

Análisis del impacto ambiental asociado al lavado de gases de escape en buques mediante *scrubbers* y evaluación de tecnologías para su minimización. Caso del Puerto de Algeciras

Vanessa Guzmán, José Daniel Márquez-Güelfo y Enrique Nebot / UCA

Recibido: 28 de mayo de 2024 / Revisado: 1 de junio de 2024 / Aceptado: 3 de junio de 2024 / Publicado: 8 de octubre de 2024

RESUMEN

Tomando en consideración las normativas pertinentes, y mediante el análisis de diversas fuentes de información, se evalúa el impacto medioambiental de las emisiones de SO_2 del tráfico marítimo en el Puerto de Algeciras, haciendo especial hincapié en la normativa IMO y el uso de *scrubbers*. Se examinan emisiones atmosféricas y se presentan resultados preliminares sobre la presencia de buques con *scrubbers* en el puerto, con la expectativa de mejorar la calidad del aire y comprender los posibles efectos en las aguas portuarias.

Palabras clave: emisiones de SO_2 , *scrubbers*, normativa IMO, Puerto de Algeciras.

ABSTRACT

Taking into consideration the relevant regulations, and through the analysis of various sources of information, the environmental impact of SO_2 emissions by maritime traffic in the Port of Algeciras is assessed, with special emphasis on IMO regulations and the use of scrubbers. Atmospheric emissions are examined and preliminary results on the presence of ships with scrubbers in the port are presented, with the expectation of improving air quality and understanding the possible effects on port waters.

Keywords: SO_2 emissions, scrubbers, IMO regulations, Port of Algeciras.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo es imprescindible en el comercio global, sin embargo, también es una de las fuentes más importantes de emisiones de gases de efecto invernadero. Los principales contaminantes generados por los buques incluyen sustancias como el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el dióxido de azufre (SO_2). Es importante destacar que los buques generan emisiones que se dispersan por la atmósfera y llegan a áreas urbanas cercanas, impactando significativamente en la calidad del aire y, por ende, en la salud y calidad de vida de las personas.

El dióxido de azufre (SO_2) se encuentra en la

atmósfera como un gas estable, pero en grandes cantidades y en presencia de precipitaciones da lugar a la lluvia ácida, perjudicando al medio ambiente, a la agricultura, aguas de ríos, organismos acuáticos o incluso construcciones humanas. La Organización Marítima Internacional (OMI) a través de su protocolo sobre Contaminación Marina (MARPOL) establece estrategias para reducir las emisiones de óxidos de azufres (SO_x) procedentes de buques, fomentando el uso de combustibles con bajo contenido de azufre y la implementación de tecnologías de *scrubbers* o sistemas de limpieza de gases de escape (EGCS). Estas medidas son

especialmente relevantes en áreas con un alto tráfico de buques, como la Bahía de Algeciras, donde es crucial prever y mitigar los impactos ambientales derivados de estas actividades marítimas.

1.1. Normativa

La regulación de las emisiones de óxidos de azufre (SOx) opera a diferentes escalas, existiendo normativas internacionales dictadas por la OMI así como normativas a nivel regional por parte de la Unión Europea y sus estados miembros, como España.

A nivel internacional, las normativas pertinentes se detallan en el Anexo VI del convenio MARPOL. Este Anexo establece los límites globales de contenido de combustibles marítimos y define áreas con legislación más estrictas, como son las Zonas de control de Emisiones (ECA) y las Áreas de Control de Emisiones de Azufre (SECA). Dichos límites eran el 3,5 % y en 2020 pasaron al 0,5 % a nivel mundial y del 0,1 % en zonas SECA.

A nivel regional, la Unión Europea debe adoptar las directivas de MARPOL y asegurar su cumplimiento. Con la Directiva (UE) 2023/959 se pretende cumplir los objetivos climáticos de la Unión Europea reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otra parte, la Directiva 2009/123/CE establece las sanciones relativas a la contaminación procedente de buques y la Directiva (UE) 2016/802 establece los límites de MARPOL mencionados anteriormente.

En el marco normativo español se promulgan diversos decretos y reglamentos que regulan aspectos claves como las especificaciones de combustibles marítimos, la ordenación marítima, los objetivos de calidad del aire y la gestión de residuos generados por buques en los puertos. Estos incluyen el Real Decreto 1027/2006, el Real Decreto 186/2023, el Real Decreto 102/2011 y la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.

