

**(05-036) - REVIEW OF METHODS FOR CALCULATING EXTERNAL COSTS AND  
THEIR APPLICATION IN THE IMPLEMENTATION OF SOLAR PANELS IN  
MARITIME PORTS**

Pérez-Belis, Victoria <sup>1</sup>; Viñoles-Cebolla, Rosario <sup>1</sup>; Martínez Navarro, Alberto Pablo <sup>2</sup>;  
Artacho-Ramírez, Miguel Ángel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de València, <sup>2</sup> SunnerBOX

Electricity is a key factor for economic and social development; however, its generation entails a series of environmental damages (caused by air pollutants) and social damages (associated with increased mortality). Estimating the damages caused by air emissions is crucial in making decisions at the level of environmental policy and also in defining business strategies. The assessment of external costs in the energy sector, as well as the estimation of its social cost, is carried out by applying different standards and tools. This communication presents a review of methods for assessing external costs, determining aspects such as the information required for their calculation and their suitability based on communication objectives. Once analyzed, the external costs for the specific case of installing photovoltaic panels on a dam in the Port of Valencia are calculated.

Keywords: indicator; social impact; sea ports

**REVISIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE COSTES EXTERNOS Y SU  
APLICACIÓN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES EN PUERTOS  
MARÍTIMOS**

La electricidad es un factor clave para el desarrollo económico y social, sin embargo, su generación conlleva una serie de daños ambientales (causados por los contaminantes del aire) y sociales (asociados a al aumento de la mortalidad). La estimación de los daños causados por las emisiones al aire resulta clave en la toma de decisiones a nivel de política ambiental y así como en la definición de estrategias empresariales. La evaluación de costes externos del sector energético, así como la estimación de su coste social, se realiza mediante la aplicación de diferentes estándares y herramientas. Esta comunicación presenta una revisión de métodos de evaluación de costes externos, determinando aspectos como la información requerida para su cálculo y su idoneidad en función de los objetivos de comunicación. Una vez analizados, se calculan los costes externos para el caso específico de la instalación de paneles fotovoltaicos en un dique del Puerto de Valencia.

Palabras clave: indicadores; impacto social; puerto marítimo

Correspondencia: vicprebe@upv.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Los puertos marítimos son una infraestructura clave y un recurso estratégico en el desarrollo económico y social de las ciudades. Sin embargo, la diversidad de sus actividades genera una emisión de cantidades significativas de contaminantes debido principalmente al uso de combustibles fósiles en los buques, maquinaria portuaria, y el transporte terrestre (Sogut & Erdoğan, 2022). Esto conlleva significativos costes ambientales y de salud pública, principalmente debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, que no únicamente deterioran la calidad del aire y del agua, afectando la biodiversidad marina y costera, sino que también tienen un impacto directo en la salud de las comunidades locales, incrementando los riesgos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares entre la población expuesta.

Entre las diferentes repercusiones de los contaminantes sobre la salud humana, destacan enfermedades respiratorias, cáncer de pulmón y cardiovasculares (Corbett et al., 2007), así como infertilidad (Nieuwenhuijsen et al., 2014), diabetes (Eze et al., 2015), problemas en recién nacidos (Sapkota, Chelikowsky, Nachman, Cohen, & Ritz, 2012) y nacimiento prematuros (Chen, Saikawa, Comer, Mao, & Rutherford, 2019), entre otras.

En respuesta a esta problemática, surge la necesidad de reducir estas emisiones mediante la transición hacia el uso de energías renovables y prácticas más sostenibles en las operaciones portuarias (Acciaro, Ghiara, & Cusano, 2014). La adopción de tecnologías limpias y eficientes, como la electrificación de la maquinaria portuaria y el fomento del uso de combustibles alternativos y menos contaminantes para los buques, son estrategias viables para reducir significativamente la huella ambiental de los puertos (Nikitakos et al., 2022). A través de una revisión de la literatura existente sobre la gestión y eficiencia energética en terminales portuarias, (Mojica-Herazo et al., 2024) identifican aspectos clave y áreas emergentes de interés, destacando entre las tendencias identificadas, prácticas sostenibles y estrategias de optimización energética, así como la integración de energías renovables en la industria marítima y portuaria.

