

Economía Circular y Optimización de Procesos Logísticos en Puertos y Comunidades Costeras

Circular Economy and Optimization of Logistics Processes in Ports and Coastal Communities

Gutiérrez Jaraba, Johon^{1*}

ORCID: 0000-0002-0704-1732

Fundación Universitaria Antonio de Arévalo - Unitecnar

direccion.proyectos@unitecnar.edu.co

* Autor de correspondencia: Johon Gutiérrez Jaraba, direccion.proyectos@unitecnar.edu.co

Resumen

Cuando un puerto quema, entierra o simplemente exporta como desecho aquello que podría reintroducir en su propia cadena de suministro, no solo desperdicia un recurso: multiplica los viajes, el combustible y las emisiones que ese material tendrá que recorrer antes de convertirse en otra cosa, si es que llega a hacerlo. Este artículo examina, mediante un estudio de caso comparado basado en fuentes académicas verificables, cómo tres puertos europeos (Rotterdam, North Sea Port y Zeebrugge) han rediseñado sus procesos logísticos alrededor de principios de economía circular, y qué implicaciones tiene ese rediseño para las comunidades costeras que los rodean.

Los tres casos comparten un mismo punto de partida conceptual, la simbiosis industrial documentada por Chertow (2000) a partir del caso pionero de Kalundborg, Dinamarca, pero difieren notablemente en su mecanismo central. Rotterdam avanza hacia convertirse en un puerto de 'residuo a valor', con una meta pública de producir 6,3 millones de toneladas anuales de combustibles renovables para 2030, equivalentes al 20% de su volumen fósil de referencia de 2019 (Balz & Qu, 2021). North Sea Port construye su transición mediante un ecosistema de innovación que coordina a más de media docena de actores alrededor de la valorización de CO₂ y la infraestructura de hidrógeno (Andriamanantena et al., 2025). Zeebrugge, un puerto de acceso sin una base industrial tan densa como la de los otros dos, depende en cambio de la proximidad geográfica con clústeres urbanos e industriales para hacer viables sus propios bucles circulares (Courstens et al., 2023).

Un hallazgo transversal, señalado por L'Abate et al. (2026) en un análisis reciente de puertos de la Unión Europea, es que la composición de los órganos de gobierno portuario predice mejor la calidad de la comunicación pública sobre economía circular que el tamaño o la actividad del puerto, lo que sugiere que la optimización logística por sí sola no garantiza una transición circular creíble si no viene acompañada de gobernanza y transparencia.

Palabras clave: economía circular, simbiosis industrial, logística portuaria, comunidades costeras, logística inversa, gobernanza portuaria.

Abstract

When a port burns, buries, or simply exports as waste something it could reintroduce into its own supply chain, it does not merely waste a resource: it multiplies the trips, fuel, and emissions that material will have to travel before becoming something else, if it ever does. This article examines, through a comparative case study grounded in verifiable academic sources, how three European ports (Rotterdam, North Sea Port, and Zeebrugge) have redesigned their logistics processes around circular economy principles, and what this redesign means for the coastal communities surrounding them.

All three cases share the same conceptual starting point, the industrial symbiosis documented by Chertow (2000) from the pioneering Kalundborg, Denmark case, yet they differ notably in their central mechanism. Rotterdam is moving toward becoming a 'waste-to-value' port, with a public target of producing 6.3 million tonnes of renewable fuels annually by 2030, equivalent to 20% of its 2019 fossil reference volume (Balz & Qu, 2021). North Sea Port builds its transition through an innovation ecosystem coordinating more than half a dozen actors around CO2 valorization and hydrogen infrastructure (Andriamanantena et al., 2025). Zeebrugge, a gateway port without as dense an industrial base as the other two, instead depends on geographic proximity to urban and industrial clusters to make its own circular loops viable (Courstens et al., 2023).

A cross-cutting finding, noted by L'Abate et al. (2026) in a recent analysis of European Union ports, is that the composition of port governing bodies predicts the quality of public circular economy communication better than port size or activity does, suggesting that logistics optimization alone does not guarantee a credible circular transition unless accompanied by governance and transparency.

Keywords: circular economy, industrial symbiosis, port logistics, coastal communities, reverse logistics, port governance.

