

## **ATTIVITA T.3.3.3**

### **Confronto tra scenari e scenari di trasporto su strada**

#### **Prodotto T.3.3.3**

### **Confronto tra scenari e scenari di trasporto su strada**

**Partner Responsabile:** AtmoSud

L'obiettivo di questo deliverable è quello di confrontare il bilancio delle emissioni di una nave merci che effettua un viaggio da Tolone a Istanbul con il bilancio delle emissioni dei camion che trasportano la stessa quantità di merci nello stesso viaggio, sia in termini di inquinanti che di emissioni di gas a effetto serra (GES).

### 1. Calcolo delle emissioni marittime

L'equivalenza della quantità di merci trasportate è misurata in termini di quantità di container. La quantità di container trasportati da un autocarro è data dal TEU (Twenty Foot Equivalent Unit), che indica il volume delle merci in numero di container da 20 piedi (6.1 m). Si presume che un container trasportato equivalga a un camion. Il calcolo è stato effettuato per diverse navi, con diverse capacità di trasporto, che fanno scalo a Toulon-la Seyne Brégaillon nel 2021. Queste navi sono elencate nella Tabella 1.

*Tabella 1 : Elenco delle navi utilizzate per il confronto tra mare e strada con la loro classificazione, il numero di container che possono trasportare (TEU) e la loro stazza lorda (GT).*

Nave	Tipo di nave	TEU	GT
Nave n°1	Carico polivalente	133	6668
Nave n°2	Carico refrigerato	436	14022
Nave n°3	Nave portacontainer	809	7713
Nave n°4	Nave portacontainer	1550	15988
Nave n°5	Nave portacontainer	4255	41331

Lo sviluppo di un database delle emissioni marittime è stato presentato nel deliverable T2.2 - *Preparazione dei dati sulle emissioni per i modelli di simulazione*. Le emissioni sono calcolate per diversi inquinanti e per le diverse fasi del traffico navale, ossia la fase di "viaggio" (nave lontana dal porto), la fase di "manovra" (nave in porto) e la fase di "branchina" (nave in porto). Le fasi considerate in questo lavoro sono la fase di manovra e la fase di viaggio.

Le emissioni delle navi dipendono dal loro consumo energetico, secondo la formula :

$$E_i = C F_i$$

où

- $E_i$  è l'emissione [kg] dell'inquinante  $i$ ,
- $C$  è il consumo di energia [J],
- $F_i$  è il fattore di emissione specifico per l'inquinante  $i$  [kg/J].

Il consumo di carburante delle navi è calcolato in base alle raccomandazioni della guida metodologica della LCSQA<sup>1</sup> per la preparazione degli inventari (guida PCIT2<sup>2</sup>). Dipende in particolare dalla stazza lorda (GT) che, come i TEU, è legata alla capacità di trasporto della nave. Tuttavia, dalla Tabella 1 si evince che non esiste una relazione diretta tra TEU e stazza lorda. Una nave può quindi emettere meno inquinanti di una nave che trasporta una quantità minore di container se la sua stazza lorda è inferiore. In questo esempio, la nave 2 è una nave refrigerata, dotata di un dispositivo per mantenere il carico a bassa temperatura, il che significa che trasporta una quantità minore di container rispetto alla nave 3, nonostante la sua maggiore stazza lorda.

<sup>1</sup> Laboratorio centrale di monitoraggio della qualità dell'aria (FR)

<sup>2</sup> Guida metodologica per l'elaborazione degli inventari territoriali delle emissioni in atmosfera (inquinanti atmosferici e gas a effetto serra), Ministero della Transizione Ecologica e della Solidarietà (FR), Direzione Generale per l'Energia e il Clima, Ufficio Qualità dell'Aria, versione n°2, giugno 2018.

Le emissioni di CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM10 e PM2.5 per chilometro, calcolate per le navi elencate nella Tabella 1, nella fase di manovra e nella fase di viaggio, sono presentate rispettivamente nella Tabella 2 e nella Tabella 3.