1.2. *Scrubbers* y sus tipos

Debido al elevado precio de los combustibles de bajo contenido en azufre, muchos armadores

prefieren seguir empleando combustibles con alto contenido de azufre. De esta forma, es imprescindible recurrir a tecnologías como los *scrubbers* para poder cumplir con las regulaciones de la Organización Marítima Internacional (OMI).

Existen dos tipos principales de *scrubbers*: secos y húmedos. En primer lugar, los *scrubbers* secos emplean productos químicos sólidos (por ejemplo CaO) para limpiar las emisiones del buque antes de ser expulsados. Por otra parte, los *scrubbers* húmedos emplean agua de mar, los gases de escape se mezclan en dicha agua alcalina y sus componentes solubles se eliminan por disolución y reacción. Dentro de los sistemas húmedos se distinguen tres sistemas diferentes: abierto, cerrado o híbrido (Environmental Protection Agency Washington DC., 2011).

Los sistemas de circuito cerrado requieren que las aguas residuales se descarguen en instalaciones adecuadas. En estos sistemas, se introduce sosa cáustica en el agua de lavado para neutralizar los óxidos de azufre en los gases de escape, y luego, se purga una pequeña cantidad de agua de lavado que se trata para eliminar los sólidos en suspensión. Por otro lado, los sistemas de circuito abierto liberan estas aguas residuales directamente en el océano (Environmental Protection Agency Washington DC., 2011).

Estos *scrubbers* pueden eliminar hasta el 99% de los SOx y el 98% de las partículas del combustible con alto contenido de azufre antes de ser expulsadas (Álvarez, 2021).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es analizar el impacto en la calidad del aire y la concentración de óxidos de azufre en la atmósfera de la Bahía de Algeciras generado por la actividad portuaria. Los objetivos específicos incluyen evaluar la calidad del aire en la zona portuaria, estimar la concentración de SOx en el aire y analizar el flujo del tráfico marítimo para comprender mejor el contexto ambiental.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El puerto de Algeciras, en conjunto con sus instalaciones administradas por la Autoridad

Portuaria de la Bahía de Algeciras (APBA), no se limita únicamente a las terminales situadas en el municipio de Algeciras, sino que se extiende a lo largo de la bahía, abarcando también los municipios de Los Barrios, San Roque y La Línea de la Concepción. Además, Tarifa, a pesar de contar con su propia terminal portuaria, forma parte de esta extensa área portuaria (Rosales Alonso, 2018).

Este puerto se encuentra estratégicamente ubicado en el Estrecho de Gibraltar, jugando un papel fundamental en la conexión entre Europa y África, siendo un punto importante de mercancías y pasajeros (Puerto de Algeciras). Durante el año 2022, el puerto recibió un total de 1.000 megabuques, lo que ha dado lugar a la emisión de contaminantes que impactan la calidad del aire en la Bahía de Algeciras (Rodríguez-García, 2023).

4. METODOLOGÍA

La información utilizada en este estudio se recopiló de diferentes fuentes, como han sido Google Académico. Se establecieron criterios específicos para la selección de datos, los cuales incluyeron palabras claves como “scrubbers”, “contaminación”, “emisiones atmosféricas”, “MARPOL”, gases de efecto invernadero (GEI)” y “Puerto de Algeciras”. Los resultados de las búsquedas se filtraron y se priorizó la selección de aquellos publicados después de 2015, dándole mayor importancia a estudios similares al presente caso.

Los datos relativos al tráfico marítimo del Puerto de Algeciras se obtuvieron de la base de datos de Clarkson, la cual resultó fundamental para conocer la cantidad de buques que acceden anualmente al puerto. Además, proporcionó información sobre qué buques disponen de scrubbers desde 2015, lo que permitió analizar la evolución en el uso de esta tecnología.

