



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

ESTUDIOS DE EMISIONES EN PUERTOS Y TERMINALES MARÍTIMOS

FELIPE GANA ORTEGA¹, ALAN ZHANG²

RESUMEN

El análisis de emisiones es crucial para comprender y mitigar los impactos ambientales de los contaminantes liberados por los puertos y terminales marítimos. Este artículo describe los pasos fundamentales, las consideraciones y los estudios de casos en el análisis de emisiones, centrándose especialmente en la metodología de estimación de emisiones para el equipo de manipulación de contenedores (CHE) además de los beneficios de la automatización en la reducción de emisiones, con un ejemplo en un terminal portuario.

¹ Software Developer, Moffatt & Nichol, fgana@moffattnichol.com

² Simulation Lead, Moffatt & Nichol, azhang@moffattnichol.com

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de emisiones comienza definiendo el alcance y los objetivos. Los principales objetivos incluyen cuantificar las emisiones, identificar las fuentes y garantizar el cumplimiento de las normativas regulatorias. Es fundamental identificar contaminantes específicos como CO₂, NO_x, SO_x, material particulado (PM) y gases de efecto invernadero (GEI). La recopilación de datos es un paso crítico que implica reunir información sobre actividades como el consumo de combustible, tipos de motores, horas de operación y volumen de carga. Los factores de emisión, que suelen ser valores estándar proporcionados por las agencias reguladoras, relacionan la cantidad de contaminantes liberados con un nivel de actividad específico. Además, los datos de monitoreo de estaciones dentro y alrededor del área portuaria ofrecen mediciones directas esenciales para verificar y ajustar los resultados de los modelos. Las fuentes típicas de emisiones en puertos marítimos incluyen embarcaciones como cargueros, petroleros y barcos de pasajeros, equipos de manipulación de contenedores como grúas y montacargas, y métodos de transporte como por ejemplo, camiones y ferrocarriles. El equipo auxiliar, como vehículos de mantenimiento y generadores, también contribuye al perfil de emisiones de un puerto.

2. MARCO REGULATORIO

El marco normativo que rige el análisis de emisiones es extenso. La Organización Marítima Internacional (OMI) establece estándares internacionales, como el Anexo VI del Convenio MARPOL, que limita el contenido de azufre en los combustibles marinos y establece normas de emisiones de NO_x para motores marinos. Otro estándar significativo es el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), que tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética en los nuevos buques. En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) desempeña un papel crucial. El Clean Air Act (CAA) es la principal ley federal que regula la contaminación del aire, y el Programa de Mejora del Inventario de Emisiones (EIIIP) proporciona directrices para desarrollar inventarios de emisiones. La California Air Resources Board (CARB) aplica algunas de las regulaciones de calidad del aire más estrictas en Estados Unidos. Por ejemplo, las Regulaciones de Energía en Tierra requieren que las embarcaciones utilicen energía en tierra para reducir las emisiones mientras están atracadas. Estas agencias y sus directrices son esenciales para llevar a cabo análisis de emisiones exhaustivos y conformes en los puertos marítimos, proporcionando el marco necesario y los recursos para monitorear, informar y reducir las emisiones de manera efectiva.

En Chile, el Decreto 39 del Ministerio del Medio Ambiente de octubre de 2021 rige las normas de emisión para maquinarias móviles. En ella se entregan los factores de emisión para los contaminantes como CO, NO_x y Material Particulado de acuerdo a las diferentes potencias de los motores de combustión. Para vehículos, las guías de Medición de Contaminación Atmosférica cuentan con los factores de emisión para vehículos livianos, vehículos comerciales livianos, vehículos pesados y buses de acuerdo a la

cilindrada y normativa que cumple el motor (Euro 4, Euro 5, Euro 6, etc.). Las fórmulas utilizadas por la autoridad nacional corresponden a las entregadas por el Air Pollutant Emission Inventory Guidebook de la EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme / European Environment Agency).

