

ANALISI DEI DATI DEL TRAFFICO MARITTIMO PER LA STIMA DELLE EMISSIONI DI CO₂ DELLE NAVI E DEL POTENZIALE DI ALCALINIZZAZIONE DEL MARE

Dario Pagano, Stefano Caserini, Serena De Marco, Francesco Campo*, Mario Grosso

Politecnico di Milano, DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Sez. Ambientale.

Sommario – Nell’ambito delle tecnologie per emissioni negative di biossido di carbonio (CO₂) necessarie per raggiungere gli obiettivi dell’Accordo di Parigi, numerose ricerche indicano un grande potenziale di rimozione di CO₂ tramite alcalinizzazione artificiale degli oceani, ma nessuna di queste ha fino ad oggi valutato gli aspetti pratici dello scarico di grandi quantità di idrossido di calcio (calce idrata) mediante le navi. Al fine di stimare il potenziale di scarico di calce idrata tramite le navi commerciali in circolazione nel Mediterraneo, sono stati elaborati i dati relativi al traffico marittimo nel 2017 provenienti dal database di EMODnet (European Marine Observation and Data Network) Human Activities, che fornisce la densità (ore/mese) di presenza delle navi in un grigliato 1x1 km esteso a tutto il Mar Mediterraneo. L’elaborazione ha permesso di determinare il numero di ore di navigazione effettivamente utilizzabili per lo scarico di calce idrata, avendo in precedenza eliminato dal grigliato EMODnet le celle identificate come zone in cui le navi stanno alla fonda, ossia caratterizzate da tempi di permanenza delle navi al loro interno eccessivamente elevati. Sono altresì stimate le emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, PM, NMVOC e CO dal trasporto marittimo. Dal confronto tra i dati EMODnet e quelli dell’IMO (International Maritime Organization) relativi alle ore di navigazione su scala globale, è stata ricavata la percentuale di traffico marittimo nel Mar Mediterraneo rispetto a quello mondiale. Tale percentuale è stata poi confrontata con il rapporto calcolato con i dati provenienti dal database EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research), utilizzando le emissioni di CO₂ come proxy. Il confronto ha messo in luce una sostanziale differenza tra i due risultati; una delle ragioni che potrebbe spiegare tale la differenza è che il dataset di EDGAR considera gli spostamenti delle sole navi battenti bandiera degli Stati dell’Unione Europea, nonostante nel Mar Mediterraneo sia presente un traffico significativo di navi battenti bandiere di Stati non europei, spesso bandiere di comodo utilizzate da compagnie navali europee per ottenere agevolazioni fiscali.

Parole chiave: alcalinizzazione artificiale, idrossido di calcio, traffico marittimo, EMODnet, Mar Mediterraneo.

ANALYSIS OF MARITIME TRAFFIC DATA FOR THE ASSESSMENT OF CO₂ EMISSIONS FROM SHIPS AND THE POTENTIAL OF OCEAN ALKALINIZATION

Abstract – Within the technologies for negative carbon dioxide (CO₂) emissions, needed to achieve the objectives of the Paris Agreement, many types of research in-

dicating a great potential for CO₂ removal by artificial ocean alkalization, but none of them have yet evaluated the practical aspects of discharging large quantities of calcium hydroxide (slaked lime) through ships. In order to estimate the potential of slaked lime discharged by commercial ships in the Mediterranean Sea and around the world, data on maritime traffic in 2017 from the EMODnet (European Marine Observation and Data Network) Human Activities database were processed. The data processing allowed to determine the number of hours of navigation exploitable for the slaked lime discharge, once some cells, identified as berth areas, had been removed from the EMODnet grid due to extremely high residence times of the ships within them. CO₂, NO_x, SO_x, PM, NMVOC and CO emissions from maritime transport are also estimated. Comparison based on hours of navigation on a global scale was made between EMODnet and IMO (International Maritime Organization) data, thus obtaining the percentage of maritime traffic in the Mediterranean Sea on the total global one. This percentage was then compared with the ratio calculated with data from the EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research), using CO₂ emissions as proxy data. The comparison has highlighted a substantial difference between the two results; one of the reasons given for the difference is that the EDGAR dataset only considers the movements of European Union flagged ships, although in the Mediterranean Sea there is significant traffic of ships flying the flags of non-European States, often flags of convenience used by European shipping companies to obtain tax benefits.

Keywords: ocean alkalization, slaked lime, maritime traffic, EMODnet, Mediterranean Sea.

Ricevuto il 27-4-2020; Correzioni richieste il 28-5-2020; Accettazione finale il 2-8-2020.

1. INTRODUZIONE

È ormai evidente e riconosciuto dalla comunità scientifica come le attività umane, in particolare l’uso di combustibili fossili e la deforestazione, abbiano comportato un aumento dei livelli di anidride carbonica (CO₂) atmosferica senza precedenti negli ultimi due milioni di anni. Il conseguente surriscaldamento globale sta già provocando impatti sulle attività umane e sugli ecosistemi, come riconosciuto anche dal Quinto Rapporto di Valutazione e dai recenti Rapporti Speciali dell’Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013; IPCC, 2018; IPCC, 2019).