Entre estas tendencias clave en la transición hacia la sostenibilidad en terminales portuarias, Mojica-Herazo et al. (2024) destacan la integración de energía solar, identificando la instalación de paneles fotovoltaicos como una práctica clave para el desarrollo de terminales portuarias altamente eficientes y de reducidas emisiones, disminuyendo a su vez la dependencia de los combustibles fósiles..

Para fomentar y justificar dicha transición hacia energías renovables y de forma específica la energía solar, es crucial cuantificar de manera precisa los costes externos, determinando no únicamente los beneficios económicos directos, como la reducción en el coste de energía y la amortización de la inversión, sino también y en este caso en concreto, el impacto en la salud pública y la correlación entre la calidad del aire y la incidencia de enfermedades. Para ello, esta comunicación presenta una revisión de los principales métodos de cálculos externos en los puertos, con especial énfasis en los impactos sobre la salud, identificando las emisiones generadas en los puertos, la información requerida para su cálculo y su idoneidad en función de los objetivos establecidos. Por último, se calcula de forma aproximada la incidencia en los costes externos del Puerto de Valencia la implementación de paneles fotovoltaicos.

## 2. Objetivos del Estudio

El objetivo principal se centra en identificar los impactos relacionados con la salud, evaluando además los costes externos asociados a la implementación de paneles solares en entornos portuarios.

### 3. Metodología

Para poder alcanzar dicho objetivo, es necesario establecer una metodología que permita por un lado recopilar la información necesaria en relación a los métodos de cálculos externos, destacando de forma específica la identificación de impactos sobre la salud, y por otro, su aplicación al caso de estudio, para lo que es necesario establecer una serie de fases, tal y como se observa en la Figura 1.

Figura 1: Metodología.



#### 3.1 Revisión de Literatura

##### 3.1.1. Revisión de métodos de estimación de costes

En este apartado se analizan los diferentes métodos orientados a la estimación de costes externos en puertos. En esta ámbito, se destaca el trabajo de Tichavska, (2015). En él se distinguen los diferentes enfoques existentes para la estimación de emisiones y costes externos, que difieren entre sí por su metodología y aplicación, especialmente en el contexto de las emisiones portuarias y marítimas. Por un lado, el enfoque *bottom-up* proporciona una evaluación detallada y específica de las emisiones y costes externos, basada en datos precisos de las operaciones portuarias. Por otro, el enfoque *top-down* proporciona una visión más generalizada y agregada, utilizando variables económicas y factores de coste existentes para estimar las emisiones y sus costes externos asociados.

A continuación, la Tabla 1 muestra las metodologías para calcular los costes externos derivados de las emisiones al aire, detallando sus características específicas.

Tabla 1: Principales métodos de estimación de costes externos.

	IPA (Impact Pathway Approach)	BeTA (Benefits Table Database)	CAFE (Clean Air for Europe)	NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability)
<b>Enfoque</b>	Bottom-up	Top-down	Mixto (Bottom-up y Top-down)	Mixto (Bottom-up y Top-down)
<b>Objetivo</b>	Calcular costes externos específicos del sitio derivados	Proporcionar estimaciones de costes externos marginales de la	Mejorar la calidad del aire en Europa y evaluar impactos en la salud	Evaluar externalidades energéticas para una política de energía

	de emisiones al aire.	contaminación del aire en Europa.	pública y el medio ambiente.	sostenible en Europa.
<b>Aplicación</b>	Evaluación detallada y específica de impactos y daños derivados de las emisiones.	Evaluación de políticas y proyectos mediante datos estandarizados de costes externos.	Amplio rango de aplicaciones, desde evaluación de calidad del aire hasta políticas de salud pública y medio ambiente.	Evaluación de políticas energéticas sostenibles, considerando costes externos energéticos.
<b>Metodología</b>	Analiza el proceso desde la emisión de contaminantes hasta la valoración de impactos.	Basada en compilaciones de datos y estimaciones estandarizadas de costes externos.	Utiliza una combinación de modelos y análisis para evaluar la calidad del aire y sus impactos.	Combina enfoques para estimar externalidades, incluyendo análisis detallados de impacto.
<b>Implementación</b>	Requiere datos detallados desde emisión hasta impacto.	Requiere variables económicas agregadas y factores de coste existentes.	Requiere datos detallados o agregados.	Requiere datos detallados o agregados.
<b>Referencias</b>	(Peter Bickel & Friedrich, 2005)	(Holland & Watkiss, 2002)	(Amann et al., 2005; Holland & Hunt, 2005)	(Preiss & Klotz, 2007)