3. INVENTARIO DE EMISIONES

Los dos puertos más grandes de Estados Unidos, Puerto de Los Angeles (POLA) y Puerto de Long Beach (POLB), recopilan y publican el informe del inventario de emisiones atmosféricas cada año. Una fuente importante de emisiones para ambos puertos es el equipo de Manipulación de Carga (CHE, por sus siglas en inglés). La metodología de estimación de emisiones para el CHE en puertos y terminales involucra varios pasos y consideraciones. El primer paso consiste en recopilar datos, que incluyen detalles del equipo como tipos de equipos, marca y modelo del motor, potencia nominal y año del modelo del equipo, tipo de combustible como diésel, gasolina y propano, datos operativos como las horas anuales de funcionamiento y otra información relevante, como las tecnologías de reducción de emisiones instaladas. Las emisiones del CHE se calculan utilizando una metodología coherente con la última metodología de CARB.

La ecuación básica utilizada para estimar las emisiones del CHE es:

$$\text{Emisiones} = \text{Población} * \text{Actividad} * \text{Potencia} * \text{Factor de Carga} * \text{Factor de Emisión (1)}$$

Donde:

- Población: La cantidad de cada tipo específico de equipo que opera en el puerto.
- Actividad: Refleja las horas promedio de funcionamiento anual del equipo.
- Potencia: Representa la potencia del motor, en caballos de fuerza o kilovatios.
- Factor de Carga: Considera que los motores no funcionan constantemente a su máxima potencia durante la operación regular, representando el porcentaje promedio de potencia utilizada durante la operación.
- Factor de Emisión: Representa la cantidad de un contaminante específico emitido por unidad de actividad, como gramos de contaminante por hora de potencia (g/hp-hr) o gramos por kilovatio-hora (g/kWh). El factor de emisión tiene en cuenta el año del modelo del motor, las normas de emisión aplicables, la degradación con el tiempo y las correcciones debidas a la aplicación de tecnología de reducción de emisiones o tipos específicos de combustibles (por ejemplo, el uso de diésel ultra bajo en azufre).

Como caso de estudio, Moffatt & Nichol replicó las emisiones de todos los contaminantes reportados por el Puerto de Los Angeles (POLA) en 2022 en toneladas métricas. Un total de 1.936 equipos de manejo de carga fueron inventariados, con su tipo de combustible, año del modelo, potencia (HP), horas de uso anuales y factor de carga. Usando los factores de emisión reportados por las guías de POLB y POLA para los diferentes tipos de motores del inventario, se calculó las emisiones de Material Particulado (PM, PM 2.5,

DPM), NOx, SO2, CO, HC, CO2, N2O y CH4, obteniendo diferencias acotadas con respecto a la medición original solamente a través de cálculo, un 40% de los contaminantes con valores con diferencias menores a 20% y un 54% en el mismo orden de magnitud del resultado reportado en la medición.

Entre los 1.936 equipos se identificó un total de 27 subgrupos de vehículos CHE tales como montacargas, bulldozers, grúas, RTG (Rubbered Tired Gantry Crane), Reach Stacker y camiones, entre otros, cada uno de los cuales puede ser comparado con el inventario realizado originalmente por el Puerto de Los Angeles.

En el estudio, se detectó que algunas de las diferencias corresponden a errores de aproximación: POLA utiliza solamente un decimal para reportar los resultados, luego para equipamientos que tienen emisiones totales en valores bajos de toneladas métricas, se obtienen diferencias de aproximación altas al buscar comparar valores de la misma magnitud. En ocasiones futuras en otros puertos, se buscará llegar a la medición exacta para comparación y validación del modelo de cálculo de modo de poder verificar el resultado con mayor precisión y de ese modo utilizarlo para predecir mejor resultados futuros.