Tabella 2 : Emissioni chilometriche delle navi in fase di viaggio [g/km].

Inquinante	Emissioni per chilometro in fase di "viaggio" [g/km]				
	Nave 1 133 TEU	Nave 2 436 TEU refrigerato	Nave 3 809 TEU	Nave 4 1550 TEU	Nave 5 4255 TEU
NO <sub>x</sub>	2029	8703	3060	4844	11884
SO <sub>x</sub>	52	222	78	648	303
PM10	37	158	56	360	216
PM2.5	35	150	53	341	204
CO <sub>2</sub>	82048	351956	123727	190598	480604
CH <sub>4</sub>	8	33	12	18	45
N <sub>2</sub> O	2	9	3	5	12

Tabella 3 : Emissioni per chilometro delle navi in fase di manovra [g/km].

Inquinante	Emissioni per chilometro nella fase di "manovra" [g/km]				
	Nave 1 133 TEU	Nave 2 436 TEU refrigerato	Nave 3 809 TEU	Nave 4 1550 TEU	Nave 5 4255 TEU
NO <sub>x</sub>	6081	30156	5246	7655	9857
SO <sub>x</sub>	155	769	134	1023	251
PM10	110	547	95	569	179
PM2.5	105	519	90	539	170
CO <sub>2</sub>	245903	1219520	212146	301194	398623
CH <sub>4</sub>	23	115	20	29	38
N <sub>2</sub> O	6	31	5	8	10

Per calcolare la massa di inquinanti emessi nel tragitto Tolone-Istanbul, si applica la formula :

$$E_i = 2 \times E_i^{\text{manovra}} + E_i^{\text{viaggio}}$$

per considerare la fase di manovra due volte, alla partenza e all'arrivo. Le emissioni per ogni fase p si ottengono con :

$$E_i^p = e_i^p d^p$$

dove  $e_i^p$  è l'emissione calcolata per chilometro dell'inquinante i per la fase p e  $d^p$  è la distanza percorsa nella fase p. Per la fase di manovra, si considera una distanza  $d^{\text{manovra}}$  di 1 km. Per la fase di viaggio, si utilizza la distanza  $d^{\text{viaggio}} = 2708$  km calcolata per la linea di navigazione Tolone-Istanbul mostrata in Figura 1. Le emissioni marittime calcolate sono presentate nella Tabella 4. In questa tabella viene calcolato anche l'equivalente di CO<sub>2</sub> dei tre gas serra CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, per valutare il loro impatto combinato sul riscaldamento globale. L'equivalente di CO<sub>2</sub> si ottiene secondo la formula :

$$F_{CO_2eq} = \alpha_{CO_2} F_{CO_2} + \alpha_{CH_4} F_{CH_4} + \alpha_{N_2O} F_{N_2O}$$

dove  $\alpha_i$  è il potenziale di riscaldamento globale del gas  $i$ , rispetto al potere riscaldante della stessa massa di  $\text{CO}_2$  in un periodo di 100 anni. Per definizione,  $\alpha_{\text{CO}_2} = 1$ ; i valori utilizzati per gli altri gas,  $\alpha_{\text{CH}_4} = 28$  e  $\alpha_{\text{N}_2\text{O}} = 265$ , sono tratti dal Quinto Rapporto IPCC.

