



Metodología para Estimar la Huella de Carbono de los Buques en el Puerto de Bahía Blanca

Methodology for Assessing the Carbon Footprint of Vessels in the Port of Bahía Blanca

Presentación: xx/10/2024

Guillermo Friedrich

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca
gfried@frbb.utn.edu.ar

Aloma Sartor

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca
asartor@frbb.utn.edu.ar

Daniela Escudero

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca
gfried@frbb.utn.edu.ar

Resumen

El Grupo de Estudios de Ingeniería Ambiental de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca realizó la estimación de la Huella de Carbono (HC) del Puerto de Bahía Blanca, incluyendo las actividades industriales que se desarrollan en su ámbito, para 2017 y 2020. Actualmente se trabaja sobre 2023.

Los resultados muestran que la HC total está fuertemente determinada por las actividades industriales, ya sea por sus emisiones directas como por los consumos de energía eléctrica. Sin embargo, cuando se consideran las actividades específicamente relacionadas con el movimiento portuario, las tres modalidades de transporte (buques, camiones y trenes) explican el 89% de la HC. Según resultados de 2017, los camiones aportaron el 49,2%, los buques 36,1% y el tren 3,9%. Cuando se considera la distancia recorrida y el tonelaje transportado, los buques resulta ser los más eficientes en términos de emisiones por tonelada-kilómetro.

El objetivo del presente trabajo es describir la metodología utilizada para estimar la HC del transporte marítimo, que pone en evidencia aspectos que permitirían proponer estrategias de mitigación para mejorar aún más su desempeño.

Palabras clave: Huella de Carbono, Puertos, Transporte marítimo, Estimación.

Abstract

The Environmental Engineering Studies Group of the National Technological University, Bahía Blanca Regional Faculty, estimated the Carbon Footprint (CF) of the Port of Bahía Blanca. It included the industrial activities carried out in the port area for 2017 and 2020. Currently, data from 2023 are being worked on.

The results have shown that the total CF is strongly determined by industrial activities, either by their direct emissions or by the consumption of electric energy. However, when the specific activities of port movement are considered, the three modes of transport (ships, trucks and trains) explain 89% of the CF. According to 2017 results, trucks contributed 49.2%, ships 36.1% and trains 3.9%. Considering the distance traveled and the tonnage transported, ships are the most efficient in terms of emissions per tonne-kilometer.

The goal of this paper is to describe the methodology used to estimate the CF of maritime transport, highlighting aspects that would allow proposing mitigation strategies to improve its performance.



Keywords: Carbon Footprint, Ports, Maritime Transport, Estimation.

Introducción

El Grupo de Estudios de Ingeniería Ambiental (GEIA) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca (UTN-FRBB) realizó la estimación de la Huella de Carbono (HC) del Puerto de Bahía Blanca (PBB), incluyendo las actividades industriales que se desarrollan en su ámbito, para 2017 y 2020. Actualmente se está trabajando en la determinación de la HC de 2023. Estos trabajos se vienen realizando mediante convenios entre la UTN-FRBB y el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (CGPBB).

Los resultados muestran que la HC total está fuertemente determinada por las actividades industriales, ya sea por sus emisiones directas como por los consumos de energía eléctrica. Al respecto, las emisiones de procesos explican el 73% de la HC total.

Debido a que las emisiones de procesos de las plantas industriales no están bajo el control del CGPBB, para realizar el análisis de los resultados de la HC se excluyeron dichas emisiones, y se incluyó la totalidad del transporte terrestre que se movió por el área del PBB, considerando que esto permitiría al CGPBB tener una mirada general sobre el transporte terrestre y llevar adelante acciones para definir estrategias de mitigación (por ejemplo: favorecer el transporte en tren). Como de esta manera se tienen a la vista las emisiones por consumo de electricidad de las industrias, el CGPBB puede impulsar acciones para migrar a energías limpias.

La Tabla 1 muestra los resultados de la HC y el aporte de las tres modalidades de transporte para 2017 y 2020.

Datos	2017		2020	
	[t CO _{2eq}]	%	[t CO _{2eq}]	%
HC total sin emisiones de procesos	406.717	100%	407.920	100%
Buques	54.632	13,4%	51.167	12,5%
Camiones	141.107	34,7%	148.953	36,5%
Trenes	17.516	4,3%	23.275	5,7%

Tabla 1: Huella de Carbono de las tres modalidades de transporte con respecto al total sin emisiones de procesos.