Equipment	Engine	Source	PM10 tons	PM2.5 tons	DPM tons	NOx tons	SO2 tons	CO tons	HC tons	CO2 tonnes	N2O tons	CH4 tons
1 Bulldozer	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.0	74	-	-
		Calculated	0.0	0.0	0.0	0.5918	0.0	0.1	0.0	74	0.0	0.0
		% diff	-	-	-	+18%	-	+50%	-	-0%	-	-
2 Cone Vehicle	Diesel	POLA	0.1	0.0	0.1	1.5	0.0	2.0	0.2	176	-	-
		Calculated	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	3.2	0.3	174	0.0	0.0
		% diff	-28%	-	-28%	+10%	-	+61%	+64%	-1%	-	-
3 Crane	Diesel	POLA	0.1	0.0	0.1	1.6	0.0	0.6	0.1	272	-	-
		Calculated	0.1	0.0	0.1	1.7	0.0	0.7	0.2	270	0.0	0.0
		% diff	-46%	-	-46%	+6%	-	+11%	+57%	-1%	-	-
4 Forklift	Diesel	POLA	0.1	0.1	0.1	4.2	0.0	5.2	0.4	1,160	-	-
		Calculated	0.1	0.1	0.1	5.0	0.0	5.6	0.6	933	0.0	0.1
		% diff	+22%	+12%	+22%	+20%	-	+7%	+38%	-20%	-	-
5 Forklift	Gasoline	POLA	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	3.7	0.3	37	-	-
		Calculated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
		% diff	-	-	-	-100%	-	-100%	-100%	-100%	-	-
6 Forklift	LPG	POLA	0.1	0.1	0.0	3.8	0.0	28.5	1.6	1,088	-	-
		Calculated	0.1	0.1	0.0	3.3	0.0	25.4	1.2	807	0.0	0.0
		% diff	-21%	-21%	-	-12%	-	-11%	-28%	-26%	-	-
7 Loader	Diesel	POLA	0.2	0.2	0.2	4.9	0.0	5.6	1.0	2,323	-	-
		Calculated	0.3	0.3	0.3	6.3	0.0	7.2	1.8	2,302	0.1	0.1
		% diff	+38%	+27%	+38%	+29%	-	+29%	+77%	-1%	-	-
8 Man Lift	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	-	-
		Calculated	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	35	0.0	0.0
		% diff	-	-	-	-	-	-	-	+1660%	-	-
9 Man Lift	Gasoline	POLA	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.6	0.1	91	-	-
		Calculated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0.0	0.0
		% diff	-	-	-	-99%	-	-94%	-99%	-99%	-	-
10 Material Handler	Diesel	POLA	0.1	0.1	0.1	8.7	0.0	6.4	1.4	2,997	-	-
		Calculated	0.1	0.1	0.1	7.5	0.0	5.5	1.5	2,400	0.1	0.1
		% diff	+4%	-4%	+4%	-14%	-	-13%	+9%	-20%	-	-
11 Rail Pusher	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	68	-	-
		Calculated	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	67	0.0	0.0
		% diff	-	-	-	+10%	-	-19%	-	-1%	-	-