* Per info: Via Golgi, 39 – 20133, Milano, Tel. 02.23994216. E-mail: francescopietro.campo@mail.polimi.it

Per mantenere l'aumento medio della temperatura globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli pre-industriali, come deciso nell'ambito dell'accordo di Parigi, sono necessari sia una drastica riduzione delle emissioni di gas climalteranti sia una rimozione di CO₂ atmosferica in quantità tanto più ingenti quanto più si ritarda nella riduzione delle emissioni (IPCC, 2018; Rockström et al., 2017). Ad esempio, anche in uno scenario molto ambizioso, che preveda il picco delle emissioni globali nel 2020 e successive rapide riduzioni, è necessario secondo l'IPCC rimuovere dall'atmosfera più di 150 miliardi di tonnellate di CO₂ (IPCC, 2018).

La disponibilità di tecnologie per emissioni negative (Negative Emission Technologies – NET) sarà quindi un fattore chiave per limitare nei prossimi decenni l'impatto delle attività umane sul clima. Molte sono le NET studiate e discusse nella letteratura scientifica; esempi sono la bioenergia con cattura e stoccaggio del carbonio (BECCS), il rimboschimento e la gestione forestale, le pratiche agricole per aumentare il tasso di carbonio nei suoli, l'accelerazione del dilavamento naturale delle rocce carbonatiche o silicee (*enhanced weathering*), la cattura diretta dall'aria con successivo stoccaggio del carbonio, la fertilizzazione oceanica, l'alcalinizzazione degli oceani (Minx et al., 2018; EASAC, 2018). Sebbene le attuali conoscenze sulle NET siano ancora incomplete, sono disponibili molte stime di costi, del potenziale di mitigazione e dei possibili effetti collaterali (Fuss et al., 2018).

Lo sviluppo delle NET è ancora molto limitato, in quanto si registrano numerose difficoltà dovute a ragioni ambientali, sociali ed economiche (Smith et al., 2016); in particolare, il costo delle tecnologie esistenti per la cattura e lo stoccaggio del carbonio (CCS) è molto elevato e rappresenta un ostacolo sostanziale alla loro implementazione su larga scala (Honegger et al., 2018). Secondo Nemet et al. (2018), sebbene la maggior parte delle NET sia in fase di ricerca e sviluppo, ciascuna dovrebbe poter garantire la rimozione annua di diverse gigatonnellate di CO₂ per poter incidere sul riscaldamento globale in corso; l'innovazione nelle NET è quindi cruciale e ha lo scopo di produrre migliori efficienze (una maggiore quantità di carbonio rimosso), costi inferiori, un minor numero di effetti collaterali negativi e una maggiore accettazione da parte della società. Nel caso in cui la decarbonizzazione non proceda secondo gli scenari più ottimistici, il maggiore sforzo nella rimozione di CO₂, necessario per mantenersi in linea con l'accordo di Parigi, sarà fa-

cilitato dalla disponibilità di un maggior numero di opzioni tecnologiche (Rau, 2019).

Parallelemente agli impatti causati direttamente e indirettamente dall'aumento delle temperature, la diffusione negli oceani della CO₂ presente in eccesso nell'atmosfera sta comportando un aumento dell'acidità delle acque dei mari, con rischi già elevati per gli ecosistemi marini, in particolare le barriere coralline (Doney et al., 2014; Dove et al., 2013; Hönisch et al., 2012). L'acidificazione dei mari è infatti considerato "l'altro problema" legato all'aumento delle concentrazioni di CO₂ nell'atmosfera, aggiuntivo a quello del riscaldamento globale. Circa un quarto della CO₂ che viene emessa nell'atmosfera viene assorbita dall'acqua dei mari (Le Quéré et al., 2018), dove si trasforma in acido carbonico, che si dissocia rapidamente in ioni bicarbonato (HCO₃⁻), carbonato (CO₃²⁻) e idrogeno (H⁺), causando dunque una diminuzione del pH dell'acqua del mare.

La maggior acidità del mare può danneggiare in vari modi l'ecosistema marino, per esempio limitando la formazione del carbonato di calcio di cui sono costituiti i gusci e gli scheletri di molti organismi marini quali coralli, conchiglie e plancton. Se le acque sono più acide, questi organismi non possono svilupparsi e proliferare adeguatamente, con conseguenti gravi danni all'ecosistema (Nagelkerken et al., 2015).

Per contrastare l'acidificazione dei mari, e consentire un maggior assorbimento di CO₂ atmosferica, numerosi gruppi di ricerca (Khesghi, 1995; Renforth et al., 2017; Lenton et al., 2018) hanno studiato una tecnica chiamata *ocean alkalization* o *ocean liming*, consistente nella dissoluzione in acqua marina di sostanze alcaline quali l'idrossido di calcio (calce idrata), in modo da aumentarne il pH. Gli aspetti pratici dello spargimento nel mare di grandi quantità di idrossido di calcio sono però stati ancora poco analizzati, con solo alcune valutazioni preliminari del potenziale di spargimento (Renforth et al., 2013).

Nell'ambito del progetto di ricerca "Desarc-Maresanus", nato dalla collaborazione tra il Politecnico di Milano e la Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), con CO2APPS in qualità di partner tecnico e il supporto della società di gestione del risparmio Amundi, è stato stimato il potenziale scarico di idrossido di calcio nel Mar Mediterraneo tramite la flotta navale commerciale in circolazione. Il settore del trasporto marittimo è infatti responsabile di circa il 2,3 % delle emissioni globali di CO₂ (EDGAR, 2020).