Sin embargo, si sólo se consideran las actividades relacionadas con el movimiento portuario, las tres modalidades de transporte (buques, camiones y trenes) explican el 89,2% de la HC (según datos de 2017), como se observa en la Tabla 2.

Datos	2017	
	[t CO _{2eq}]	%
HC de actividad portuaria	151.465,2	100%
Buques	54.632	36,1%
Camiones	74.569,4	49,2%
Trenes	5.916	3,9%

Tabla 2: Huella de Carbono de las tres modalidades de transporte con respecto al total portuario.

Si bien el transporte marítimo es el que tiene la mayor eficiencia en términos de la HC, el análisis de la composición de la misma permite evaluar la posibilidad de definir estrategias para mejorarlala. Con esta motivación, en el presente trabajo se describe la metodología utilizada para el cálculo de la HC del transporte marítimo. Básicamente, la HC producida por los buques se debe a la combustión de fuel-oil, gas-oil u otros combustibles líquidos, ya sea para sus máquinas propulsoras, auxiliares o calderas. Dependiendo de la situación del buque: navegando, fondeado, en maniobra o en muelle, el régimen de trabajo de cada una de sus máquinas es diferente, por lo que el trabajo comienza por determinar los tiempos de permanencia de cada



buque en cada estado; este régimen de trabajo también depende de la tipología de cada buque. En la Tabla 3 se presenta el aporte porcentual de cada etapa a la HC total de los buques, en la que se observa que los tiempos no operativos (fondeo y esperas) representan casi un 42% del total, dando lugar a evaluar posibles mejoras logísticas y técnicas.

Etapa	Fondeo	Tránsito	Maniobra	Espera pre-operación	Operación	Espera entre operaciones	Espera zarpada
HC %	13,6%	17,3%	2,9%	5,5%	38,2%	17,4%	5,2%

Tabla 3: Aporte porcentual de cada etapa a la Huella de Carbono total de los buques.

Desarrollo

Cálculo de la Huella de Carbono

Se considera que la HC producida por los buques se origina en la combustión realizada por las máquinas propulsoras, máquinas auxiliares y calderas auxiliares. La HC se calcula en base a la energía generada por cada tipo de máquina multiplicado por un factor de emisión determinado. La energía se calcula a partir de la potencia de la máquina, el factor de carga a que está sometida la misma y la duración de la actividad:

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \cdot \text{FactorDeCarga} \cdot T_{\text{actividad}} \quad (1)$$

La potencia de cada máquina depende de las características propias del buque; el factor de carga depende del estado operativo del buque, y la duración de la actividad se obtiene de los registros que se explican en la sección siguiente.

Luego, el valor de energía se multiplica por el correspondiente factor de emisión, para obtener la HC:

$$\text{Emisiones} [\text{tCO}_2_{\text{eq}}] = \text{Energía} [\text{kW} - \text{h}] \cdot \text{Factor de Emisión} [\text{tCO}_2_{\text{eq}}/\text{kW} - \text{h}] \quad (2)$$

En la Tabla 4 se presentan los factores de emisión utilizados para el cálculo de la HC de 2020, que fueron adoptados de (POLA, 2019) y (SPBP, 2019).

Tipo de máquina	Factor de Emisión [t CO2 eq/kW-h]
Propulsión	0,000629862
Auxiliares	0,000692778
Calderas	0,000994842

Tabla 4: Factores de emisión de máquinas de buques

Para estimar la potencia de las distintas máquinas en cada modo de operación se han tomado como referencia los documentos (WPCI, 2010), el Inventario de Emisiones del Puerto de Los Ángeles del año 2007 (POLA, 2007), que es una de las bases de WPCI (2010), y los Inventarios de Emisiones del año 2019 de los Puertos de Los Ángeles (POLA, 2019) y Long Beach (POLB, 2019). Esto se explica en una sección subsiguiente.

Estados operativos de los buques

Debido a las características del puerto de Bahía Blanca, con un canal de acceso de 97 km de longitud, a veces dependiente de las mareas para ser atravesado, y de la disponibilidad en los sitios de amarre para realizar las operaciones de carga y descarga, los buques pueden estar en alguna de las siguientes situaciones:



- Fondeo fuera del canal de acceso: a la espera de ingreso al puerto, por disponibilidad de tránsito por el canal (el ancho del canal no admite que se crucen buques transitando en sentido contrario), como por la posibilidad de amarrar en el sitio al que tiene que arribar, y en algunos casos profundidades mayores.