Equipment	Engine	Source	PM10 tons	PM2.5 tons	DPM tons	NOx tons	SO2 tons	CO tons	HC tons	CO2 tonnes	N2O tons	CH4 tons	
12	Reach Stacker	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	135	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	109	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	+21%	-	-30%	-	-19%	-	-
13	Hybrid RTG	Diesel	POLA	0.1	0.1	0.1	1.8	0.0	5.2	0.8	2,228	-	-
			Calulatec	0.2	0.2	0.2	3.5	0.0	7.1	1.7	2,212	0.1	0.2
			% diff	+106%	+89%	+106%	+93%	-	+36%	+109%	-1%	-	-
14	RTG crane	Diesel	POLA	1.9	1.7	1.9	99.3	0.2	37.8	10.0	16,995	-	-
			Calulatec	4.4	4.1	4.4	160.4	0.2	55.1	28.2	16,693	0.5	1.1
			% diff	+133%	+139%	+133%	+62%	-4%	+46%	+182%	-2%	-	-
15	Side pick	Diesel	POLA	0.1	0.1	0.1	2.3	0.0	4.0	0.5	1,723	-	-
			Calulatec	0.1	0.1	0.1	3.2	0.0	3.4	1.0	1,068	0.0	0.1
			% diff	+21%	+11%	+21%	+41%	-	-16%	+103%	-38%	-	-
16	Skid Steer Loader	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	46	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	46	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	+5%	-	+3%	-	-0%	-	-
17	Hybrid Straddle Carrier	Diesel	POLA	0.1	0.1	0.1	4.7	0.0	18.0	0.8	2,627	-	-
			Calulatec	0.2	0.2	0.2	5.9	0.0	18.6	1.0	2,503	0.1	0.2
			% diff	+70%	+56%	+70%	+25%	-	+3%	+20%	-5%	-	-
18	Straddle Carriers	Diesel	POLA	0.7	0.6	0.7	16.5	0.1	13.8	2.7	6,031	-	-
			Calulatec	1.4	1.3	1.4	21.0	0.1	21.3	8.7	6,008	0.2	0.4
			% diff	+97%	+111%	+97%	+27%	-30%	+54%	+222%	-0%	-	-
19	Sweeper	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	3.1	0.1	132	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.227790	0.0	0.5	0.0	160	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	-24%	-	-84%	-67%	+21%	-	-
20	Sweeper	Gasoline	POLA	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	165	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	-100%	-	-100%	-	-100%	-	-
21	Telehandler	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	32	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	63	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	+76%	-	+81%	-	+97%	-	-
22	Top handler	Diesel	POLA	4.0	3.6	4.0	127.9	0.6	117.4	22.2	52,683	-	-
			Calulatec	6.3	5.8	6.3	179.8	0.6	138.0	44.6	49,547	1.4	3.2
			% diff	+57%	+60%	+57%	+41%	-4%	+18%	+101%	-6%	-	-
23	Truck	Diesel	POLA	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	1.8	0.1	38	-	-
			Calulatec	0.3	0.3	0.3	8.0	0.0	4.0	1.4	1,604	0.0	0.1
			% diff	-	-	-	+901%	-	+120%	+1306%	+4120%	-	-
24	Truck	LPG	POLA	0.4	0.3	0.4000	7.6	0.0	5.3	0.9	2,300	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
			% diff	-100%	-100%	-100%	-100%	-	-100%	-100%	-100%	-	-
25	Yard tractor	Diesel	POLA	3.3	3.0	3.3	97.4	0.8	160.9	12.7	64,320	-	-
			Calulatec	0.9	0.8	0.9	27.4	0.1	31.2	4.5	8,200	0.3	0.6
			% diff	-73%	-73%	-73%	-72%	-87%	-81%	-65%	-87%	-	-
26	Yard tractor	LNG	POLA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	773	-	-
			Calulatec	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	-	-	-100%	-	-100%	-	-
27	Yard tractor	LPG	POLA	1.2	1.2	0.0	39.0	0.0	249.7	32.0	12,116	-	-
			Calulatec	1.2	1.2	0.0	126.6	0.0	674.1	51.6	12,150	0.0	0.0
			% diff	-1%	-1%	-	+225%	-	+170%	+61%	+0%	-	-
TOTAL			POLA	12.5	11.2	11.2	424.5	1.7	671.8	87.9	170,632	0.0	0.0
			Calulatec	15.7	14.6	14.5	563.4	1.1	1002.2	148.4	107,424	2.8	6.1
			% diff	+26%	+30%	+29%	+33%	-34%	+49%	+69%	-37%	-	-

Tabla 1: Comparativo emisiones Caso de Estudio para Puerto de Los Angeles 2022 – Cargo Handling Equipment (Fuente: M&N)

La misma metodología se siguió para Barcos (de altamar y de terminal) obteniendo también resultados en el mismo orden de magnitud pese a ser estimaciones realizadas a posteriori. En este caso, al igual que para el de CHE se puede obtener las emisiones totales según tipo de barco, como en el caso de los barcos de altamar corresponden a sus motores principales y auxiliares o los distintos tipos de barcazas, ferry y tugs en el caso de barcos de asistencia. En cuanto a los motores principales de barcos de altamar, el 80% de los casos presenta valores menores al 20% de error con la medición, un 50% menores al 10%. Para los barcos de asistencia, todos los contaminantes obtienen diferencias menores al 20% exceptuando a los hidrocarburos con 24%.