In questo articolo è riportata la metodologia di stima dell'entità del traffico navale nel Mar Mediterraneo, uno dei fattori chiave per la stima del potenziale di spargimento di idrossido di calcio, che dipende anche da altri fattori come il rateo di scarico e la logistica dei sistemi di approvvigionamento del prodotto.

Il dettaglio geografico delle rotte delle navi è servito per fornire un input alle valutazioni modellistiche che hanno stimato l'efficacia dello spargimento nella rimozione della CO₂ e il contrasto all'acidificazione (Butenschön et al., 2020).

2. MATERIALI E METODI

2.1. Dati EMODnet

Al fine di stimare la densità di traffico navale nel Mediterraneo, sono stati utilizzati i dati del progetto citare EMODnet (European Marine Observation and Data Network) Human Activities, una rete di organizzazioni che raccoglie, elabora secondo standard internazionali e rende liberamente disponibili diversi tipi di dati relativi all'ambiente marino e alle attività marittime. I dati sono stati scaricati dal portale EMODnet e riguardano la densità di traffico navale (EMODnet, 2019) nelle celle di una griglia avente dimensioni 1km x 1km, nei 12 mesi del 2017 e per tre categorie di imbarcazioni: passenger (passeggeri), cargo (trasporto merci sfuse e in container) e tanker (navi cisterna e petroliere). Non sono state prese in considerazione altre categorie di navi o perché in numero molto

limitato o perché poco adatte allo spargimento di calce idrata; esempi sono le imbarcazioni di dimensioni limitate e/o che si muovono principalmente vicino alla costa. Le tre categorie considerate rappresentano secondo l'International Maritime Organization (IMO, 2014) il 49% di tutte le navi commerciali circolanti nel mondo e il 99% del tonnellaggio globale totale.

In Figura 1 viene riportata una mappa dei dati originali sulla densità di traffico delle navi appartenenti alla categoria cargo.

Come si può vedere in Figura 1, e più chiaramente in Figura 2, che mostra il dettaglio del traffico marittimo originale intorno a Malta, i dati sulla densità del traffico navale tengono conto anche delle ore in cui le navi sono ormeggiate in prossimità dei porti. Questi dati, non risultando interessanti ai fini dello spargimento della calce idrata, sono sta-

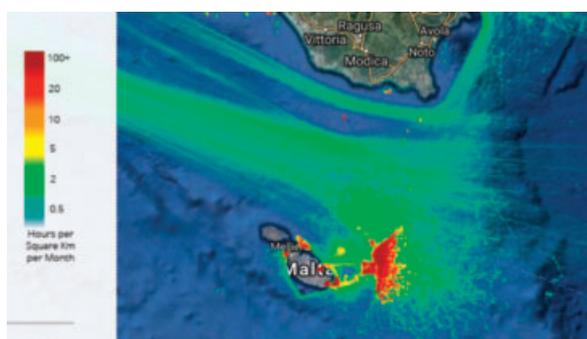


Figura 2 – Particolare delle petroliere (categoria tanker) ormeggiate nelle vicinanze del porto di Malta. Permanenza media mensile nel 2017 (Fonte: EMODnet)

Dati originali
Classe Cargo e mese gennaio 2017

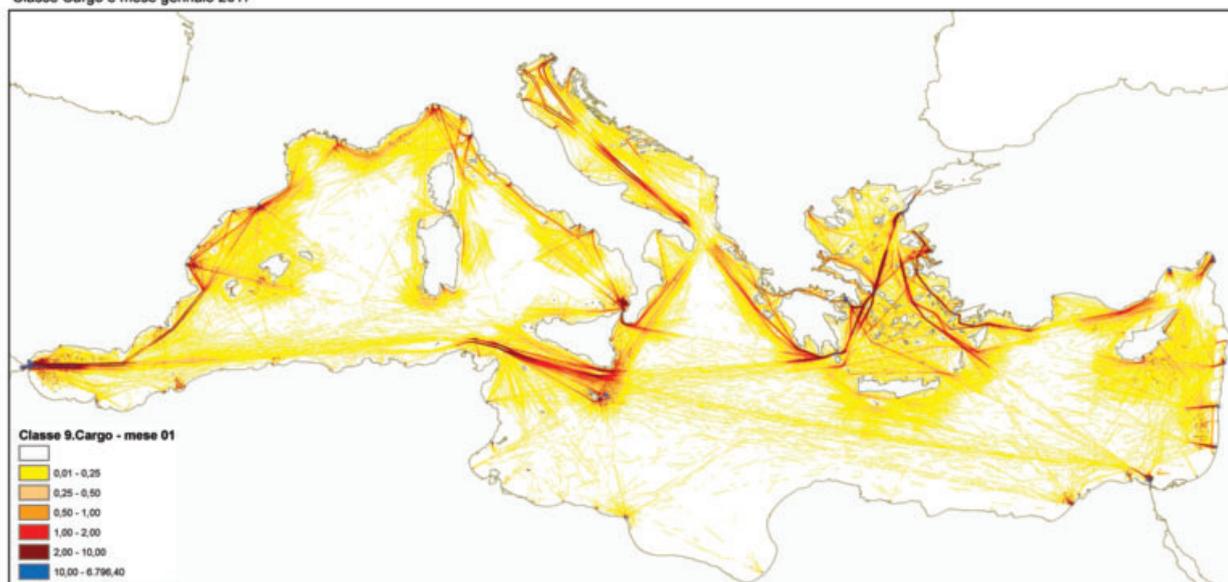


Figura 1 – Densità (ore/mese) delle navi appartenenti alla categoria "Cargo" nel gennaio 2017. (Fonte: EMODnet)