- Tránsito: recorriendo el canal de acceso, ingresando o saliendo.
- Maniobra: por lo general con la asistencia de remolcadores, tanto para el amarre como para la zarpada.
- Espera en muelle: puede ser operativa, si está efectuando operaciones de carga o descarga, o bien no operativa, esperando para poder operar o para zarpar.

Determinación de tiempos

Para determinar el tiempo de permanencia en cada estado se consultó la base de datos del Sistema de Control del Tráfico Marítimo (VTS: Vessel Traffic Services), que lleva el registro de los siguientes instantes de tiempo:

- Ingreso al sistema: cuando el buque llega a la entrada del canal de acceso.
- Amarre.
- Inicio Operación: Típicamente es el comienzo de las operaciones de carga y/o descarga.
- Fin Operación: Finaliza la carga y/o descarga.
- Zarpada.

En base a estos tiempos se calculan las duraciones de los distintos estados:

- Fondeo: se asume que el tránsito del canal de acceso demanda 4,5 hs y luego la maniobra de amarre dura 1,5 hs. Entonces, el tiempo de fondeo antes de entrar al canal se calcula por la diferencia entre el ingreso al sistema y el amarre, menos el tránsito de entrada y la maniobra de amarre:

$$T_{fondeo} = t_{amarre} - t_{ingreso.al.sistema} - T_{tránsito.entrada} - T_{maniobra.amarre} \quad (3)$$

- Espera No Operativa: es el tiempo que el buque permanece en el muelle a la espera de que se realicen las operaciones de carga y/o descarga. Se calcula por diferencia entre el momento del amarre y el inicio de operaciones:

$$T_{EsperaNoOp} = t_{inicio.operación} - t_{amarre} \quad (4)$$

- Espera Operativa: es el tiempo que el buque permanece amarrado durante las operaciones de carga y/o descarga. Se calcula por diferencia entre los momentos de inicio y fin de operación:

$$T_{EsperaOper} = t_{fin.operación} - t_{inicio.operación} \quad (5)$$

- EsperaZarpada: es el período de tiempo que el buque permanece amarrado a la espera de que pueda efectuar la zarpada (esperando marea, que el canal esté libre para transitarlo, etc.). Se calcula por diferencia entre el momento de la zarpada y el de fin de operación.

$$T_{EsperaZarpada} = t_{zarpada} - t_{fin.operación} \quad (6)$$

Luego de la zarpada se considera que hay un tiempo de maniobra de desamarre de 0,5 hs. Y finalmente las 4,5 hs de tránsito de salida por el canal.

Potencias y factores de emisión según el estado operativo



La potencia de las distintas máquinas de los buques depende de su condición operativa:

- Durante la etapa de tránsito WPCI (2010) considera que la máquina principal (propulsora), además de impulsar al buque, a través del economizador genera vapor, energía eléctrica y otras funciones auxiliares. Y las máquinas auxiliares operan a una fracción de su potencia.

- Durante las etapas de estadía en muelle y fondeo se considera que las máquinas propulsoras están apagadas y en cambio están trabajando las máquinas auxiliares y calderas auxiliares. El régimen de trabajo de estas máquinas depende del tipo de buque.

- Durante la etapa de maniobra se asumió que las máquinas propulsoras están apagadas y que las máquinas auxiliares y calderas auxiliares operan a una potencia que varía según el tipo de buque. En esta etapa también participan uno o dos remolcadores, cuyas potencias de máquinas propulsoras y auxiliares también se tienen en cuenta para el cálculo de la HC.

Las potencias de las máquinas propulsoras fueron obtenidas de la base de datos de Equasis (<https://www.equasis.org/EquasisWeb/restricted/ShipInfo?fs=Search>) para cada buque que operó en el PBB durante 2020. De la misma se obtuvo la potencia máxima de la máquina propulsora y la velocidad máxima que puede desarrollar el buque. La velocidad máxima se utiliza para obtener el factor de carga de la máquina propulsora, según la fórmula (7) que la relaciona con la velocidad efectiva de tránsito (vel_{actual}).

$$FactorDeCarga_{propulsora} = \left(\frac{vel_{actual}}{vel_{máxima}} \right)^3 \quad (7)$$

Las potencias de las máquinas auxiliares y calderas auxiliares fueron adoptadas de un promedio ponderado calculado según valores obtenidos de (POLA, 2019) y (POLB, 2019), para las tipologías de buques a los que se asimilaron los que operaron en el PBB. Estas equivalencias y potencias se presentan en la Tabla 5.