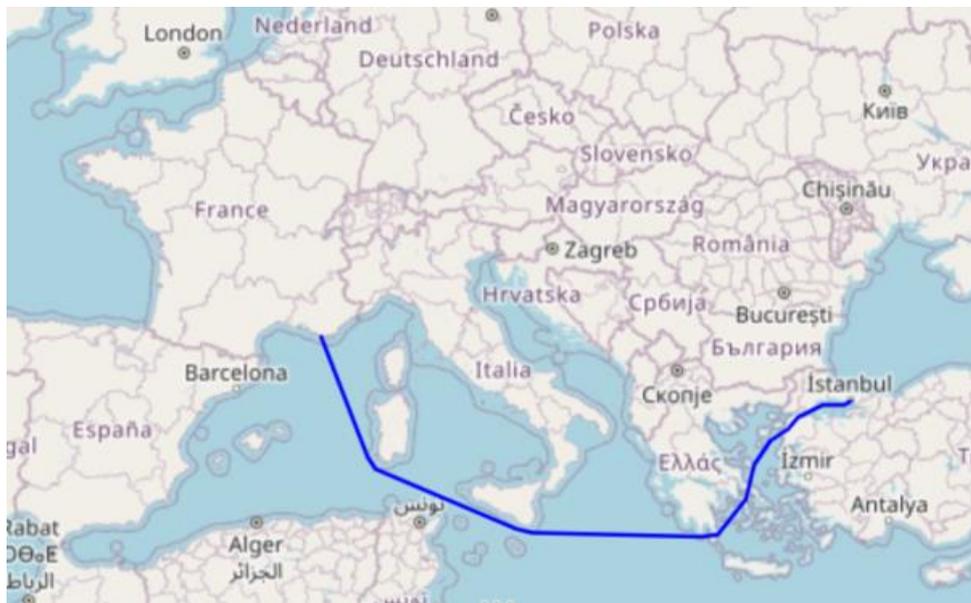


Figura 1 : Linea marittima che collega Tolone a Istanbul (linea blu).

Tabella 4 : Emissioni delle navi [kg] sulla rotta marittima Tolone-Istanbul.

Inquinante	Emissioni marittime [kg]				
	Nave 1 133 TEU	Nave 2 436 TEU refrigerato	Nave 3 809 TEU	Nave 4 1550 TEU	Nave 5 4255 TEU
NO <sub>x</sub>	5507	23630	8296	13135	32204
SO <sub>x</sub>	140	603	212	1756	821
PM10	100	429	151	976	585
PM2.5	95	406	143	924	554
CO <sub>2</sub>	222691	955585	335494	516769	1302341
CH <sub>4</sub>	21	90	32	50	123
N <sub>2</sub> O	6	24	8	13	33
CO <sub>2</sub> eq	224767	964495	338622	521672	1314485

## 2. Calcolo delle emissioni stradali

I fattori di emissione per gli autocarri sono stimati per la flotta di veicoli pesanti che utilizzano l'autostrada Tolone-Italia. La distribuzione dei veicoli pesanti per categoria è riportata nella Tabella 5. I due principali tipi di veicoli pesanti (VP) su questo percorso sono gli autoarticolati nella categoria 40 t - 50 t e gli autocarri rigidi nella categoria 14 t - 20 t.

Tabella 5 : Composizione della flotta di veicoli pesanti che effettuano il tragitto Tolone-Italia (fonte: CITEPA<sup>3</sup> versione 2021).

Tipo di autocarro	Quota del parco auto
Autoarticolati 14 t – 20 t	0,04%
Autoarticolati 20 t – 28 t	0,02%
Autoarticolati 28 t – 34 t	0,02%
Autoarticolati 34 t – 40 t	0,25%
Autoarticolati 40 t – 50 t	50,34%
Autoarticolati 50 t – 60 t	0,07%
Autocarri rigidi 12 t – 14 t	2,15%
Autocarri rigidi 14 t – 20 t	17,48%
Autocarri rigidi 20 t – 26 t	9,37%
Autocarri rigidi 26 t – 28 t	0,45%
Autocarri rigidi 28 t – 32 t	4,89%
Autocarri rigidi > 32 t	1,07%
Autocarri rigidi 3,5 t – 7,5 t	6,21%
Autocarri rigidi 7,5 t – 12 t	7,65%
VP – N/A	0,01%

Tabella 6 : Emissioni per chilometro dei camion [g/km] e quantità di inquinanti emessi [g] nel tragitto Tolone-Istanbul per un mezzo pesante e per il numero di mezzi pesanti corrispondente ai TEU delle navi.