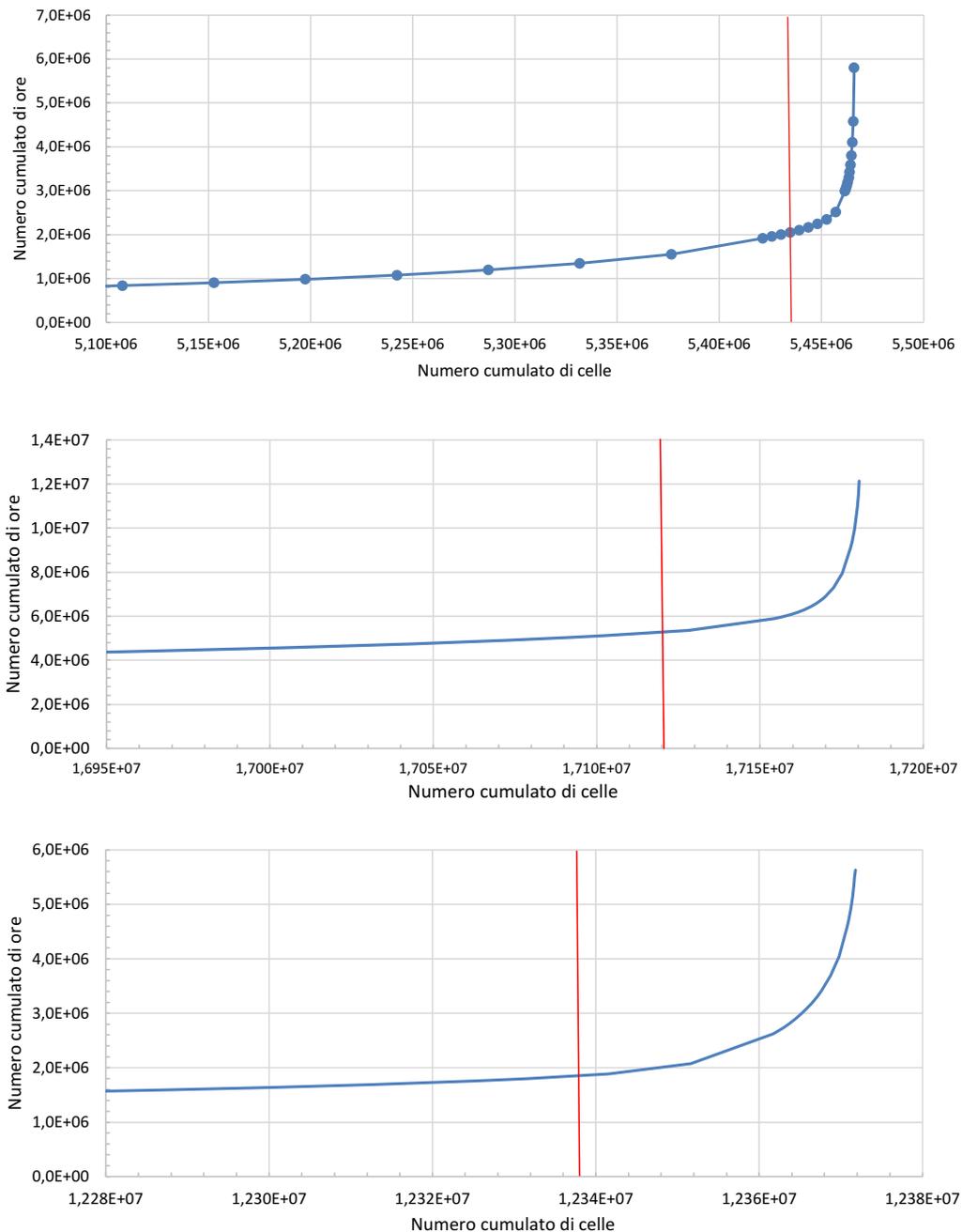


Figura 3 – Distribuzione delle ore totali/mese di permanenza nelle celle della griglia EMODnet nel 2017 – Categorie Passenger (in alto), Cargo (in centro) e Tanker (in basso)

ti eliminati mediante calcolo della distribuzione cumulativa delle ore mensili di navigazione in ogni cella e per ogni categoria di navi (Figura 3).

Al fine di eliminare anche i dati relativi al tempo trascorso dalle navi alla fonda, il numero massimo di ore mensili nelle celle è stato limitato ad un valore soglia pari a 10, assegnando così un valore limite di 10 ore/km²/mese alla densità di traffico delle navi. Il percentile della distribuzione che corrisponde al valore soglia 10 è abbastanza simile per le tre categorie di navi considerate (99,3° per la categoria Passenger, 99,7° per le categorie Cargo e Tanker), pertanto il numero di celle interessate da

questa riduzione è sempre inferiore allo 0,7% del totale delle celle della griglia. Come si può notare dai grafici in Figura 3, il valore scelto per la soglia, 10 ore/mese, non è lontano dal punto di inflessione delle tre curve che rappresentano la distribuzione cumulativa dei valori di densità per le tre categorie di navi.