Introducción

Los puertos han funcionado tradicionalmente como puntos de paso: la carga entra, se transforma poco o nada, y sale. Esa lógica lineal empieza a resquebrajarse cuando se le mira de cerca, porque un puerto no solo mueve mercancías nuevas; también recibe, cada día, toneladas de subproductos, chatarra, biomasa, residuos de dragado y calor sobrante que casi siempre se trataron como un problema de disposición final en lugar de como materia prima de otro proceso. La economía circular propone invertir esa mirada, y los puertos, por su concentración de industria pesada y su posición como nodo logístico, resultan un lugar particularmente fértil para intentarlo.

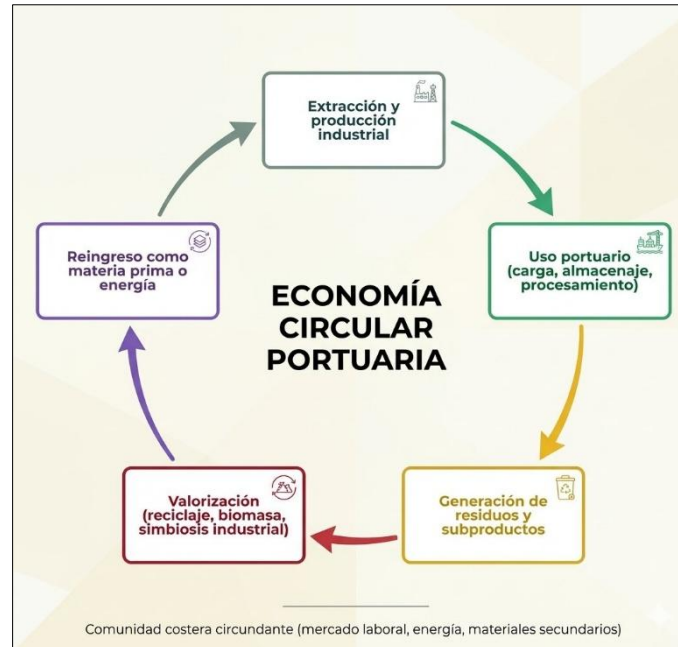
La optimización de procesos logísticos entra en esta ecuación de una forma menos obvia de lo que parece a primera vista. No se trata solo de rutas más cortas o de camiones mejor cargados, aunque eso también importa; se trata de rediseñar el flujo físico de materiales para que un subproducto no tenga que viajar cientos de kilómetros hasta un vertedero cuando la planta que podría reutilizarlo está a menos de un kilómetro de distancia. Esa es, en esencia, la lógica de la simbiosis industrial que Chertow (2000) documentó por primera vez de forma sistemática a partir del caso de Kalundborg, y que sigue siendo el punto de referencia obligado de cualquier discusión sobre economía circular aplicada a clústeres industriales portuarios.

Este artículo compara tres puertos europeos que han llevado esa lógica a la práctica de maneras distintas: Rotterdam, North Sea Port y Zeebrugge. Los tres cuentan con literatura académica reciente que documenta, con cifras y evidencia empírica y no solo con aspiraciones corporativas, cómo han reorganizado sus procesos logísticos alrededor de principios circulares. La pregunta que guía la comparación es directa: ¿qué mecanismo logístico-industrial explica mejor el avance circular de cada puerto, y qué papel juega la comunidad costera circundante en ese avance?

Marco conceptual: de la simbiosis industrial a la economía circular portuaria

La economía circular, en su formulación más simple, propone que los materiales permanezcan en uso el mayor tiempo posible, mediante reutilización, reparación, reciclaje o valorización energética, en lugar de seguir el camino lineal de extraer, producir, usar y desechar. Aplicada a un puerto, esa idea se traduce en un ciclo cerrado que la figura 1 esquematiza: lo que entra como materia prima puede, en teoría, regresar como insumo del siguiente ciclo productivo, en vez de salir del sistema como residuo.