	Emissioni per chilometro [g/km]	Emissioni su gomma [kg]					
		1 VP	133 VP	436 VP refrigerato +20%	809 VP	1550 VP	4255 VP
NOx	1,65091845	4	531	2087	3227	6183	16973
SOx	0,00779987	0,02	3	10	15	29	80
PM10	0,20346895	0,49	65	257	398	762	2092
PM2.5	0,12067615	0,29	39	153	236	452	1241
CO <sub>2</sub>	1062,34161	2567	341388	1342965	2076565	3978586	10921861
CH <sub>4</sub>	0,00444634	0,01	1	6	9	17	46
N <sub>2</sub> O	0,03818215	0,09	12	48	75	143	393
CO <sub>2</sub> eq	1072,58437	2592	344680	1355914	2096587	4016946	11027166

Le emissioni chilometriche medie calcolate per questa flotta di veicoli sono presentate nella Tabella 6. Per ottenere le emissioni dei veicoli sul percorso da Tolone a Istanbul su strada, questi fattori sono moltiplicati per la distanza del percorso, stimata in 2416km<sup>(4)</sup>. Le masse di inquinanti emesse su questo percorso per un singolo autocarro e per il numero di autocarri corrispondenti ai TEU delle navi elencate nella Tabella 1 sono raggruppate nella Tabella 6. Va notato che per il confronto con la Nave n°2, è necessario considerare i camion refrigerati, nei quali la presenza di un'unità di refrigerazione comporta un consumo aggiuntivo di carburante compreso tra il 10% e il 30% circa, a seconda delle specificità del camion e delle condizioni del viaggio. Per tenerne conto, le emissioni chilometriche dei camion refrigerati aumentano del 20% rispetto alle emissioni dei camion standard.

<sup>3</sup> Centro interprofessionale tecnico di studi sull'inquinamento atmosferico (FR) : <https://www.citepa.org/fr/>

<sup>4</sup> Fonte : rome2rio.com

### 3. Confronto tra mare e strada

La differenza tra la quantità di inquinanti emessi dal trasporto marittimo e quella emessa dal trasporto stradale è presentata nella Tabella 7 e può essere vista nella Figura 2. In termini di gas serra, si può notare che il trasporto marittimo emette più CH<sub>4</sub> rispetto al trasporto stradale, ma meno N<sub>2</sub>O e molto meno CO<sub>2</sub> rispetto al trasporto stradale, il che si traduce in una significativa riduzione della CO<sub>2</sub> equivalente emessa, indipendentemente dal numero di camion considerati. In termini di emissioni inquinanti, il trasporto marittimo emette più NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> rispetto al trasporto stradale. I risultati sono meno netti per il PM<sub>2.5</sub> e il PM<sub>10</sub>, per i quali si osservano entrambi i risultati.

Tabella 7 : Differenza di emissioni da strada e mare.

Differenza [kg] marittimo-stradale	Numero di container (TEU) o camion				
	133	436 refrigerato +20% per il trasporto su gomma	809	1550	4255
NO <sub>x</sub>	4976	21543	5069	6952	15231
SO <sub>x</sub>	138	593	196	1726	741
PM <sub>10</sub>	35	172	-247	214	-1507
PM <sub>2.5</sub>	56	254	-93	472	-687
CO <sub>2</sub>	-118698	-387380	-1741071	-3461817	-9619519
CH <sub>4</sub>	20	85	23	33	77
N <sub>2</sub> O	-7	-24	-66	-130	-360
CO <sub>2</sub> eq	-119913	-391419	-1757965	-3495275	-9712681