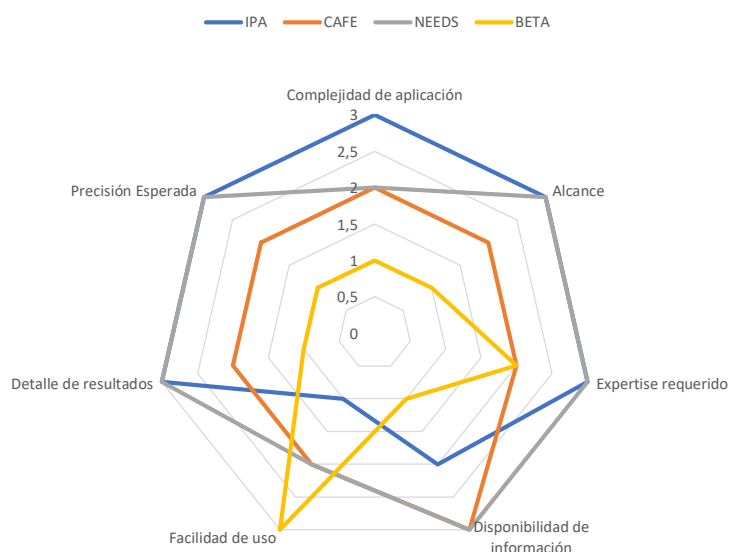
- El Enfoque de Ruta de Impacto (IPA) (Peter Bickel & Friedrich, 2005) se considera la metodología más completa para calcular los costes externos derivados de las emisiones al aire. Es una metodología de referencia dado su enfoque caracterizado por un análisis integral, desde la emisión de contaminantes hasta los impactos finales en la salud humana y el medio ambiente. Una de las principales ventajas del IPA es su capacidad para proporcionar evaluaciones detalladas y específicas, permitiendo así considerar condiciones locales concretas como geografía, meteorología o demografía. Una particularidad clave del IPA es la utilización de modelos de dispersión atmosférica avanzados para simular cómo los contaminantes se transportan y distribuyen en el ambiente. Esta modelización permite evaluar con precisión la exposición de las poblaciones a los contaminantes, considerando no solo las concentraciones de contaminantes en diferentes áreas y momentos, sino también los patrones de movimiento de las poblaciones afectadas. Además, el IPA integra modelos de impacto que relacionan directamente los niveles de exposición con efectos específicos sobre la salud, como la mortalidad y la morbilidad, utilizando para ello bases de datos epidemiológicas y toxicológicas robustas. Al identificar con claridad las fuentes de contaminación más perjudiciales y sus impactos específicos, el IPA proporciona una base sólida para la toma de decisiones basada en evidencia, apoyando la implementación de medidas de mitigación dirigidas y efectivas. Además, el enfoque ofrece una gran flexibilidad y adaptabilidad, permitiendo su aplicación a una amplia gama de estudios ambientales y de salud pública, abarcando diferentes contaminantes, fuentes de emisión y contextos geográficos.
- Base de Datos de la Tabla de Beneficios (BeTa): Desarrollada para la Comisión Europea por Holland y Watkiss en 2002, incluye el coste externo de las emisiones al aire de la UE

(14 países) estimado en 1998. BeTa utiliza factores de costo urbanos y rurales nacionales, y también proporciona factores de coste en alta mar. Es una herramienta esencial en la valoración de los costes externos relacionados con la contaminación del aire y su impacto en la salud pública y el medio ambiente en Europa. A diferencia del enfoque detallado del Impact Pathway Approach (IPA), BeTA proporciona una metodología más agregada, lo que permite realizar evaluaciones a gran escala y facilita la comparación entre diferentes políticas o intervenciones ambientales a nivel regional o nacional. Estas estimaciones se basan en una amplia revisión de estudios y análisis existentes, lo que permite acceder a valores de referencia confiables y comparables. Al proporcionar factores de coste y estimaciones predeterminadas, BeTA facilita a los usuarios, especialmente a aquellos que no son expertos en modelización ambiental compleja, la realización de evaluaciones económicas de los impactos ambientales y de salud sin necesidad de desarrollar modelos detallados.