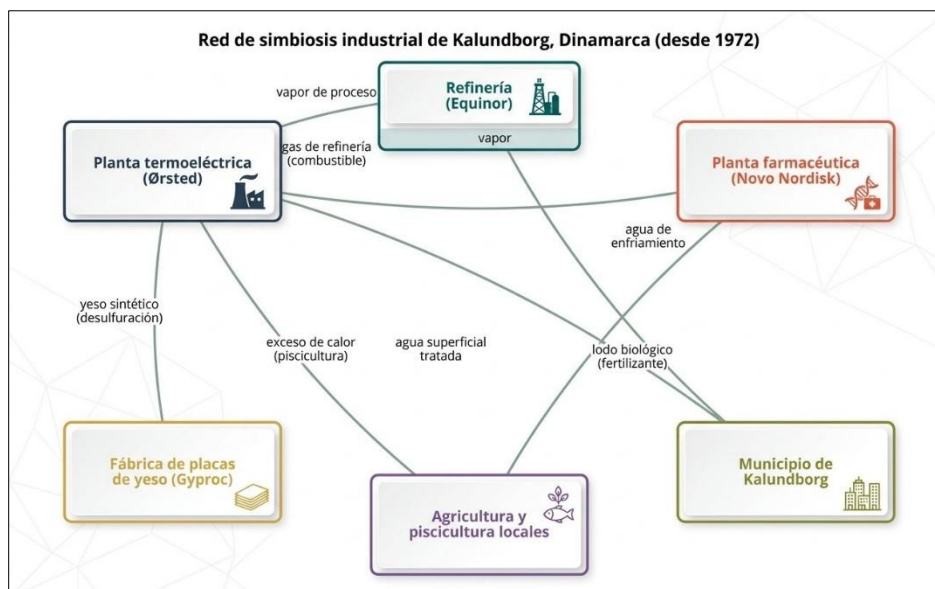
Figura 1. El ciclo de la economía circular en el sistema puerto-comunidad costera.



Fuente. Elaboración propia.

La forma concreta en que ese ciclo se cierra tiene un nombre técnico, simbiosis industrial, y un caso fundacional: Kalundborg, una pequeña ciudad industrial danesa donde, desde comienzos de la década de 1970, una central termoeléctrica, una refinería, una planta farmacéutica y una fábrica de placas de yeso descubrieron que podían intercambiar vapor, gas, yeso sintético y lodos biológicos entre sí, reduciendo de forma simultánea sus costos y su huella ambiental (Chertow, 2000). La figura 2 reconstruye, de forma simplificada, esa red de intercambios, que sigue siendo cuarenta años después el ejemplo más citado de cómo la proximidad geográfica entre industrias puede sustituir logística de residuos por logística de recursos.

Figura 2. Red de simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca.



Fuente. Elaboración propia con base en Chertow (2000).

Trasladar esa lógica de un parque industrial de tierra adentro a un puerto marítimo añade una capa adicional: el puerto no solo alberga industrias que podrían intercambiar subproductos entre sí, también concentra infraestructura de transporte multimodal, marítimo, ferroviario, fluvial y carretero, que puede usarse para mover esos subproductos de forma más eficiente que si cada planta gestionara su logística de residuos por separado. Esa doble condición, clúster industrial y nodo logístico a la vez, es la que convierte a los puertos en candidatos naturales para la economía circular, y es también la que atraviesa los tres casos comparados en este artículo.

Un caso particular de logística inversa: los sedimentos de dragado

Hay un flujo de materiales que casi todo puerto genera y que rara vez aparece en las discusiones sobre economía circular fuera de los círculos técnicos: el sedimento que hay que dragar de forma rutinaria para mantener navegables los canales de acceso. Notteboom et al. (2022), en su análisis de referencia sobre la industria portuaria, documentan que el tratamiento de material de dragado, junto con el calor residual industrial y la recepción de residuos de los buques, constituye uno de los pilares de la gestión de residuos portuaria, y citan como ejemplo el proyecto Amoras del puerto de Amberes, dedicado específicamente a procesar sedimentos contaminados que antes se disponían sin más.

La revisión más reciente de Fratini et al. (2025), que rastrea 2.482 estudios sobre el impacto del dragado publicados entre 1971 y 2025 con una tasa de crecimiento anual del 5%, documenta casos en los que ese sedimento deja de tratarse como residuo: el proyecto Eems-Dollard en los Países Bajos lo reutiliza para restaurar hábitats estuarinos, y el túnel sumergido de Fehmarnbelt, entre Alemania y Dinamarca, se ha propuesto reutilizar el 100% del sedimento excavado durante su construcción. Estos casos no son parte de los tres puertos comparados en este artículo, pero ilustran que la logística circular portuaria no se agota en la energía o los subproductos industriales; también incluye una actividad de mantenimiento tan cotidiana como el dragado, que Barona et al. (2023), en su revisión semisistemática de desarrollos circulares en puertos industriales marítimos europeos, identifican como una de las prácticas más extendidas pero menos visibilizadas del sector.

