artículo *An indicator-based approach to assess sustainability of port-cities and marine management in the Global South* de Ogara et al. (2023) demuestra que la sostenibilidad de las ciudades portuarias debe analizarse desde una perspectiva sistémica que integre economía, sociedad, ambiente y gobernanza.

Su principal contribución es el desarrollo de un marco de 78 indicadores, estructurado mediante el modelo DPSIR y complementado por redes causales, con el objetivo de representar las interdependencias entre tierra, ciudad, puerto y océano (Ogara et al. 2023).

El estudio también identifica una importante brecha de conocimiento: la investigación sobre sostenibilidad de ciudades portuarias está fuertemente concentrada en el Norte Global, mientras que numerosos países del Sur Global todavía cuentan con una base científica y sistemas de monitoreo más limitados.

La conclusión fundamental es que el crecimiento económico y la conservación ambiental no deben tratarse como objetivos independientes. La verdadera sostenibilidad exige diseñar mecanismos capaces de generar prosperidad económica sin comprometer los ecosistemas marinos y costeros.

En este contexto, la gobernanza adquiere una importancia estratégica. Las autoridades portuarias, gobiernos municipales, comunidades, empresas,

investigadores y organizaciones ambientales deben participar en procesos coordinados de planificación.

El océano no debe considerarse únicamente como una vía de transporte o una fuente de recursos. Es también un sistema ecológico esencial para la economía, la salud y el bienestar de las sociedades.

Por ello, el futuro de las ciudades portuarias dependerá de su capacidad para pasar de un modelo basado exclusivamente en crecimiento portuario hacia un modelo de sostenibilidad, economía circular, conservación marina y regeneración ecológica.

Referencias

- Bell, S., y Morse, S. (2018). *Routledge handbook of sustainability indicators* (London and New York: Routledge: Taylor & Francis Group).
- Chen, C., y Lam, J. S. L. (2018). Sustainability and interactivity between cities and ports: a two-stage data envelopment analysis (DEA) approach. *Marit. Pol. Manage.* 45 (7), 1–18. doi: 10.1080/03088839.2018.1450528
- Ducruet, C., y Berli, J. (2018). Measuring land-sea interactions at ports and cities : insights from geomatics and network analysis', *Portus*, 35. Available at: <https://shs.hal.science/halshs-01881554>.
- Gari, S. R., Newton, A., e Icely, J. D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean Coast. Manage.* 103, 63–77. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013
- Hiranandani, V. (2014). Sustainable development in seaports: a multi-case study. *WMU J. Maritime Affairs* 13 (1), 127–172. doi: 10.1007/s13437-013-0040-y
- Ogara, D. A. E., Morishita, J., Davies, P. J., Mbui, M., Gamoyo, M., Njoroge, N., Otieno Chann, I., Senelwa Igesa, B., & Ochieng, S. O. (2023). An indicator-based approach to assess sustainability of port-cities and marine management in the Global South. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1052128>.