- CAFE (Clean Air for Europe) adopta un enfoque integrado para mejorar la calidad del aire en toda Europa, combinando investigación científica, evaluación de políticas, y desarrollo de estrategias. Este enfoque permite abordar la contaminación del aire de manera holística, considerando tanto sus causas como sus efectos en la salud pública y el medio ambiente. Una característica distintiva de CAFE es su marcado énfasis en la evidencia científica ya que se basa en estudios detallados para entender mejor los impactos de la contaminación del aire y fundamentar sus recomendaciones de política en datos y análisis robustos. Está específicamente diseñado para apoyar el desarrollo y la implementación de políticas de calidad del aire en la Unión Europea, fomentando la cooperación entre los Estados miembros de la UE.
- NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability) se centra específicamente en la evaluación de las externalidades relacionadas con la producción y el consumo de energía, incluyendo impactos en la salud, el medio ambiente, y la sociedad. Este enfoque permite una comprensión profunda de los costes y beneficios asociados con diferentes fuentes de energía y tecnologías. Integra además diversas metodologías, incluyendo análisis de ciclo de vida y modelización económica, para proporcionar estimaciones completas.

A continuación, la Figura 2 ofrece una visión clara y concisa de las características y aplicabilidad de los métodos IPA, CAFE, NEEDS y BETA.

**Figura 2: Comparativa de métodos.**



Se observa que el método IPA, con valores máximos en casi todas las categorías, es adecuado para investigaciones detalladas que requieren una alta precisión y un profundo conocimiento técnico. En contraste, BeTA es más accesible y fácil de usar, ideal para contextos donde la simplicidad y la rapidez son cruciales, aunque ofrece menor detalle y precisión. CAFE y NEEDS ocupan posiciones intermedias, equilibrando la complejidad y la facilidad de uso con la adaptabilidad a diferentes escenarios, de alcance regional o europeo. Esta diferenciación ayuda a dirigir la selección del método más apropiado basado en las exigencias específicas de precisión, detalle y contexto del estudio en cuestión.

### 3.1.2. Contaminantes atmosféricos y repercusiones en salud

En lo referente a las emisiones, los puertos son un foco principal de efectos negativos de los contaminantes emitidos (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOC, CO y PM) asociados a impactos locales en la salud humana de acuerdo con Chen et al. (2019). A continuación, en la Tabla 2 se detallan los contaminantes considerados por cada método para el cálculo de costes externos.

**Tabla 2: Contaminantes atmosféricos considerados.**

	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	VOCs	PM 2.5	PM 10-2.5	Referencias
IPA (Impact Pathway Approach)	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	Peter Bickel & Friedrich, 2005
BeTa (Benefits Table database)	✓			✓		✓	✓		Holland and Watkiss, 2002; NETCEN, 2004
CAFE (Clean Air for Europe)	✓			✓	✓	✓	✓	✓	Holland et al., 2005; Amann et al., 2005
NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability)	✓			✓	✓				Preiss et al., 2007

PM<sub>2.5</sub> (Partículas menores a 2.5 µm); O<sub>3</sub> (Ozono); SO<sub>2</sub> (Dióxido de azufre); NO<sub>x</sub> (Óxidos de nitrógeno); NH<sub>3</sub> (Amoníaco); VOC (Compuestos orgánicos volátiles)

En lo referente al impacto en la salud, numerosos estudios epidemiológicos demuestran la existencia de efectos adversos para la salud de la exposición, puntual o prolongada, a niveles elevados de material particulado atmosférico, destacando las partículas de menor diámetro como las causantes de las mayores afecciones respiratorias. De ahí que se establezca como prioritaria la necesidad de llevar a cabo un control de la contaminación atmosférica en puertos y entornos portuarios.