Transit Main Engine	PM10	PM25	DPM	NOX	SOX	CO	HC	CO2
POLA	9.00	8.20	8.90	1021.00	15.20	79.00	47.70	33932.00
Calculate	10.17	9.35	10.17	548.30	19.29	86.00	44.99	31579.78
Difference	13.02%	14.08%	14.29%	-46.30%	26.92%	8.86%	-5.68%	-6.93%

Transit Auxiliary Engine	PM10	PM25	DPM	NOX	SOX	CO	HC	CO2
POLA	7.5	6.9	7.5	464.0	14.0	46.1	16.6	26682.0
Calculate	8.3	7.5	7.5	500.7	17.5	49.3	22.3	28605.7
Difference	11.17%	8.12%	-0.53%	7.91%	24.71%	7.01%	34.31%	7.21%

Transit Boiler	PM10	PM25	DPM	NOX	SOX	CO	HC	CO2
POLA	0.50	0.50	0.00	6.00	1.10	0.70	0.30	2663.00
Calculate	0.64	0.58	0.00	6.19	1.85	0.63	0.31	3024.19
Difference	27.00%	16.94%	0.00%	3.22%	67.76%	-10.18%	4.79%	13.56%

Tabla 2: Comparativo emisiones Caso de Estudio para Puerto de Los Angeles 2022 – Barcos de altamar (Fuente: M&N)