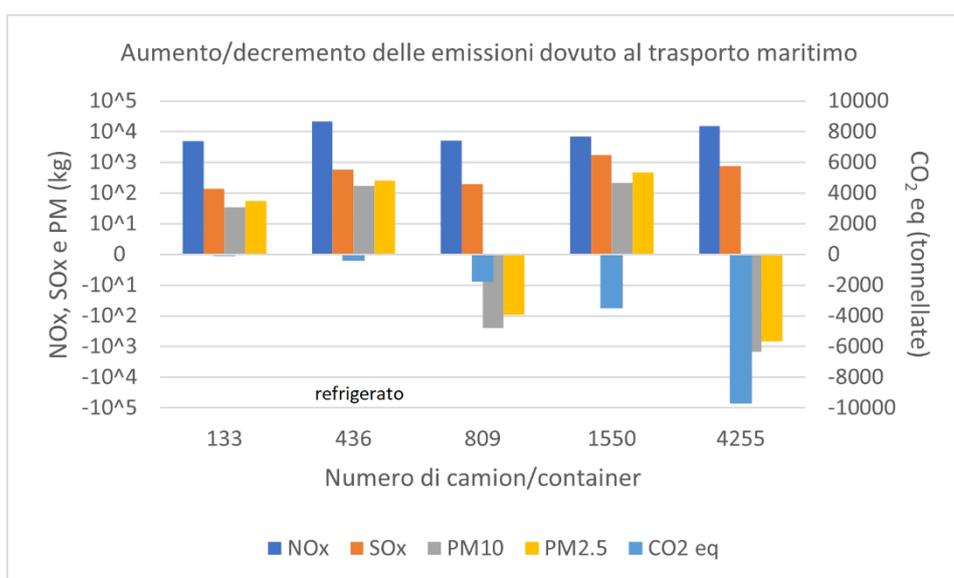


Figura 2 : Differenza delle emissioni marittime e stradali, in funzione del numero di camion/container.

#### 4. Confronto con le navi alimentate a GNL

In questa sezione il confronto tra il trasporto marittimo e quello su gomma viene fatto considerando le navi alimentate a GNL. Nel deliverable T3.3.2 - *Scenari linee marittime transfrontaliere*, sono stati calcolati i tassi di abbattimento per le navi alimentate a GNL, sulla base dei fattori di emissione tratti dal rapporto *Third IMO GHG Study 2020*<sup>5</sup>. Nonostante la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, le navi a GNL emettono CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O in più rispetto alle navi BFO, a seconda del tipo di motore a GNL utilizzato. Queste emissioni aggiuntive non sono necessariamente compensate dalla diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e per alcuni motori si traducono in un aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente. Solo il motore GNL-Diesel offre una riduzione significativa delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente, dell'ordine del 25%. Tuttavia, il motore a GNL-Diesel ha prestazioni inferiori rispetto ad altri tipi di motori in termini di riduzione delle emissioni di NOx. Per questo motivo, per il confronto è stato scelto un motore diverso da quello a GNL-diesel. È stato scelto il motore LBSI, che comporta un aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente di circa il 13%, ma consente un'effettiva riduzione delle emissioni inquinanti.

Le emissioni marittime delle navi GNL LBSI sono calcolate applicando i tassi di variazione elencati nella Tabella 8 alle emissioni presentate nella Tabella 4. Sono riassunte nella Tabella 9 e sono visibili nella Figura 3.

Tabella 8 : Variazioni (%) delle emissioni delle navi GNL LBSI rispetto alle navi BFO, secondo la relazione Aer Nostrum T3.3.2 - Linee marittime transfrontaliere.

	NOx	SOx	PM10	PM2.5	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Variazioni delle emissioni (%)	-81,79	-97,60	-96,23	-96,34	-28,92	+15085	+118

Tableau 9 : Différence de émissions dalla strada e dal mare con una nave alimentata a GNL.