Attraverso un confronto visivo tra le mappe originali della densità di traffico (ad esempio la Figura 1) e quelle ottenute dopo l'applicazione della soglia, è stato verificato che questa scelta di limitazione a 10 ore/cella di permanenza delle navi nelle celle, identificate come aree di ormeggio, non

riguardasse sostanzialmente le celle nelle rotte delle navi per tutte e tre le categorie.

Infine, al fine di eliminare le ore di navigazione in cui non è ipotizzabile lo spargimento di idrossido di calcio perché vicine alla costa sono state eliminate le celle il cui centroide si trova a distanza inferiore ai 5 km.

2.2. Dati IMO

In seguito ad una risoluzione della Conferenza internazionale delle Parti della Convenzione MARPOL (Maritime Pollution) del 1997, l'IMO è stata invitata a intraprendere, in collaborazione con l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), un approfondimento sulle emissioni di CO₂ generate dalle navi per migliorare i dati dell'inventario globale delle emissioni di CO₂. Un risultato sono i tre IMO Greenhouse Gas Study pubblicati nel 2000, 2009, e 2014. I dati sulla numerosità e sulle emissioni delle diverse tipologie di navi, divise per classi dimensionali, provenienti dall'ultimo studio (IMO, 2014) e relativi all'anno 2012, sono riportati

in Tabella SM1 (materiale supplementare). I dati della numerosità delle imbarcazioni sono relativi sia al totale registrato, sia a quelle rilevate come circolanti dal sistema AIS (Automatic Identification System); questi ultimi dati sono utilizzati per la stima dei giorni medi di navigazione annuali.

In Tabella 1 sono mostrati i valori riassuntivi per le diverse categorie di navi. Per tutte le categorie, i valori medi dei parametri sono stati calcolati pesando le diverse classi dimensionali in base al numero dei giorni totali annui di navigazione. Per il tonnellaggio, essendo diverse le unità di misura utilizzate per le navi passeggeri (GT, gross tonnage), navi portacontainer (TEU, Twenty-Foot Equivalent Unit) e bulk carrier (portarinfuse) o navi da carico generale (dwt, dead weight tons), è stata applicata una conversione in dwt, utilizzando le seguenti equivalenze:

- 1 TEU (Twenty-Foot Equivalent Unit) = 10 dwt (tonnellaggio lordo).
- 1 GT = 8,93 dwt (NILIM, 2011).

Si osservi che la TEU è un'unità di misura standard di volume nel trasporto dei container ISO, e corrisponde a circa 40 metri cubi totali, mentre le dwt

Tabella 1 – Numero di navi, emissioni di CO₂ e caratteristiche per ogni categoria di imbarcazione (Fonte dati: IMO, 2014)

Tipologia di nave	Flotta totale	Numero navi circolanti (AIS)	Giorni di navigazione totali	Stazza media	Giorni di navigazione medi per nave	Velocità media in mare	Consumo carburante annuo per nave	Consumo carburante giornaliero	Emissioni CO ₂ annue	Emissione CO ₂ giornaliera	Fattore di emissione
			giorni/anno	dwt	giorni/anno	km/h	t/anno	t/giorno	kt/anno	tCO ₂ /giorno	kgCO ₂ /km
Ferry-pax only	3.152	1.197	219.503	214	184	25,6	1.346	7	12.042	55	89
Cruise	520	372	75.593	6.104	222	22,3	36.796	146	34.935	462	862
Ferry-RoPax	2.867	1.778	341.592	2.110	192	18,9	4.808	24	31.061	91	201
PASSENGER	6.539	3.347	636.688	1.931	193	21,6	7.412	33	78.038	123	241
Bulk carrier	10.397	9.286	1.674.585	75.752	181	21,4	5.752	31	166.304	99	193
Container	5.132	4.855	1.046.903	45.417	218	27,4	14.172	62	205.396	196	299
General Cargo	16.486	9.433	1.554.792	7.470	165	18,1	1.848	11	68.156	44	101
CARGO	32.015	23.574	4.276.280	43.499	184	21,7	6.394	31	439.856	103	185
Chemical tanker	4.935	4.179	729.085	20.883	175	21,0	4.242	24	55.023	75	150
Oil tanker	7.395	5.165	891.817	96.676	178	20,0	8.051	45	123.614	139	288
TANKER	12.330	9.344	1.620.902	602.286	177	20,5	6.338	36	178.637	110	226
Liquefied gas tankers	1.612	1.410	291.101	35.294	213	24,5	12.255	51	45.960	158	268
Other liquids tankers	149	39	4.530	670	116	15,4	2.140	18	1.002	221	600
Refrigerated bulk	1.090	763	132.076	5.695	173	21,5	5.625	32	17.945	136	263
Ro-Ro (Ferry)	1.745	909	157.428	6.111	89	10,1	7.530	40	29.394	187	767
Vehicle	837	776	196.410	16.576	255	24,4	17.937	38	24.503	125	213
Yacht	1.750	1.110	73.316	171	66	17,3	880	13	3.482	47	115
Service – tug	14.641	5.043	502.713	119	100	10,7	462	5	21.301	42	165
Miscellaneous – fishing	22.130	4.510	741.334	181	164	12,0	733	4	50.959	69	239
Offshore	6.480	5.082	538.228	1.716	106	12,8	1.362	13	27.397	51	165
Service – other	3.423	2.816	325.911	2.319	116	12,6	1.148	10	11.988	37	121
Miscellaneous – other	3.008	64	7.477	59	117	11,7	773	7	7.425	993	3542
ALTRO	55.253	21.112	2.679.422	5.768	134	13,4	2.767	13	195.395	73	233
TOTALE	107.749	58.787	9.504.393	115.495	170,3	19,2	5.610	28	937.886	99	212