Metodología

Este artículo emplea un diseño de estudio de caso comparado, basado exclusivamente en fuentes secundarias académicas ya publicadas y no en datos recolectados directamente por los autores. La selección de los tres puertos, Rotterdam, North Sea Port y Zeebrugge, respondió a un criterio explícito: que existiera literatura académica reciente (2021–2026) que documentara, con evidencia empírica propia de cada estudio (cifras oficiales, entrevistas a actores del ecosistema, o análisis de gobernanza), el mecanismo logístico e industrial concreto mediante el cual cada puerto avanza hacia la economía circular. Se excluyeron deliberadamente puertos sobre los que solo se encontró material promocional o declaraciones de intención sin sustento empírico. Como respaldo adicional y no como fuente primaria de los casos, se consultaron también revisiones de alcance más amplio, entre ellas el análisis de referencia de la industria portuaria de Notteboom et al. (2022), la revisión semisistemática de Barona et al. (2023) sobre desarrollos circulares en puertos industriales europeos, y el ejercicio de benchmarking de Gwarda y Karas (2025) sobre Rotterdam, Amberes-Brujas y Hamburgo, que permitieron contrastar los tres casos principales con un panorama sectorial más amplio.

Para cada caso se extrajo información sobre tres dimensiones: el mecanismo central de circularidad (qué flujo de materiales o energía se está cerrando y cómo), el papel de la logística en ese mecanismo (qué cambia en el transporte, almacenaje o procesamiento de materiales), y la evidencia de gobernanza o transparencia asociada, cuando la fuente la reportaba. Esta última dimensión se incorporó a partir del hallazgo de L'Abate et al. (2026), quienes analizaron la relación entre las características de las juntas directivas portuarias y la calidad de la comunicación pública sobre economía circular en una muestra de puertos de la Unión Europea, lo cual ofrece una lente adicional para evaluar si el avance circular reportado por cada puerto es, además de logísticamente real, institucionalmente sólido.

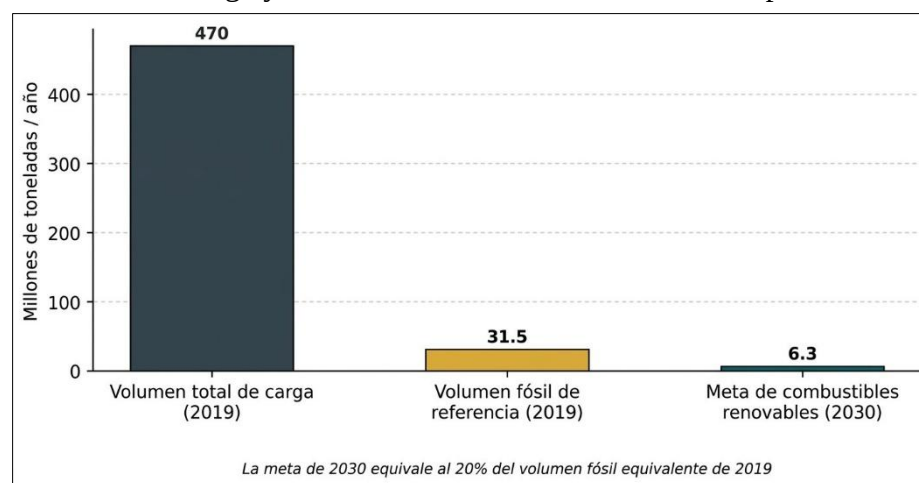
Estudio de caso comparado: tres mecanismos, un mismo objetivo

Rotterdam: convertirse en puerto de residuo a valor

Rotterdam mueve alrededor de 470 millones de toneladas de carga al año, lo que lo sitúa entre los puertos más grandes del mundo, y ha construido buena parte de esa cifra sobre la distribución y el procesamiento de petróleo crudo, carbón y gas licuado (Balz & Qu, 2021). La transición circular que persigue no consiste en abandonar ese volumen, sino en cambiar qué fluye por él: la autoridad portuaria se ha propuesto producir, hacia 2030, 6,3 millones de toneladas anuales de combustibles renovables y otros insumos biobasados, una cifra equivalente al 20% de su volumen fósil de referencia de 2019. Ya alberga, según la misma fuente, el clúster de biocombustibles más grande de Europa.

Desde el punto de vista logístico, lo interesante de Rotterdam es que su ambición circular depende de una infraestructura que ya existía para el petróleo: terminales de almacenamiento, ductos y conexión fluvial hacia el interior de Europa, ahora redirigidos hacia biomasa y materiales reciclados. Es, en ese sentido, un caso de reconversión de activos logísticos existentes más que de construcción de una logística circular desde cero.

Figura 3. Volumen de carga y meta de combustibles renovables del puerto de Rotterdam.



Fuente. Elaboración propia a partir de Balz y Qu (2021).