Este impacto sobre la salud se considera como el efecto más importante en términos de costes cuantificables. La repercusión de los impactos sobre la salud se clasifica en dos grandes categorías: mortalidad y morbilidad. De acuerdo con Mueller et al. (2023) la mortalidad incluye las muertes atribuibles a diversas causas específicas relacionadas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como el cáncer de pulmón y las infecciones respiratorias agudas bajas. La morbilidad, por otro lado, incluye condiciones que no necesariamente resultan en la muerte pero afectan la calidad de vida, como el asma infantil, las admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, los días de trabajo perdidos y los síntomas respiratorios bajos. La exposición a  $PM_{2.5}$  reduce la esperanza de vida, debido principalmente a enfermedades cardiovasculares y cardio-pulmonares. Las investigaciones han asociado la exposición a largo plazo a  $PM_{2.5}$  y ozono con un incremento significativo en la incidencia de enfermedades cardiovasculares y cardio-pulmonares, incluso a niveles de concentración más bajos que los picos de contaminación. Además, la exposición al ozono a nivel del suelo contribuye a una amplia gama de problemas respiratorios, incluyendo un aumento en las tasas de hospitalización por enfermedades respiratorias. Esto afecta particularmente a grupos vulnerables como niños y ancianos ya que son especialmente susceptibles a los efectos nocivos de la contaminación del aire, experimentando tasas más altas de hospitalización y enfermedades crónicas exacerbadas por la exposición a contaminantes.

Recientemente, Mueller et al., (2023) realizan una exhaustiva revisión de la literatura analizando el modo en el que la contaminación del aire derivada de puertos marítimos afecta a la salud global, revisando un total de 32 artículos. Identifican la mortalidad (todas las causas, específicas, pérdida de esperanza de vida, años de vida perdidos (AVP)), la morbilidad (casos de enfermedades, admisiones hospitalarias, años vividos con discapacidad (AVD)), los años de vida ajustados por discapacidad (AVAD), días de actividad restringida y los días de pérdida laboral como los impactos más representativos de la literatura.

#### **4. Caso de aplicación**

El objetivo del caso práctico se centra en evaluar los beneficios en términos de reducción de costes externos derivados de la implementación de paneles solares en un dique del puerto.

##### **4.1 Descripción de caso de estudio**

El Puerto de Valencia es el sexto mayor puerto de tráfico de contenedores en Europa y el más grande del mar Mediterráneo (Cloquell-Ballester, Lo-Iacono-ferreira, Artacho-Ramírez, & Capuz-Rizo, 2020). La Autoridad Portuaria de Valencia (APV) ha demostrado a lo largo de los años un compromiso significativo en el desarrollo de acciones orientadas a la mejora de su comportamiento ambiental, implementando diferentes proyectos e iniciativas destinadas a la evaluación y reducción de su huella de carbono. De forma continuada, la APV realiza una labor de vigilancia de los diversos parámetros que intervienen en la calidad de su entorno, siendo el control de la calidad del aire uno de sus objetivos prioritarios (Autoridad Portuaria de Valencia, 2021).

Para ello, la APV cuenta con una red de monitorización ubicada de forma estratégica en el puerto (Figura 3) proporcionando de forma continua datos de calidad del aire, realizando un seguimiento específico de las concentraciones de los contaminantes en el recinto portuario,

como son las partículas (medidas en concentraciones de partículas PM10, PM2.5 y PM1), dióxido de azufre, monóxido y dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono.

**Figura 3: Ubicación de equipos de registro.**



Estos logros resaltan el enfoque proactivo del Puerto de Valencia hacia la gestión ambiental y su búsqueda continua de oportunidades de mejora en las prácticas de sostenibilidad, especialmente en áreas donde tiene influencia directa sobre las emisiones. Recientemente, bajo el marco de la descarbonización se ha planificado una instalación de energía fotovoltaica aprovechando infraestructura radiada de 3.6 MW<sub>p</sub> para contribuir a alcanzar la reducción del 55% de sus emisiones establecida por la UE para 2030.

Con el objetivo de determinar las repercusiones ambientales y sociales de esta instalación, a continuación se calculan tanto las emisiones como los costes externos que se evitarían tras la instalación de paneles solares.