Tabella 2 – Emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, PM, CO e COVNM (Fonte: IMO, 2014; EDGAR, 2020)

Tipologia di nave	Emissioni CO ₂	% emissioni CO ₂	Emissioni NO _x	Emissioni SO _x	Emissioni PM	Emissioni CO	Emissioni COVNM
	kt/anno	%	kt/anno				
Ferry-pax only	12042	1%	244	131	18	12	9
Cruise	34935	4%	708	381	52	35	26
Ferry-RoPax	31061	3%	629	339	46	31	23
PASSENGER	78038	8%	1581	852	117	78	58
Bulk carrier	166304	18%	3369	1816	249	166	123
Container	205396	22%	4161	2243	307	205	152
General Cargo	68156	7%	1381	744	102	68	51
CARGO	439856	47%	8912	4802	658	439	326
Chemical tanker	55023	6%	1115	601	82	55	41
Oil tanker	123614	13%	2504	1350	185	123	92
TANKER	178637	19%	3619	1950	267	178	133
Liquified gas tanker	45960	5%	931	502	69	46	34
Other Other liquids tankers	1002	0%	20	11	1	1	1
Refrigerated bulk	17945	2%	364	196	27	18	13
Ro-Ro (Ferry)	29394	3%	596	321	44	29	22
Vehicle	24503	3%	496	268	37	24	18
Yacht	3482	0%	71	38	5	3	3
Service – tug	21301	2%	432	233	32	21	16
Miscellaneous – fishing	50959	5%	1032	556	76	51	38
Offshore	27397	3%	555	299	41	27	20
Service -other	11988	1%	243	131	18	12	9
Miscellaneous – other	7425	1%	150	81	11	7	6
ALTRO	195.395	21%	3.959	2.133	292	195	145
TOTALE – dati IMO	937.886	100%	19.002	10.240	1.402	936	696
TOTALE – dati EDGAR *	769.227		18.152	11.269	2.105	5.881	1.448

* Per il PM, EDGAR considera la frazione < 10 µm, PM10

sono un'unità di misura di massa; pertanto, è stata utilizzata una stima approssimata della capacità di un contenitore che corrisponde ad una TEU (ESSF, 2017).

Il totale delle ore di navigazione/anno equivalenti è stato calcolato moltiplicando il numero di navi per il numero di giorni medi equivalenti in mare. Per la stima delle emissioni di CO₂ IMO ha assunto l'utilizzo di olio combustibile pesante, con un fattore di emissione di CO₂ di 3,114 kg/ton di carburante. In tabella sono altresì riportati i fattori di emissione medi (in kgCO₂/km) stimati per i diversi tipi di imbarcazione.

In aggiunta alle emissioni di CO₂, l'IMO Greenhouse Gas Study del 2014 presenta delle stime delle emissioni globali nel 2012 dal trasporto marittimo dei seguenti inquinanti atmosferici: ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), particolato atmosferico (PM), monossido di carbonio (CO) e composti organici volatili non metanici

(COVNM). Non essendo disponibili i valori delle emissioni di questi inquinanti per le singole categorie di navi, sono stati stimati disaggregando il totale (riportato nella penultima riga di Tabella 2) sulla base della distribuzione delle emissioni di CO₂ per ogni categoria di nave (terza colonna della Tabella 2).

Sono quindi stati confrontati i valori di emissione globale di questi inquinanti, di fonte IMO con quelli forniti per l'anno 2012 dall'Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR, si veda il cap. 2.3), riportate nell'ultima riga della Tabella 2. Si può notare come per alcuni inquinanti (CO₂ e NO_x) le differenze fra le due stime sono inferiori al 10%, per gli altri inquinanti le stime di EDGAR sono nettamente superiori, a causa di diverse assunzioni sui fattori di emissione.

È quindi stata effettuata la stima dei valori medi per le tre categorie di imbarcazioni EMODnet considerate in precedenza. Il numero di giorni equiva-

Tabella 3 – Corrispondenza tra le categorie IMO ed EMODnet

Categorie IMO		Categorie EMODnet	
9	Ferry-pax only	8	Passenger
10	Cruise	8	Passenger
11	Ferry-RoPax	8	Passenger
1	Bulk carrier	9	Cargo
4	Container	9	Cargo
5	General cargo	9	Cargo
3	Chemical tanker	10	Tanker
7	Oil tanker	10	Tanker

lenti in mare (calcolato dall'IMO considerando le ore effettive di funzionamento dei motori convertite in giorni) medio per le tre categorie considerate è stato calcolato ponderando il numero di giorni medi equivalenti di navigazione per ciascuna categoria IMO, utilizzando la corrispondenza tra le

due categorizzazioni indicate nella Tabella 3. Il risultato è mostrato in Tabella 4.

2.3. Dati EDGAR

L'Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) è un prodotto del Joint Research Center (JCR) e dell'Agenzia di valutazione olandese PBL e contiene inventari delle emissioni globali di gas a effetto serra e di inquinanti atmosferici (Crippa et al., 2019; EDGAR, 2018; EDGAR, 2020; Alessandrini et al., 2017; Wang et al., 2008).