Differenza [kg] marittimo-stradale	Numero di container (TEU) o camion				
	133	436 refrigerato +20% per il trasporto su gomma	809	1550	4255
NOx	473	2217	-1716	-3790	-11107
SOx	1	5	-10	13	-60
PM10	-62	-241	-392	-725	-2070
PM2.5	-35	-138	-231	-418	-1220
CO <sub>2</sub>	-183097	-663721	-1838091	-3611259	-9996137
CH <sub>4</sub>	3194	13707	4806	7529	18643
N <sub>2</sub> O	3	19	-51	-106	-301
CO <sub>2</sub> eq	-92779	-274983	-1717086	-3428594	-9553994

<sup>5</sup> International Maritime Organization (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, Full Report, London, 2020.

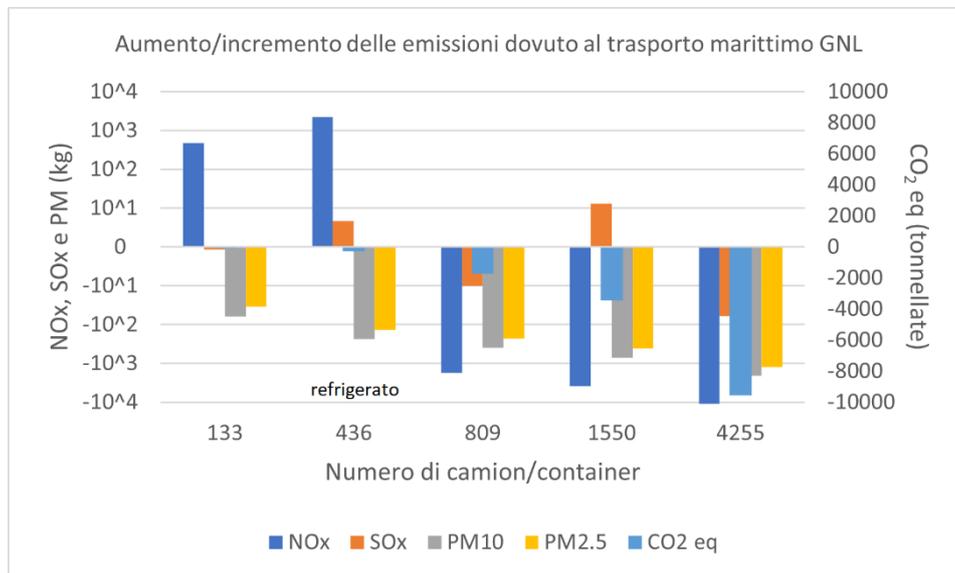


Figure 3 : Differenza tra emissioni marittime e stradali, in funzione del numero di camion/container, nel caso di una nave alimentata a GNL.

Sebbene la nave a GNL generi più  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  di una nave alimentata a BFO, si può notare che il bilancio equivalente di  $\text{CO}_2$  rimane ampiamente a favore del settore marittimo. L'abbattimento del PM associato al GNL consente al settore marittimo di emettere meno rispetto al settore stradale, indipendentemente dal numero di camion/container considerati. Tuttavia, nonostante la netta riduzione delle emissioni di NOx e SOx, in alcuni casi queste sono ancora superiori a quelle del trasporto stradale, in particolare per un basso numero di camion/container nel caso degli NOx.

##### 5. Influenza delle dimensioni della nave

Per valutare l'influenza delle dimensioni della nave sul bilancio delle emissioni, i dati della Tabella 7 sono divisi per il numero di camion/container trasportati nella Figura 4. In questa figura, il bilancio dei gas serra del trasporto marittimo appare tanto più virtuoso quanto maggiore è la quantità di container trasportati, e quindi le dimensioni della nave. Le navi più piccole risparmiano circa una tonnellata di  $\text{CO}_2$  per unità di carico, rispetto alle due tonnellate delle navi più grandi. Allo stesso tempo, maggiore è la capacità di trasporto della nave, minori sono le emissioni di NOx in eccesso per container. Una tendenza simile si osserva per SOx e PM.