North Sea Port: un ecosistema de innovación multiactor

North Sea Port, resultado de la fusión transfronteriza entre los puertos de Terneuzen, Vlissingen y Gante, sigue un camino distinto: en lugar de reconvertir infraestructura propia, coordina a un conjunto de actores externos alrededor de proyectos específicos de valorización.

Andriamanantena et al. (2025), a partir de once entrevistas semiestructuradas con seis actores clave realizadas entre 2022 y 2023, documentan cómo ArcelorMittal Gante lidera la simbiosis industrial de acero, una organización llamada BBEU escala innovaciones de base biológica, el centro CAPTURE conecta investigación académica con industria, y agencias regionales alinean financiamiento y política pública, todo ello orquestado por la autoridad portuaria.

La logística, en este caso, no cambia tanto en su infraestructura física como en su gobernanza: el reto no es mover materiales de forma distinta, sino coordinar a actores que antes operaban de forma aislada para que compartan infraestructura y flujos de subproductos, algo particularmente relevante en un puerto binacional donde la regulación belga y la neerlandesa no siempre coinciden.

Zeebrugge: la proximidad como sustituto de la escala

Zeebrugge no cuenta con la base industrial densa de Rotterdam ni con el entramado multiactor de North Sea Port; es, ante todo, un puerto de acceso (gateway port) orientado al tránsito de mercancías más que a su procesamiento industrial. Courtens et al. (2023) muestran que, precisamente por esa razón, su transición circular depende de forma crítica de la proximidad geográfica con clústeres industriales y urbanos vecinos: sin una masa crítica propia de industrias que intercambiar subproductos entre sí, Zeebrugge necesita que esos intercambios ocurran con actores fuera de sus límites administrativos.

Esto tiene una implicación logística directa que los otros dos casos no comparten con la misma intensidad: la optimización de rutas de transporte de materiales secundarios hacia y desde el puerto importa más en Zeebrugge que la capacidad de procesamiento interno, porque buena parte del valor circular se genera fuera de sus propios límites.

Tabla 1. Comparación de los mecanismos de economía circular en los tres puertos analizados.

Puerto	Mecanismo central de circularidad	Rol de la logística	Fuente
Rotterdam	Reconversión hacia puerto de 'residuo a valor'; clúster de biocombustibles	Reutiliza infraestructura fósil existente (terminales, ductos, vías fluviales) para nuevos flujos biobasados	Balz y Qu (2021)
North Sea Port	Ecosistema de innovación multiactor; simbiosis industrial del acero, valorización de CO2 e hidrógeno	Coordinación de gobernanza entre actores binacionales más que cambio de infraestructura física	Andriamanantena et al. (2025)
Zeebrugge	Proximidad con clústeres industriales y urbanos vecinos como sustituto de escala industrial propia	Optimización de rutas de transporte de materiales secundarios hacia y desde actores externos	Courtens et al. (2023)

Fuente. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en cada fila.

Discusión

Los tres casos comparados sugieren que no existe un único camino logístico hacia la economía circular portuaria, sino al menos tres arquetipos que dependen de la dotación de partida de cada puerto. Rotterdam puede reconvertir infraestructura fósil existente porque ya la tiene, a una escala que ningún otro puerto europeo iguala; North Sea Port compensa la ausencia de una autoridad única con un entramado de gobernanza multiactor que sustituye inversión en infraestructura por coordinación institucional; Zeebrugge, sin ninguna de esas dos ventajas, depende de la geografía y de sus vecinos industriales. Esta diversidad de caminos coincide con lo señalado en la literatura más amplia sobre puertos y economía circular, que advierte que la proximidad geográfica y la disponibilidad de actores complementarios, no el tamaño del puerto por sí solo, determinan la viabilidad de un bucle circular (Chertow, 2000).

El ejercicio de benchmarking de Gwarda y Karas (2025) sobre Rotterdam, Amberes-Brujas y Hamburgo confirma, con un cuarto puerto que no forma parte del estudio de caso principal de este artículo, un patrón parecido al observado aquí: Amberes-Brujas y Rotterdam muestran las soluciones más avanzadas en simbiosis industrial y recuperación energética, mientras que Hamburgo destaca más bien en innovación tecnológica y proyectos orientados a la descarbonización. Los mismos autores anotan que, incluso entre los puertos europeos más avanzados, la reutilización de material de dragado es el área de economía circular más madura, mientras que la simbiosis industrial y la reutilización de calor residual apenas comienzan a desarrollarse en la mayoría de los casos, un matiz que respalda la inclusión de los sedimentos de dragado como un frente logístico circular tan relevante como los flujos de energía o de subproductos industriales.