EDGAR effettua la stima delle emissioni da traffico navale a livello globale sulla base dei dati dei consumi dei carburanti utilizzati, disaggregandoli sul grigliato a seconda dei segnali LRIT (Long Range Identification and Tracking) forniti dalle navi battenti bandiera dell'Unione Europea (Stati membri dell'UE, l'Islanda, la Norvegia

Tabella 4 – Consumo di carburante, numero di navi, emissioni di CO₂, e caratteristiche per ogni tipologia di imbarcazione, raggruppati in base alla classificazione EMODnet (Fonte dati: IMO, 2014)

Categoria di imbarcazione	Flotta totale	Numero navi circolanti (AIS)	Giorni di navigazione totali	Stazza media	Giorni di navigazione medi per nave	Velocità media in mare	Consumo carburante annuo per nave	Consumo carburante giornaliero	Emissione CO ₂ annua	Emissione CO ₂ giornaliera	Fattore di emissione
			giorni/anno	dwt	giorni/anno	km/h	t/anno	t/giorno	kt/anno	tCO ₂ /giorno	kgCO ₂ /km
PASSENGER	6.539	3.347	636.688	1.931	193	21,6	7.412	33	78.038	123	241
CARGO	32.015	23.574	4.276.280	43.499	184	21,7	6.394	31	439.856	103	185
TANKER	12.330	9.344	1.620.902	62.584	177	20,5	6.338	36	178.637	110	226
ALTRO	55.253	21.112	2.679.422	5.768	134	13,4	2.767	13	195.395	73	233
TOTALE	107.749	58.787	9.504.393	29.711	170	19,2	5.610	28	937.886	99	212

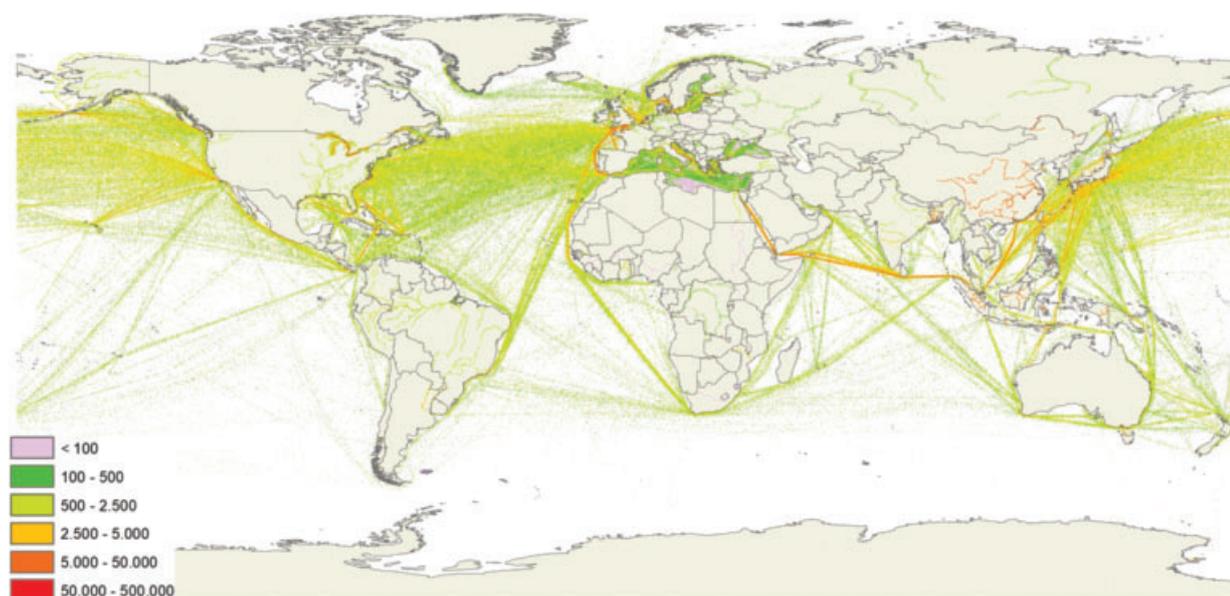


Figura 4 – Emissioni di CO₂ da traffico marittimo per l'anno 2018 (fonte dati: EDGAR, 2020)