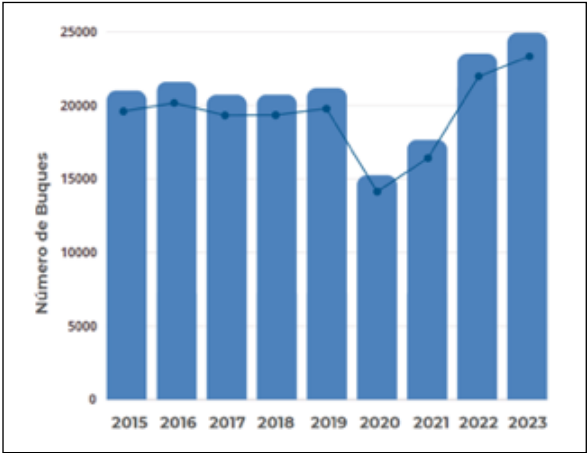
En cuanto a los datos sobre la calidad del aire, se obtuvieron de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Se aplicaron filtros específicos para obtener información sobre las emisiones e inmisiones de gases como el SO₂, el NO y el CO₂, centrándose en la actividad marítima en la zona de Algeciras.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Puerto Bahía de Algeciras lidera el tráfico portuario en España, representando el 19% del total nacional en 2023 (Estadísticas Puerto del Estado), con un tráfico que en los dos últimos años se encuentra en aumento comparándolo con los datos previos a la pandemia como se observa en la tabla 1 (Clarkson Worldf Feet Register, 2024). Destaca especialmente en el movimiento de contenedores, reflejando un desarrollo notable a lo largo de distintas etapas y la creación de nuevas infraestructuras para hacer frente a la demanda. Además, el tráfico de ferris es significativo, especialmente en colaboración con Tánger Med en Marruecos, facilitando los intercambios comerciales y el transporte de pasajeros (Llovera, 2021) .

El crecimiento del puerto no se limita a la expansión física, sino que implica una gestión compleja adaptada a las demandas de las cadenas logísticas internacionales. Actualmente, el enfoque se centra en la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la integración del entorno.

Tabla 1. Evolución del número de buques en el puerto de Algeciras de 2015 a 2023. Fuente Clarkson



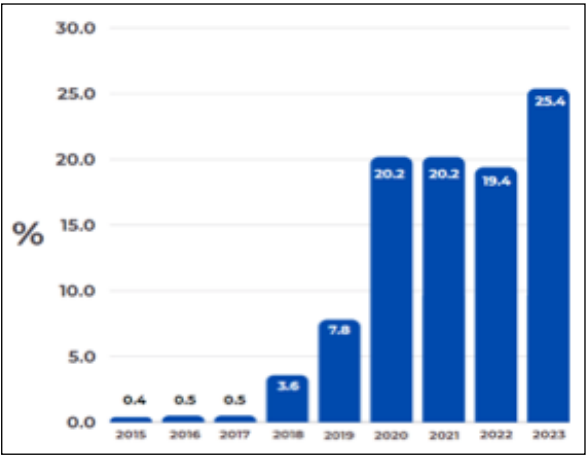
5.1. Evolución del uso de scrubbers

Desde el año 2019, antes de la introducción de la nueva normativa MARPOL, ha habido un aumento significativo en la utilización de scrubbers en el puerto de Algeciras. En ese año, el porcentaje de buques que utilizaban scrubbers

aumentó del 3,6% al 7,8%. Sin embargo, el mayor incremento se produjo en 2020, con un 20,2% de buques equipados con esta tecnología, y en la actualidad, el 25,4% de los barcos que llegan al puerto cuentan con *scrubbers* instalados (Figura 2).

Estos datos resaltan la transición gradual hacia prácticas más sostenibles y la reducción de emisiones atmosféricas en el entorno portuario.

Tabla 2. Evolución, en porcentaje, de buques equipados con scrubbers que han accedido al Puerto de Algeciras de 2015 a 2023. Fuente Clarkson