Tipo de buque en PBB 2020	Asimilado a:	Potencia Auxiliares [kW]				Potencia Calderas [kW]			
		Trán- sito	Manio- bra	Mue- lle	Fon- deo	Trán- sito	Manio- bra	Mue- lle	Fon- deo
Carga General	General Cargo	457	1204	629	180	56	124	160	160
Porta- contenedores	Container-2000	972	2119	983	958	147	284	354	352
Factoría	Pesquero	90	90	90	90	0	0	0	0
Gasero	Tanker-Chemical	637	865	882	402	59	136	568	255
Granelero	Bulk	299	785	195	253	35	94	125	125
Pesquero	(*)	406	406	406	406	0	0	0	0
Quimiquero	Tanker-Chemical	637	865	882	402	59	136	568	255
Tanquero	Tanker-Handysize	540	621	794	560	144	144	2586	144
Remolcador	(*)		156						

Tabla 5: Potencias por defecto de máquinas auxiliares y calderas auxiliares de buques

(*) Al no haber equivalentes en (POLA, 2019) y (POLB, 2019), se aplicaron los siguientes factores de carga obtenidos de (WPCI, 2010) al promedio de las potencias reales de pesqueros, buques factoría y remolcadores (Tabla 6).



Tipo de buque	Asimilado a:	Factor de Carga	
		Propulsora	Auxiliares
Remolcador	Assis Tug	0,31	0,43
Pesquero	Comercial Fishing	0,27	0,43

Tabla 6: Factores de carga de remolcadores y pesqueros

Ejemplo de cálculo:

- Buque químero (Nida Star) con una sola operación:

$t_{ingreso.al.sistema}$: 28/07/2020 06:00

t_{amarre} : 04/08/2020 15:02

$$T_{fondeo} = t_{ingreso} - t_{ingreso.al.sistema} - T_{tránsito.entrada} - T_{maniobra.amarre} = 177,03 \text{ hs} - 4,5 \text{ hs} - 1,5 \text{ hs} = 171,03 \text{ h}$$

$t_{inicio.operación}$: 03/11/2020 13:00

$t_{fin.operación}$: 06/11/2020 16:00

$$T_{esperaOper} = t_{fin.operación} - t_{inicio.operación} = 75 \text{ h}$$

$$T_{esperaNoOp} = (t_{fin.operación} - t_{amarre}) - T_{esperaOper} = 3,24 \text{ h}$$

$t_{zarpada}$: 06/11/2020 23:08

$$T_{esperaZarpada} = t_{zarpada} - t_{fin.operación} = 3,24 \text{ h}$$

Considerando las potencias de Tabla 4 y los factores de emisión de Tabla 3, la HC de cada etapa es:

$$\begin{aligned} HC_{fondeo} &= 402 [\text{kW}] \cdot 171,03 [\text{h}] \cdot 0,000692778 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ &255 [\text{kW}] \cdot 171,03 [\text{h}] \cdot 0,000994842 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] = 91,02 [\text{t CO}_{2\text{eq}}] \end{aligned}$$

$$T_{muelle} = T_{esperaNoOp} + T_{esperaOper} + T_{esperaZarpada} = 3,24 [\text{h}] + 75 [\text{h}] + 3,24 [\text{h}] = 81,48 [\text{h}]$$

$$\begin{aligned} HC_{muelle} &= 882 [\text{kW}] \cdot 81,48 [\text{h}] \cdot 0,000692778 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ &568 [\text{kW}] \cdot 81,48 [\text{h}] \cdot 0,000994842 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] = 95,83 [\text{t CO}_{2\text{eq}}] \end{aligned}$$

Para calcular la HC durante la maniobra se considera un tiempo de 1,5 h para el amarre y 0,5 para la zarpada. La HC producida por los remolcadores involucrados en estas maniobras se calcula por separado.

$$\begin{aligned} HC_{maniobra} &= 865 [\text{kW}] \cdot 2 [\text{h}] \cdot 0,000692778 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ &136 [\text{kW}] \cdot 2 [\text{h}] \cdot 0,000994842 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] = 1,46 [\text{t CO}_{2\text{eq}}] \end{aligned}$$