#### **4.2 Método seleccionado**

En primer lugar, es necesario seleccionar el método de cálculo a implementar. Considerando la información de la que se dispone, el objetivo y sin disponer de información muy detallada, se considera que la Base de Datos de la Tabla de Beneficios (BeTA) (Holland & Watkiss, 2002) es la más adecuada, respondiendo a un enfoque Top-down y proporcionando estimaciones estandarizadas de costes externos basadas en datos calculados a partir de una amplia revisión de estudios existentes. Aunque es menos preciso que el enfoque bottom-up (que permite una alta precisión gracias a la información detallada de la que se dispone) es ampliamente aceptado y utilizado si no se dispone de información detallada. La estimación de costes externos se realiza utilizando factores de coste obtenidos de estudios europeos relevantes y literatura reciente.

De acuerdo con la metodología, para estimar los costes externos, se deben determinar los Costes Externos Urbanos para SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, y PM<sub>2.5</sub>, utilizando los valores de costes externos marginales por tonelada para un entorno comparable a que se va a evaluar. A continuación, se determinan los Costes Externos Rurales, identificando los valores de costes externos marginales rurales por tonelada para cada uno de los contaminantes mencionados y específicos para España. Finalmente se calculan los costes externos totales.

#### **4.3 Cálculo de costes externos**

Para el caso de estudio, se va a proceder evaluando los costes económicos asociados al ahorro de emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> que representa la producción de energía de la instalación fotovoltaica frente al que se produciría en el caso de obtener esa energía a partir de una central térmica de un tamaño similar a la ubicada en Castellón. Así, se estimarán las



emisiones anuales de contaminantes de una central de esas características. A continuación, conociendo la generación de energía eléctrica de una central térmica y la producción de la instalación fotovoltaica, se podrá estimar la fracción que representa esta última frente al total de generación eléctrica de la central térmica. Suponiendo una reducción proporcional de emisión de contaminantes, se conocerán las toneladas de estos que se dejan de emitir tras la instalación fotovoltaica y, así, se podrán calcular los costes económicos asociados a los 30 años de vida útil de la misma.

En primer lugar, el cálculo de las toneladas de contaminantes se extrae del análisis realizado por Pérez-Coleman (2016). Los datos son los que figuran en la Tabla 3.

**Tabla 3: Emisiones de contaminantes de una central térmica (Pérez-Coleman, 2016).**

<b>Evolución</b>	<b>Año 2014</b>	<b>A partir del año 2019</b>
Emisión SO <sub>2</sub> (t/año)	5789	396
Emisión NO <sub>2</sub> (t/año)	3536	1054
Emisión PM <sub>2.5</sub> (t/año)	352	45

La producción anual de la central térmica de Castellón con un coeficiente de utilización de 29,7% es de 2134 GWh. Para calcular la producción de la instalación fotovoltaica se utiliza el programa PVsyst 7.4, obteniéndose una producción anual de 5.8GWh. Así, la producción anual de la instalación fotovoltaica representa el 2.7 por mil SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> obteniendo así los datos que se reflejan en la Tabla 4.

**Tabla 4: Emisiones de contaminantes en instalación fotovoltaica.**

<b>Contaminante</b>	<b>t</b>
SO <sub>2</sub>	1.1 t
NO <sub>2</sub>	2.9 t
PM <sub>2.5</sub>	0.12 t

A partir de los datos estandarizados (Holland & Watkiss, 2002), considerando las emisiones anuales de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> y a partir de la población de 789.744 habitantes (INE, 2024) se calculan las externalidades.

De acuerdo con (Holland & Watkiss, 2002), para el cálculo de las emisiones en el puerto se deben utilizar los valores del tamaño de la ciudad específica, sumando la cifra de externalidad rural para el país en cuestión. BeTa proporciona costes externos marginales para áreas urbanas (Tabla 5) y rurales (Considerando el caso de Valencia, con una población cercana a 789.744 habitantes, se debe utilizar un factor de escala mayor que 5 (para 500,000 personas) y potencialmente cercano a 7.5 (para 1,000,000 de personas). Se aplica por tanto un factor de escala estimado 6 para ambos contaminantes SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, multiplicado por el coste por tonelada de cada uno de ellos.

**Tabla 6**), así como factores para ajustar según el tamaño de la ciudad.

**Tabla 5: Costes externos marginales de las emisiones en áreas urbanas según BeTA.**

<b>Habitantes</b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
-------------------	-------------------------	-----------------------

100,000	€/tonne	33000	6000
<b>Factor</b>			
500,000		5	5
1,000,000		7.5	7.5
Varios millones		15	15

Considerando el caso de Valencia, con una población cercana a 789.744 habitantes, se debe utilizar un factor de escala mayor que 5 (para 500,000 personas) y potencialmente cercano a 7.5 (para 1,000,000 de personas). Se aplica por tanto un factor de escala estimado 6 para ambos contaminantes SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, multiplicado por el coste por tonelada de cada uno de ellos.