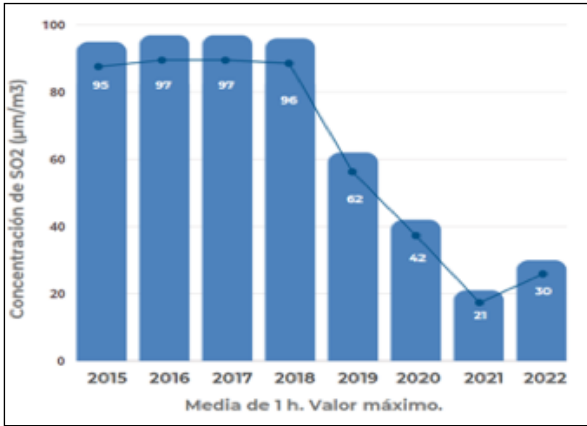
5.2. Evaluación del impacto ambiental

La Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras ha implementado medidas para supervisar y preservar la calidad del aire en el área portuaria. Durante el año 2019, se redactaron directrices técnicas para solicitar propuestas para la provisión e instalación de dos equipos de monitoreo de la calidad del aire, con el propósito de analizar los parámetros pertinentes y divulgar los resultados al público. Estos dispositivos emplean tecnologías basadas en microsensores y generan informes mensuales junto con alertas en caso necesario. Asimismo, se han introducido sistemas para detectar olores y llevar a cabo una vigilancia constante de la concentración de gases y partículas, como NO₂, SO₂, O₃, CO y PM₁, PM_{2.5}, y PM₁₀. (Puerto de Algeciras, 2021).

Con respecto a la contaminación por ácido sulfhídrico, se fijó en el año 2018 un tope máximo

de 2,00 ppm en los productos petrolíferos manipulados en los puertos administrados por la Autoridad Portuaria, con el propósito de reducir los efectos ambientales y resguardar la salud pública. Los operadores deben acatar y respetar este límite, instalando equipos de análisis y alertas electrónicas para asegurar el cumplimiento de las normas establecidas (Puerto de Algeciras, 2021).

Tabla 3. Evolución de la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en la atmósfera de Algeciras. Fuente Rediam



La concentración de dióxido de azufre (SO₂) en la atmósfera de Algeciras ha mostrado una tendencia a descender en los últimos años, reflejando una disminución significativa en el año 2019 tal y como se observa en la tabla 3. Este descenso coincide con el periodo previo a la implementación de límites en las emisiones de SO_x conforme a MARPOL. Además, este año, como se ha mencionado anteriormente, marcó un auge en la instalación de *scrubbers*, lo que potencialmente contribuye a la reducción de las emisiones de azufre en la zona portuaria.

Sin embargo, en el año 2022, se observa un repunte en la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera de la región. Este aumento se puede relacionar con el incremento en el número de buques que acceden al puerto en comparación con el año anterior, pues en 2022 el transporte en dicho puerto aumenta un 33% respecto al 2021. Este hecho puede haber contribuido al aumento en la concentración de contaminantes en la zona

a pesar de las medidas implementadas para reducirlos.

La conversión de esta área en una Zona de Control de Emisiones de Azufre (SECA) podría resultar en una notable reducción del 94% en las emisiones de SOx. En 2019, los países signatarios del Convenio de Barcelona acordaron colaborar en una propuesta para designar el Mar Mediterráneo como una Zona de Control de Emisiones de Óxidos de Azufre (SOx ECA), en respuesta a las emergencias climáticas y de salud pública. Esta medida situaría al Mediterráneo como la cuarta zona de control de emisiones de Europa y la quinta a nivel mundial (Moreno-Gutiérrez, 2023).

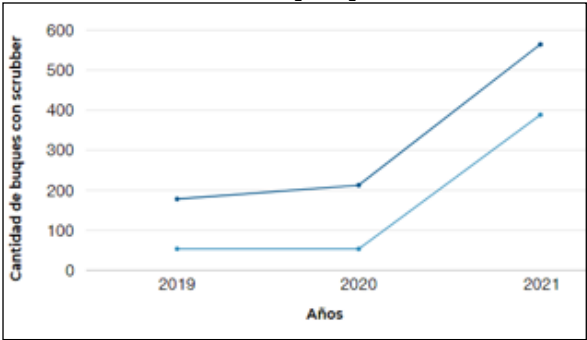
El registro de emisiones Rediam de gases producidos por el tráfico marítimo en Algeciras, durante el periodo comprendido entre 2019 y 2021, revela una tendencia general a la disminución de emisiones. Este descenso se atribuye principalmente a la reducción del tráfico marítimo experimentado en los años 2020 y 2021, como consecuencia de la emergencia sanitaria provocada por la pandemia de COVID-19 (Tabla 4).

Tabla 3. Emisiones de CO₂, NO_x y SO₂ en el puerto de Algeciras durante el periodo 2019-2020

Año	CO2 (kt)	NOx (t)	SO2 (t)
2019	444,08	8674,45	2495,96
2020	331,77	6227,68	1561,23
2021	190,72	491,20	338,07

Sin embargo, si se analizan los datos más detalladamente, se observa que el descenso experimentado por los NO_x y SO_x es mucho más pronunciado que el producido por el CO₂, lo que indica la eficacia de las medidas aplicadas para el control de dichos gases. En la tabla 5 se representan las razones CO₂/NO_x y CO₂/SO₂, las cuales experimentan una marcada alza en 2021 como efecto de la disminución de los óxidos de nitrógeno y azufre frente al CO₂, debido a la entrada en vigor de las medidas emanadas del anexo VI de MARPOL.