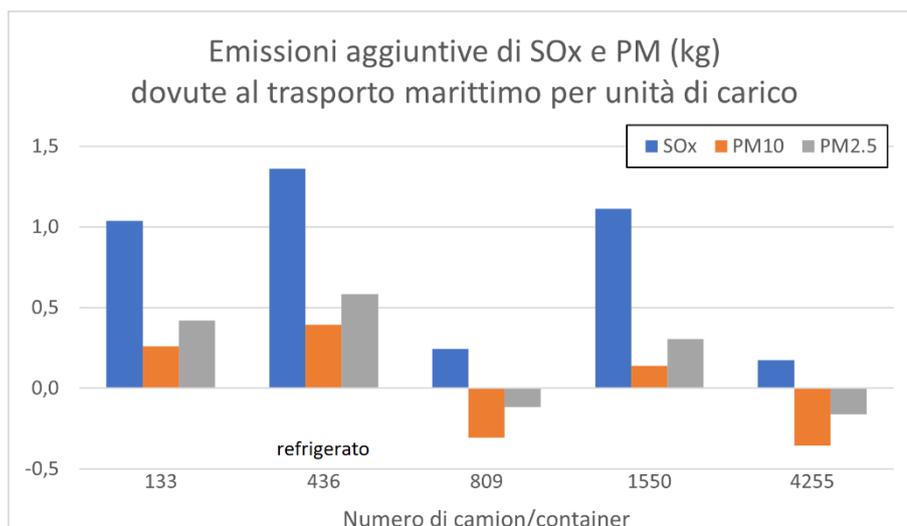
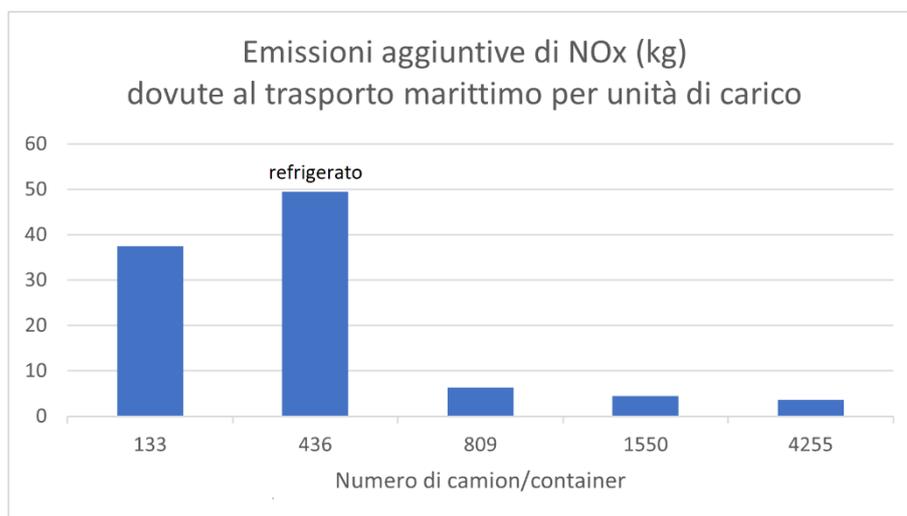
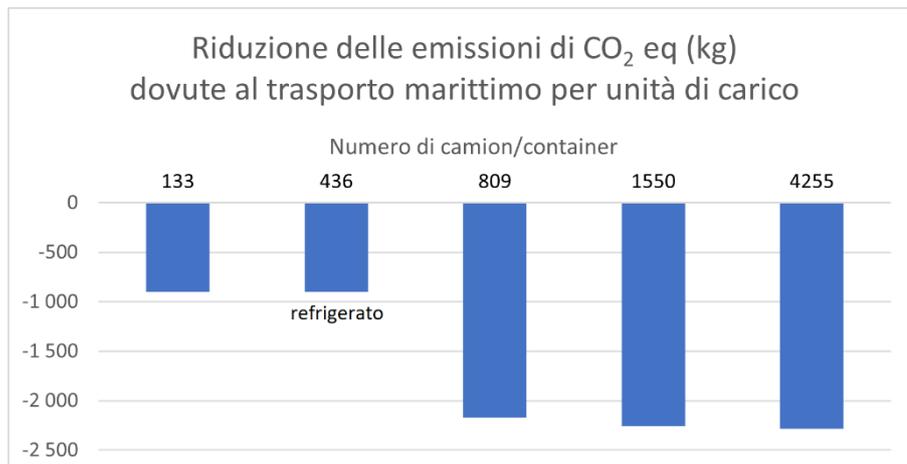