Equipment	Engine	Source	PM tons	PM2.5 tons	DPM tons	NOx tons	SO2 tons	CO tons	HC tons	CO2 tonnes	N2O tons	CH4 tons	
1	Assist tug	Auxiliary	POLA	0.3	0.3	0.3	13.3	0.0	3.5	0.5	2015.0	-	-
			Calculated	0.3	0.3	0.3	13.2	0.0	3.4	0.5	2148.5	0.1	0.0
			% diff	0%	0%	0%	-1%	-	-3%	0%	+7%	-	-
1	Assist tug	Propulsion	POLA	1.4	1.3	1.4	69.1	0.1	14.2	2.9	8527.0	-	-
			Calculated	2.1	2.1	2.1	94.3	0.1	15.1	3.6	8973.8	0.4	0.3
			% diff	+50%	+62%	+50%	+36%	0%	+6%	+24%	+5%	-	-
2	ATB	Auxiliary	POLA	0.2	0.2	0.2	6.0	0.0	1.4	0.2	742.0	-	-
			Calculated	0.2	0.2	0.2	4.7	0.0	1.6	0.2	749.3	0.0	0.0
			% diff	0%	0%	0%	-22%	-	+14%	0%	+1%	-	-
2	ATB	Propulsion	POLA	1.8	1.7	1.8	40.7	0.0	6.0	3.5	2783.0	-	-
			Calculated	0.7	0.7	0.7	32.3	0.0	5.2	1.2	3019.2	0.1	0.1
			% diff	-61%	-59%	-61%	-21%	-	-13%	-66%	+8%	-	-
3	Barge	Auxiliary	POLA	0.2	0.2	0.2	4.6	0.0	0.8	0.2	364.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	3.3	0.0	0.7	0.1	361.6	0.0	0.0
			% diff	-50%	-50%	-50%	-28%	-	-13%	-50%	-1%	-	-
3	Barge	Propulsion	POLA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
			Calculated	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Commercial fishing	Auxiliary	POLA	0.4	0.4	0.4	11.5	0.0	3.2	0.5	1684.0	-	-
			Calculated	0.4	0.4	0.4	12.9	0.0	3.0	0.5	1865.9	0.1	0.1
			% diff	0%	0%	0%	+12%	-	-6%	0%	+11%	-	-
4	Commercial fishing	Propulsion	POLA	3.1	3.0	3.1	98.0	0.1	24.9	6.1	8026.0	-	-
			Calculated	2.0	2.0	2.0	92.8	0.1	16.6	3.1	8311.1	0.3	0.3
			% diff	-35%	-33%	-35%	-5%	0%	-33%	-49%	+4%	-	-
5	Crew boat	Auxiliary	POLA	0.1	0.1	0.1	1.8	0.0	0.5	0.1	258.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	0.4	0.1	248.7	0.0	0.0
			% diff	0%	0%	0%	-6%	-	-20%	0%	-4%	-	-
5	Crew boat	Propulsion	POLA	0.7	0.7	0.7	34.1	0.0	5.7	1.3	3301.0	-	-
			Calculated	0.7	0.7	0.7	31.6	0.0	5.1	1.3	3131.1	0.1	0.1
			% diff	0%	0%	0%	-7%	-	-11%	0%	-5%	-	-
6	Excursion	Auxiliary	POLA	0.1	0.1	0.1	3.3	0.0	0.9	0.2	443.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	3.0	0.0	0.9	0.2	436.9	0.0	0.0
			% diff	0%	0%	0%	-9%	-	0%	0%	-1%	-	-
6	Excursion	Propulsion	POLA	0.4	0.4	0.4	22.5	0.0	3.8	0.9	2553.0	-	-
			Calculated	0.5	0.5	0.5	33.9	0.0	5.5	1.3	4601.2	0.2	0.1
			% diff	+25%	+25%	+25%	+51%	-	+45%	+44%	+80%	-	-
7	Ferry	Auxiliary	POLA	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	0.5	0.1	240.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	0.4	0.1	240.4	0.0	0.0
			% diff	0%	0%	0%	0%	-	-20%	0%	+0%	-	-
7	Ferry	Propulsion	POLA	1.5	1.4	1.5	74.4	0.1	14.5	3.2	8324.0	-	-
			Calculated	1.2	1.2	1.2	72.4	0.1	15.6	3.6	9385.6	0.4	0.3
			% diff	-20%	-14%	-20%	-3%	0%	+8%	+13%	+13%	-	-
8	Government	Auxiliary	POLA	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.2	0.1	100.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	3.1	0.0	0.7	0.1	370.1	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	+182%	-	+250%	0%	+270%	-	-
8	Government	Propulsion	POLA	0.3	0.3	0.3	9.7	0.0	1.5	0.6	851.0	-	-
			Calculated	0.2	0.2	0.2	9.2	0.0	1.5	0.4	924.1	0.0	0.0
			% diff	-33%	-33%	-33%	-5%	-	0%	-33%	+9%	-	-
9	Ocean tug	Auxiliary	POLA	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	0.4	0.1	208.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	1.3	0.0	0.4	0.1	221.3	0.0	0.0
			% diff	0%	0%	0%	-24%	-	0%	0%	+6%	-	-
9	Ocean tug	Propulsion	POLA	1.8	1.7	1.8	59.0	0.0	8.5	3.3	4373.0	-	-
			Calculated	1.2	1.2	1.2	52.9	0.0	8.5	2.1	4845.9	0.2	0.2
			% diff	-33%	-29%	-33%	-10%	-	0%	-36%	+11%	-	-
10	Tugboat	Auxiliary	POLA	0.2	0.1	0.2	4.9	0.0	1.3	0.2	724.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	3.1	0.0	1.0	0.1	527.4	0.0	0.0
			% diff	-50%	0%	-50%	-37%	-	-23%	-50%	-27%	-	-
10	Tugboat	Propulsion	POLA	0.5	0.5	0.5	25.8	0.0	4.5	1.1	2534.0	-	-
			Calculated	0.4	0.4	0.4	19.8	0.0	3.2	0.8	1855.6	0.1	0.1
			% diff	-20%	-20%	-20%	-23%	-	-29%	-27%	-27%	-	-
11	Work boat	Auxiliary	POLA	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.4	0.1	234.0	-	-
			Calculated	0.1	0.1	0.1	1.7	0.0	0.4	0.1	247.5	0.0	0.0
			% diff	-	-	-	+6%	-	0%	0%	+6%	-	-
11	Work boat	Propulsion	POLA	0.5	0.5	0.5	25.8	0.0	4.5	1.1	2534.0	-	-
			Calculated	0.2	0.2	0.2	15.1	0.0	2.4	0.5	2122.9	0.1	0.1
			% diff	-60%	-60%	-60%	-41%	-	-47%	-55%	-16%	-	-
TOTAL			POLA	13.7	13.1	13.7	510.6	0.3	101.2	26.3	50,818	0.0	0.0
			Calculated	10.9	10.9	10.9	504.0	0.3	91.6	20.0	54,588	2.1	1.7
			% diff	-20%	-17%	-20%	-1%	0%	-9%	-24%	+7%	-	-