Tabla 5. Representación de las razones CO₂/NO_x y CO₂/SO₂



Cabría preguntarse si la calidad del agua portuaria puede haberse visto perjudicada por los vertidos de aguas de lavado. En este puerto el vertido de estas aguas está prohibido, por lo que los buques provistos de *scrubber* que arriban a este puerto deben o poner *scrubber* en modo cerrado o sustituir el combustible al acercarse a la zona portuaria. El control de estos posibles vertidos es complejo, por lo que debería incrementarse los medios de control de estos, junto con una monitorización específica de las aguas portuarias para asegurar que no se ven impactadas negativamente por estos vertidos.

6. CONCLUSIONES

La instalación de *scrubbers* en buques en el Puerto de Algeciras puede resultar una estrategia eficaz para reducir las emisiones atmosféricas, especialmente de SO_x, en el tráfico marítimo. Esta tecnología surge como una alternativa viable para cumplir con los límites de emisiones establecidos por normativas internacionales como el Convenio MARPOL, impulsada en parte por los elevados precios de los combustibles con bajo contenido de azufre.

La adopción gradual de *scrubbers* destaca la importancia de adoptar una perspectiva más integral que equilibre las necesidades del sector marítimo con la preservación del medio ambiente. En el Puerto de Algeciras, la implementación progresiva de *scrubbers* y el uso de combustibles pobres en azufre parece estar contribuyendo positivamente a la disminución de las emisiones de SO₂, lo que sugiere una mejora en la calidad del aire en la zona portuaria.

La instalación de *scrubbers* en buques en el Puerto de Algeciras representa un avance significativo hacia la mitigación de los impactos ambientales del transporte marítimo. No obstante, es fundamental seguir monitoreando y evaluando el impacto de estas tecnologías para garantizar un desarrollo portuario sostenible y la protección a largo plazo del entorno marítimo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Algeciras, P. d. (s.f.). Carta de Servicios del Puerto Bahía de Algeciras.
- Álvarez, P. S. (2021). From maritime salvage to IMO 2020 strategy: Two actions to protect the environment. *Marine Pollution Bulletin*, 170.
- Clarkson World Fleet Register. (2024).
- Environmental Protection Agency Washington DC. (2011). Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent (p. 0047).
- Estadísticas Puerto del Estado. (s.f.). <https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/default.aspx>
- Llovera, J. A. (2021). Entre 2 mares y 2 continentes. Un puerto para el siglo XXI. Editorial Planeta, S.A.
- Moreno-Gutiérrez, J. &.-G. (2023). Towards the declaration of the strait of Gibraltar as an environmental controlled area. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115042.
- Puerto de Algeciras. (2021). Declaración Ambiental.
- Puerto de Algeciras. (s.f.). Carta de Servicios Puerto Bahía de Algeciras.
- Rodríguez-García, M. I.-G.-E.-A. (2023). Air Pollution forecasting using Long Short-Term

Memory Networks in the Bay of Algeciras (Spain). *Transportation Research Procedia*, 71, 339-346.

- Rosales Alonso, F. J. (2018). Evolución del Puerto de Algeciras hacia el concepto de Smart Port. Trabajo Fin de Master. Universidad de Comillas.

Vanesa Guzmán

Profesora del Departamento de Tecnologías del Medio ambiente. UCA

José Daniel Márquez-Güelfo

Profesor del Departamento de Tecnologías del Medio ambiente. UCA

Enrique Nebot

Profesor del Departamento de Tecnologías del Medio ambiente. UCA

Cómo citar este artículo

Vanesa Guzmán, José Daniel Márquez-Güelfo y Enrique Nebot. "Análisis del impacto ambiental asociado al lavado de gases de escape en buques mediante *scrubbers* y evaluación de tecnologías para su minimización. Caso del Puerto de Algeciras". *Almoraima. Revista de Estudios Campogibaltareños* (61), octubre 2024. Algeciras: Instituto de Estudios Campogibaltareños, pp. 195-200.