Para calcular la HC durante el tránsito por el canal, entrada y salida, se asume que cada recorrido de los 97 km demanda 4,5 h; esto equivale a una velocidad de 11,6 kn. Luego, de las bases de datos se obtuvo que la potencia nominal de las máquinas propulsoras es 5920 kW y la velocidad máxima 14,6 kn. Con estos valores, la HC es:

$$HC_{tránsito} = 5920 [\text{kW}] \cdot (11,6 / 14,6)^3 \cdot (2 \cdot 4,5) [\text{h}] \cdot 0,000629862 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] = 16,83 [\text{t CO}_{2\text{eq}}]$$

Por lo tanto, la HC total es la suma de las cuatro calculadas previamente:

$$HC_{total} = HC_{fondeo} + HC_{tránsito} + HC_{maniobra} + HC_{muelle} = 205,14 [\text{t CO}_{2\text{eq}}]$$



Finalmente, la HC producida por los remolcadores se calcula en base a los factores de emisión de Tabla 5, considerando que la potencia de las máquinas propulsoras y de las máquinas auxiliares son, respectivamente, 885 kW y 156 kW. Estas potencias se calcularon como el promedio de las potencias de los remolcadores de los que se tiene esa información.

En el caso considerado operaron dos remolcadores para el amarre y uno para la zarpada. Por lo tanto, la HC de los remolcadores fue:

$$\begin{aligned} \text{HC}_{\text{remolcadores}} = & 2 \cdot 885 [\text{kW}] \cdot 0,31 \cdot 1,5 [\text{h}] \cdot 0,000629862 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ & 885 [\text{kW}] \cdot 0,31 \cdot 0,5 [\text{h}] \cdot 0,000629862 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ & 2 \cdot 156 [\text{kW}] \cdot 0,43 \cdot 1,5 [\text{h}] \cdot 0,000692778 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] + \\ & 156 [\text{kW}] \cdot 0,43 \cdot 0,5 [\text{h}] \cdot 0,000692778 [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}] = 0,77 [\text{t CO}_2 \text{ eq}] \end{aligned}$$

Para los casos en que el buque tiene que realizar más operaciones durante la estadía, si las mismas son discontinuadas el tiempo entre ellas se suma a la espera no operativa.

Conclusiones

El cálculo de la HC de los buques que operan en un puerto permite detectar oportunidades de mejora en términos de acciones de mitigación. Debido a que los cálculos dependen del tiempo, esto da lugar a analizar cómo disminuir los tiempos de fondeo o de estadía improductivos, lo que está directamente relacionado con la logística y el potencial de mejora asociado a la incorporación de un sistema integrado de control de las operaciones de carga y descarga. Asimismo se pudo apreciar en el ejemplo precedente que la HC producida durante la estadía en el muelle es una parte importante de la HC total, y en cierta medida se debe a la combustión en las máquinas auxiliares que generan electricidad. Esto da lugar a evaluar la factibilidad y conveniencia de proveer de energía eléctrica de fuentes renovables a los buques, desde instalaciones en tierra, durante su estadía en el muelle.

Referencias

WPCI (2010). Carbon Footprinting for Ports Guidance Documents. Web: https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Carbon_Footprinting_Guidance_Document.pdf

POLA (2007). Port of Los Angeles. Inventory of Air Emissions (2007).
https://kentico.portoflosangeles.org/getmedia/828afe97-0f6d-482b-88bd-e89793597ed1/2007_Air_Emissions_Inventory

POLA (2017). Port of Los Angeles. Inventory of Air Emissions (2017).
https://kentico.portoflosangeles.org/getmedia/880bc597-84bc-4ae6-94e2-59a2e6027f42/2017_Air_Emissions_Inventory

POLA (2019). Port of Los Angeles. Inventory of Air Emissions (2019).
https://kentico.portoflosangeles.org/getmedia/4696ff1a-a441-4ee8-95ad-abe1d4cddf5e/2019_Air_Emissions_Inventory

POLB (2019). Port of Long Beach. Inventory of Air Emissions (2019). <https://polb.com/download/14/emissions-inventory/10596/2019-air-emissions-inventory.pdf>

SPBP (2019). San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report, version 1.
www.portoflosangeles.org/environment/air-quality/air-emissions-inventory