Tabla 3: Comparativo emisiones Caso de Estudio para Puerto de Los Angeles 2022 – Barcos de asistencia (Fuente: M&N)

Si bien estos resultados muestran que se puede determinar dentro del mismo orden de magnitud el valor de las emisiones de los principales contaminantes, no significa que sean un reemplazo de una medición real de emisiones con equipamiento especializado. Sin embargo, debido a que los puertos actuales pueden contar con gran cantidad de sensores en sus equipamientos, en particular GPS y horas de encendido, tener un cálculo permite contar con una estimación aproximada en todo momento del año, sin requerimiento de equipos adicionales, lo que permite tener mayor visibilidad de la situación del puerto. En particular, un cálculo como este puede incorporarse en software computacionales, por ejemplo, de simulación, lo que permitiría adelantarse a nuevos escenarios tales como mejora o aumento de equipos, cambios tecnológicos, modificaciones del patio, entre otros, de modo de contar con información relevante para la toma de decisiones con respecto al equipamiento.

Con el objetivo de replicar este estudio en otras terminales portuarias o en otros sistemas logísticos en general, la parte clave corresponde a contar con los datos tanto de los datasheet del equipamiento logístico y barcos como la información de registro de las horas de funcionamiento y kilómetros recorridos. Los valores de los factores de emisión dependen de las características de los motores de los equipos, de su año de fabricación y de su utilización, luego es importante contar con dicha información para cada uno de los equipos del terminal. De no contar con estos valores, se deberá recurrir a aproximaciones o equipos similares representativos, que pudieran hacer que la estimación sea divergente de la adecuada.

4. CASO DE ESTUDIO

Un estudio de caso realizado por Moffatt & Nichol en un terminal automatizado de contenedores en Estados Unidos tuvo como objetivo estimar las reducciones de emisiones al electrificar el equipo utilizado típicamente en terminales automatizadas de contenedores. El alcance del estudio incluyó el análisis de emisiones del equipo de manipulación de contenedores, como las grúas apiladoras automatizadas (ASC), las grúas de muelle a tierra (STS), los vehículos guiados automatizados (AGV) alimentados por batería, los tractores de patio de ferrocarril y los camiones de acceso externo. Estos se compararon con las emisiones del equipo convencional impulsado por diésel antes de la automatización. El terminal automatizado contaba con equipos electrificados, que no generaban emisiones en el lugar, en contraste con el terminal convencional que dependía de equipos impulsados por diésel. El único equipo CHE impulsado por diésel son los tractores de patio de ferrocarril. La metodología para el cálculo de emisiones incorporó varios componentes, como la potencia nominal, las horas de operación, el factor de carga, el factor de emisión, el factor de corrección de combustible y el factor de control para el equipo CHE. Para los camiones de acceso, los componentes incluyeron el número de vehículos, las horas de operación, las tasas de emisión y los ajustes para la actividad y las condiciones de tráfico. Las suposiciones clave incluyeron estimaciones de volumen de carga, con el terminal automatizado manejando 3,300,000 TEU al año en comparación con 800,000 TEU para el terminal convencional. Los datos del inventario de equipos y las horas de operación fueron proporcionados por el terminal, y los factores de emisión se derivaron del Informe de Inventario de Emisiones Atmosféricas de POLB y las directrices de CARB.

Los resultados mostraron una reducción significativa en las emisiones para el terminal automatizado en comparación con el terminal convencional, incluso considerando el mayor volumen de carga. Por ejemplo, a pesar de que el volumen de carga es tres veces mayor, las emisiones estimadas de PM10 del equipo de manipulación de contenedores (CHE) y los camiones de acceso combinados son de 0,22 toneladas métricas por año para el terminal automatizado, mientras que para el terminal convencional son de 1,33 toneladas métricas por año. En términos de TEU, la reducción de emisiones es aún más significativa. Las emisiones del terminal automatizado son una fracción de las del terminal convencional. Las emisiones de PM10 del terminal automatizado fueron de 0,07 gramos por TEU. En contraste, las emisiones del terminal convencional fueron significativamente más altas, con 1,66 gramos por TEU para PM10. Estos resultados resaltan la eficiencia y las ventajas ambientales de los terminales automatizados. El gráfico a continuación resume las reducciones de emisiones en términos porcentuales al comparar los terminales automatizados y convencionales.