**Tabla 6: Costes externos marginales de las emisiones en áreas rurales según BeTA.**

Habitantes	€/t PM <sub>2.5</sub>	€/t SO <sub>2</sub>	€/t NO <sub>2</sub>
España	7,900	3,700	4,700
Media EU-15	14,000	5,200	4,200

En base a estos valores de referencia, se calculan los costes externos, obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 7** para el caso de las emisiones de la central y en la **Tabla 8** para el caso de los paneles fotovoltaicos. Esa cantidad se multiplica por 30 años para obtener el ahorro total obtenido a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación fotovoltaica

**Tabla 7: Costes externos totales de central térmica.**

Contaminante	(t)	Costes externos urbanos	Costes externos rurales	Costes externos totales anuales
SO <sub>2</sub>	396	39,700€/t	3,700€/t	15,720,600€
NO <sub>2</sub>	1054	4,700€/t	4,700€/t	4,953,800€
PM <sub>2.5</sub>	45	205,900 €/t	7,900 €/t	9,265,500€

**Tabla 8: Costes externos totales evitados por la instalación fotovoltaica.**

Contaminante	(t) evitadas	Costes externos urbanos	Costes externos rurales	Costes externo total ahorrado	Costes evitados en 30 años
SO <sub>2</sub>	1.1	36,000 €/t	3,700 €/t	43,670 €	1,310,100 €
NO <sub>2</sub>	2.9	4,700 €/t	4,700 €/t	13,630 €	408,900 €
PM <sub>2.5</sub>	0.12	198,000 €/t	7,900 €/t	24,708 €	741,240 €

## 5. Conclusiones

La revisión de los diferentes métodos de cálculo de costes externos en puertos marítimos permite determinar la selección entre ellos en función de las necesidades del estudio. Mientras

que IPA es ideal para análisis detallados y técnicamente exigentes, requiriendo elevados conocimientos técnicos y proporcionando resultados de alta precisión, CAFE y NEEDS ofrecen un punto intermedio entre facilidad de uso y adaptabilidad, siendo particularmente útiles para aplicaciones a nivel europeo con variabilidad en los escenarios de implementación. Por otro lado, BETA es más adecuado para evaluaciones rápidas y menos detalladas en contextos locales.

Considerando el alcance del caso práctico, los recursos disponibles, el nivel de detalle requerido, y el objetivo centrado en obtener una primera aproximación de costes, se aplica el método BETA para el Puerto de Valencia tras la implementación de energía solar.

Los resultados del cálculo de costes externos demuestran como la implementación de paneles fotovoltaicos en el puerto suponen una notable disminución de estos. Cabe destacar que este cálculo no es completamente ajustado, dado que sería necesario un estudio en detalle que considere el análisis del ciclo de vida completo del panel, dado que el consumo de energía durante la producción de materiales y módulos fotovoltaicos son las principales fuentes de las emisiones. Se observa que los beneficios económicos de la reducción de emisiones se acumulan significativamente a lo largo del tiempo, proporcionando una justificación más sólida para la inversión inicial en tecnología solar. Además, no se deben subestimar los beneficios indirectos como la mejora de la salud pública y la reducción de otros costes ambientales asociados.

Este estudio se completará ajustando estos aspectos y calculando a su vez los impactos sobre la salud. Para ello, es necesario disponer de una mayor cantidad de información, asociada tanto al ciclo de vida de los paneles como a la salud de los consumidores.