Figura 4 : Differenze tra le emissioni prodotte dal trasporto marittimo e dal trasporto su gomma divise per il numero di camion/container, in base al numero di camion/container.

## 6. Conclusione

I risultati di questo confronto tra trasporto marittimo e su gomma sono coerenti con i recenti sviluppi tecnologici nel settore automobilistico, dove le emissioni inquinanti (NO<sub>x</sub>, PM e SO<sub>x</sub>) sono diminuite significativamente negli ultimi dieci anni, grazie soprattutto ai filtri antiparticolato, alla riduzione catalitica selettiva (SCR), ai catalizzatori di ossidazione e ai sistemi di ricircolo dei gas di scarico (EGR). D'altro canto, la riduzione delle emissioni di gas serra è rimasta stagnante nel settore del trasporto su gomma.

Sebbene il trasporto marittimo appaia più inquinante di quello stradale su base container, in particolare in termini di NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, va ricordato che queste due modalità di trasporto non hanno lo stesso tipo di impatto in termini di qualità dell'aria. Il settore marittimo contribuisce alle concentrazioni di fondo di particelle secondarie e particelle fini secondarie nell'area del Mediterraneo, con un contributo accentuato nelle aree portuali. La stima dell'esposizione della popolazione all'inquinamento marittimo nelle città portuali e l'impatto delle misure per ridurlo sono studiati attraverso altri risultati del progetto Aer Nostrum. Il trasporto su gomma, invece, emette inquinanti sulle strade che attraversano il territorio e contribuisce in modo significativo alle alte concentrazioni riscontrate su queste strade, attorno alle quali vive gran parte della popolazione e per le quali le linee guida dell'OMS sono ancora lontane dall'essere raggiunte.

In questo caso di studio tra Tolone e Istanbul, il bilancio delle emissioni rispetto all'unità di merce trasportata, sia essa camion o container, mostra che maggiore è il numero di container trasportati, maggiore è il guadagno di CO<sub>2</sub> consentito dal trasporto marittimo. Al contrario, il surplus di emissioni di NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM in relazione al numero di container diminuisce con la quantità trasportata. Questi calcoli confermano che, alla luce delle problematiche climatiche, è preferibile trasportare la maggior quantità possibile di merci su un'unica nave, piuttosto che distribuire il trasporto su diverse navi più piccole<sup>6</sup>.

Infine, la distanza percorsa da ciascuno dei due modi di trasporto è un altro elemento da considerare per questo tipo di confronto: nel caso del viaggio Tolone-Istanbul, la distanza stimata per il viaggio su strada è più breve, il che contribuisce a ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e PM via terra.

---

<sup>6</sup> Miglioramento dell'indicatore « intensità di carbonio » : [https://www.citepa.org/fr/2020\\_08\\_a02/](https://www.citepa.org/fr/2020_08_a02/)

## 7. Riferimenti

- Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre), Ministère de la Transition écologique et solidaire, Direction générale de l'Energie et du climat, Bureau de la Qualité de l'air, version no. 2, June 2018, <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/guide-methodologique-pour-lelaboration-des-inventaires-territoriaux-des-emissions>
- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique: <https://www.citepa.org/fr/>
- roma2rio.com
- Organizzazione Marittima Internazionale (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, Full Report, Londra, 2020.
- Miglioramento dell'indicatore di "intensità di carbonio": [https://www.citepa.org/fr/2020\\_08\\_a02/](https://www.citepa.org/fr/2020_08_a02/)