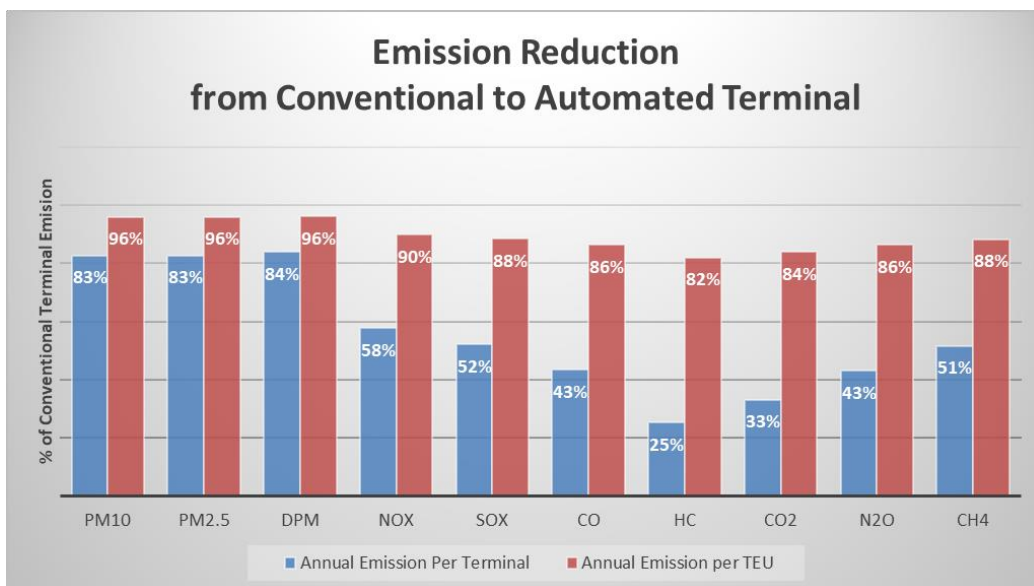


Figura 1: Resultados del proyecto de transformación del terminal para reducción de emisiones (Fuente: M&N)

5. CONCLUSIONES

Se puede observar que el estudio de emisiones a posteriori, utilizando datos de los equipos como edad, potencia, tecnología, entre otros elementos para determinar los factores de emisiones permite aproximarse a mediciones y estadísticas reales de los puertos en funcionamiento, lo que resulta clave para poder realizar estrategias de reducción de emisiones contaminantes en instalaciones portuarias, como por ejemplo a través de automatización.

Como se observa en el caso de estudio, las emisiones del terminal automatizado son significativamente más bajas que las del terminal convencional, a pesar del mayor volumen de carga. La reducción de emisiones a nivel del terminal, combinando el equipo de manipulación de contenedores (CHE) y los camiones de acceso, oscila entre el 33% y el 85%. Los principales contaminantes como PM10, PM2.5 y material particulado diésel (DPM) muestran reducciones de más del 80% a nivel de TEU. Este estudio demuestra las sustanciales reducciones de emisiones logradas mediante el uso de equipos electrificados en el desarrollo de terminales de contenedores, resaltando los importantes beneficios ambientales que aporta la automatización.

6. BIBLIOGRAFÍA

2023. Inventory of Air Emissions Calendar Year 2022 Port of Los Angeles. Starcrest Consulting Group, Estados Unidos.

2022. Guía para Estimación de Emisiones Atmosféricas Región Metropolitana, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, Chile.

2021. Decreto 39 "Establece Norma de Emisión para Maquinarias Móviles", Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, Biblioteca del Congreso Nacional, Chile.

2021. San Pedro Bay Ports Emission Inventory Methodology Report, Starcrest Consulting Group, Estados Unidos.

2023. San Pedro Bay Ports Emission Inventory Methodology Report, Starcrest Consulting Group, Estados Unidos

2022. Ports Emissions Inventory Guidance: Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emissions, United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality, Estados Unidos.