## 6. Referencias

- Acciaro, M., Ghiara, H., & Cusano, M. I. (2014). Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*, 71, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.013>
- Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Gyarmas, F., Heyes, C., Klimont, Z., ... Winiwarter, W. (2005). Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe ( CAFE ) Programme. *Institute for Applied Systems Analysis*, (1), 79.
- Autoridad Portuaria de Valencia. (2021). Memoria Ambiental 2021.
- Chen, C., Saikawa, E., Comer, B., Mao, X., & Rutherford, D. (2019). Ship Emission Impacts on Air Quality and Human Health in the Pearl River Delta (PRD) Region, China, in 2015, With Projections to 2030. *GeoHealth*, 3(9), 284–306. <https://doi.org/10.1029/2019GH000183>
- Cloquell-Ballester, V., Lo-Iacono-ferreira, V. G., Artacho-Ramírez, M. Á., & Capuz-Rizo, S. F. (2020). The carbon footprint of valencia port: A case study of the port authority of Valencia (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218157>
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: A global assessment. *Environmental Science and Technology*, 41(24), 8512–8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- Eze, I. C., Hemkens, L. G., Bucher, H. C., Hoffmann, B., Schindler, C., Künzli, N., ... Probst-Hensch, N. M. (2015). Association between ambient air pollution and diabetes mellitus in Europe and North America: Systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 123(5), 381–389. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307823>
- Holland, M., & Hunt, A. (2005). Final Methodology Paper (Volume 1) for Service Contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air

for Europe (CAFE) programme, 1(4).

- Holland, M., & Watkiss, P. (2002). Benefits Table database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe. *BeTa Version E*, 20. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Benefits+table+database:+estimates+of+the+marginal+external+costs+of+air+pollution+in+Europe#0%5Cnhttp://www.econbiz.de/Record/beta-version-e1-02a-holland-mike/10009636662/Description%23tabnav>
- INE. (2024). Instituto Nacional de Estadística. Habitantes Valencia. Retrieved April 9, 2024, from <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2903>
- Mojica-Herazo, J. C., Piñeres Castillo, A. P., Cabello Eras, J. J., Salais Fierro, T. E., Araújo, J. F. C., & Gatica, G. (2024). Bibliometric analysis of energy management and efficiency in the maritime industry and port terminals: Trends. *Procedia Computer Science*, 231, 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.243>
- Mueller, N., Westerby, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review. *Environmental Research*, 216(P1), 114460. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114460>
- Nieuwenhuijsen, M. J., Basagaña, X., Dadvand, P., Martinez, D., Cirach, M., Beelen, R., & Jacquemin, B. (2014). Air pollution and human fertility rates. *Environment International*, 70, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.005>
- Nikitakos, N., Stefanakou, A. A., Nikishin, A., Kharitonov, M., Gordeeva, E., Popov, A., & Kovalishin, P. (2022). Conceptual Framework For Integration On Renewable Energy Sources For Marine Port Electrification. *International Maritime Transport and Logistics Conference*, 11(1), 96–104. <https://doi.org/10.21622/MARLOG.2022.11.096>
- Peter Bickel, & Friedrich, R. (2005). *ExternE Externalities of Energy ExternE Externalities of Energy. Reproduction* (Vol. EUR 21951). Retrieved from <http://www.externe.info/>
- Preiss, P., & Klotz, V. (2007). *Description of updated and extended draft tools for the detailed site-dependent assessment of external costs*. Retrieved from [http://www.needs-project.org/RS1b/NEEDS\\_RS1b\\_TP7.4.pdf](http://www.needs-project.org/RS1b/NEEDS_RS1b_TP7.4.pdf)
- Sapkota, A., Chelikowsky, A. P., Nachman, K. E., Cohen, A. J., & Ritz, B. (2012). Exposure to particulate matter and adverse birth outcomes: A comprehensive review and meta-analysis. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 5(4), 369–381. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0106-3>
- Sogut, M. Z., & Erdoğan, O. (2022). An investigation on a holistic framework of green port transition based on energy and environmental sustainability. *Ocean Engineering*, 266(April). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112671>
- Tichavska, M. (2015). *Essays on vessel emissions and externality cost in Las Palmas Port*.

## 7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universitat Politècnica de València por el apoyo recibido. Esta investigación ha sido financiada por el Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València (PAID-11-23).

## Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Se solicita a los autores que después de las referencias incluyan este apartado e indiquen un mínimo de 1 y un máximo de 2 Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que su comunicación contribuye o con los que está más alineado.

Copie el icono de los Objetivos seleccionados y péquelo ajustado al tamaño que se indica en la plantilla. Puede encontrar los iconos y consultar una descripción más detallada de cada objetivo en el siguiente enlace: [Sustainable Development Goals](#).