El hallazgo de L'Abate et al. (2026) añade una capa de cautela necesaria. Su análisis de puertos de la Unión Europea encuentra que las características de la junta directiva portuaria, más que la escala de las operaciones, predicen la calidad de la comunicación pública sobre economía circular. Trasladado a los tres casos de este artículo, eso implica que una meta tan concreta como los 6,3 millones de toneladas de Rotterdam, o una coordinación tan elaborada como la de North Sea Port, valen tanto como la gobernanza que las sostiene y las verifica; sin ese respaldo institucional, la frontera entre transición circular real y comunicación corporativa favorable se vuelve difícil de trazar desde fuera.

Para las comunidades costeras que rodean estos puertos, la implicación práctica es doble. Por un lado, una logística circular bien diseñada, como la de Kalundborg o la que persigue North Sea Port, reduce el tráfico de transporte de residuos hacia vertederos lejanos y, con él, buena parte del ruido, las emisiones y el desgaste vial que esas comunidades absorben. Por otro lado, el caso de Zeebrugge recuerda que esa reducción no es automática: si el bucle circular depende de actores externos al puerto, la comunidad costera puede terminar absorbiendo el tránsito de materiales secundarios sin necesariamente participar de sus beneficios económicos, un riesgo que la literatura sobre gobernanza portuaria apenas comienza a documentar con evidencia sistemática.

Conclusiones

Este artículo comparó, mediante un estudio de caso basado en fuentes académicas verificables, los mecanismos logísticos e industriales que Rotterdam, North Sea Port y Zeebrugge emplean para avanzar hacia la economía circular. Los tres parten de la misma intuición conceptual documentada por Chertow (2000) a partir de Kalundborg, que un subproducto de una industria puede ser la materia prima de otra si la logística que los conecta es lo suficientemente corta y eficiente, pero la traducen en arquitecturas muy distintas: reconversión de infraestructura fósil en Rotterdam, coordinación multiactor en North Sea Port, y dependencia de proximidad geográfica externa en Zeebrugge.

La lección para autoridades portuarias y comunidades costeras es que optimizar la logística de residuos y subproductos, acortar rutas, reutilizar infraestructura existente, coordinar actores vecinos, es una condición necesaria pero no suficiente para una transición circular creíble; la evidencia de L'Abate et al. (2026) sugiere que esa transición necesita, además, una gobernanza portuaria capaz de comunicarla con transparencia y de rendir cuentas por ella. Quedan como líneas de trabajo futuro extender esta comparación a puertos fuera de Europa, donde la disponibilidad de datos públicos es considerablemente menor, y explorar con mayor detalle cómo se distribuyen entre el puerto y la comunidad costera los beneficios económicos concretos de cada bucle circular.

Referencias

- Andriamanantena, A. N., Mbeni, J. Y., Viala, C., & Durst, S. (2025). Enabling circular economy transitions in ports: The role of innovation ecosystems in North Sea Port. *Journal of Environmental Management*, 392, Artículo 126816. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126816>
- Balz, V. E., & Qu, L. (2021). Envisioning the Port of Rotterdam in a 100% circular economy. *PORTUS*, 42.
- Barona, J., Ballini, F., & Canepa, M. (2023). Circular developments of maritime industrial ports in Europe: A semi-systematic review of the current situation. *Journal of Shipping and Trade*, 8(1), 1–35. <https://doi.org/10.1186/s41072-023-00153-w>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 313–337. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- Courtens, F. M., Haezendonck, E., Doooms, M., & Verbeke, A. (2023). Accelerating the circular economy transition process for gateway ports: The case of the Port of Zeebrugge. *Maritime Transport Research*, 4, Artículo 100088. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100088>

- Fratini, C., Anselmi, S., & Renzi, M. (2025). Dredge sediment as an opportunity: A comprehensive and updated review of beneficial uses in marine, river, and lagoon ecosystems. *Environments*, 12(6), Artículo 200. <https://doi.org/10.3390/environments12060200>
- Gwarda, K., & Karas, A. (2025). Implementing circular economy in seaports: Theory and practice. *European Research Studies Journal*, 28(4), 1266–1276.
- L'Abate, V., Albergo, F., Comite, U., Vitolla, F., & Raimo, N. (2026). Anchoring circularity: Governing board features and circular economy disclosure across European Union ports. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.71043>
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J.-P. (2022). *Port economics, management and policy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429318184>