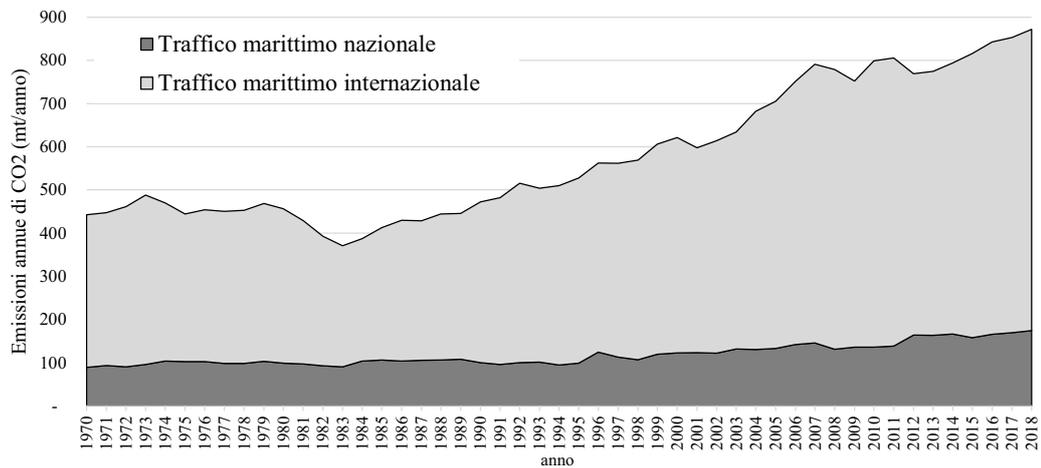


Figura 5 – Emissioni di CO₂ (Mt/anno) da traffico marittimo nazionale ed internazionale (fonte dati: EDGAR, 2020)

e i territori d'oltremare degli Stati membri dell'UE).

Il downscaling delle emissioni viene anch'esso effettuato sulla base dei dati della densità di segnali LRIT per categoria di nave, cioè assumendo lo stesso fattore di emissione in tutto il mondo per la medesima categoria di nave. Nella Figura 5 sono mostrate le emissioni di CO₂ da traffico marittimo per l'anno 2018.

L'andamento totale delle emissioni di CO₂ stimate da EDGAR per il settore del trasporto marittimo, mostrato in Figura 5, mostra una netta prevalenza del traffico marittimo internazionale (697,5 Mt/anno nel 2018) rispetto al traffico marittimo nazionale (174,2 Mt/anno).

3. RISULTATI

La seguente Tabella 5 mostra la stima delle ore totali mensili di navigazione nel Mediterraneo prima e dopo la limitazione del valore massimo mensile della densità del traffico a 10 ore/mese. Il confronto con i dati che considerano l'ulteriore eliminazione delle celle a meno di 5 km dalla costa (Figura 6), mostra una drastica riduzione del numero totale di ore utilizzabili per lo spargimento, rispetto ai dati originali rispettivamente del 85%, 58% e 60% per le categorie "Passenger", "Cargo" e "Tanker".

La densità di traffico effettivamente sfruttabile per lo scarico di calce spenta è riportata nella Figura 7 per le categorie Cargo e Tanker.

Tabella 5 – Dati sulla densità del traffico marittimo nel Mediterraneo, dati originali EMODnet e con densità delle navi massima 10 ore/mese/km²

Mese	Passenger			Cargo			Tanker		
	N. celle	Dati originali	Con soglia	N. celle	Dati originali	Con soglia	N. celle	Dati originali	Con soglia
		10 ³ ore /mese			10 ³ ore /mese			10 ³ ore /mese	
1	280.980	239	60	1.113.017	892	384	737.671	406	175
2	141.371	101	30	1.245.221	858	386	813.888	397	177
3	331.521	275	76	1.446.773	1.008	482	982.294	448	213
4	464.833	324	99	1.478.972	991	478	1.028.560	450	214
5	540.759	407	129	1.626.735	1.113	563	1.162.110	500	246
6	536.518	459	154	1.693.359	1.196	612	1.271.272	544	271
7	557.775	513	174	1.696.542	1.215	617	1.269.036	555	279
8	548.561	514	177	1.647.116	1.125	582	1.230.871	528	267
9	520.098	444	143	1.517.770	1.016	498	1.086.481	462	220
10	518.592	403	120	1.373.133	952	474	953.499	464	212
11	365.014	292	76	1.183.238	863	413	822.167	436	191
12	289.962	258	64	1.158.444	904	407	779.794	441	195
Totale	5.095.984	4.230	1.303	17.180.320	12.135	5.898	12.137.643	5.630	2.661

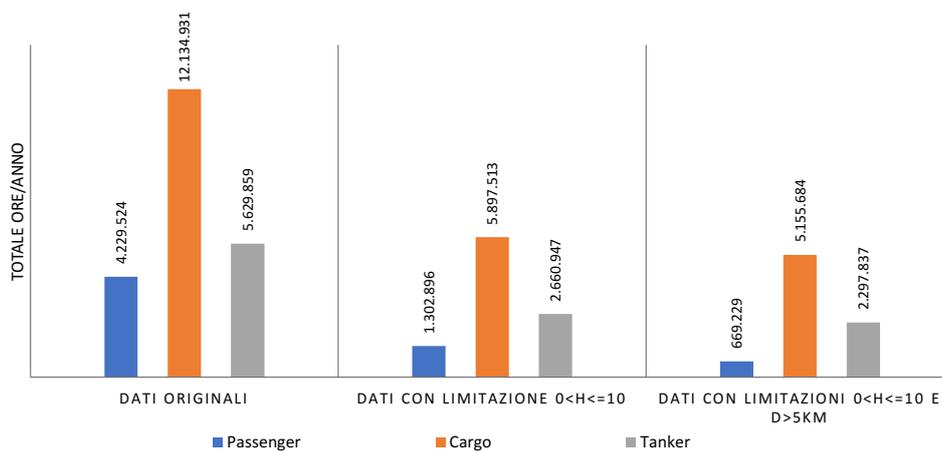


Figura 6 – Confronto tra la densità del traffico marittimo (ore/anno) nei dati originali, dopo la limitazione della densità delle navi a 10 ore/mese/km² e dopo la rimozione delle celle ad una distanza < 5 km dalla linea di costa

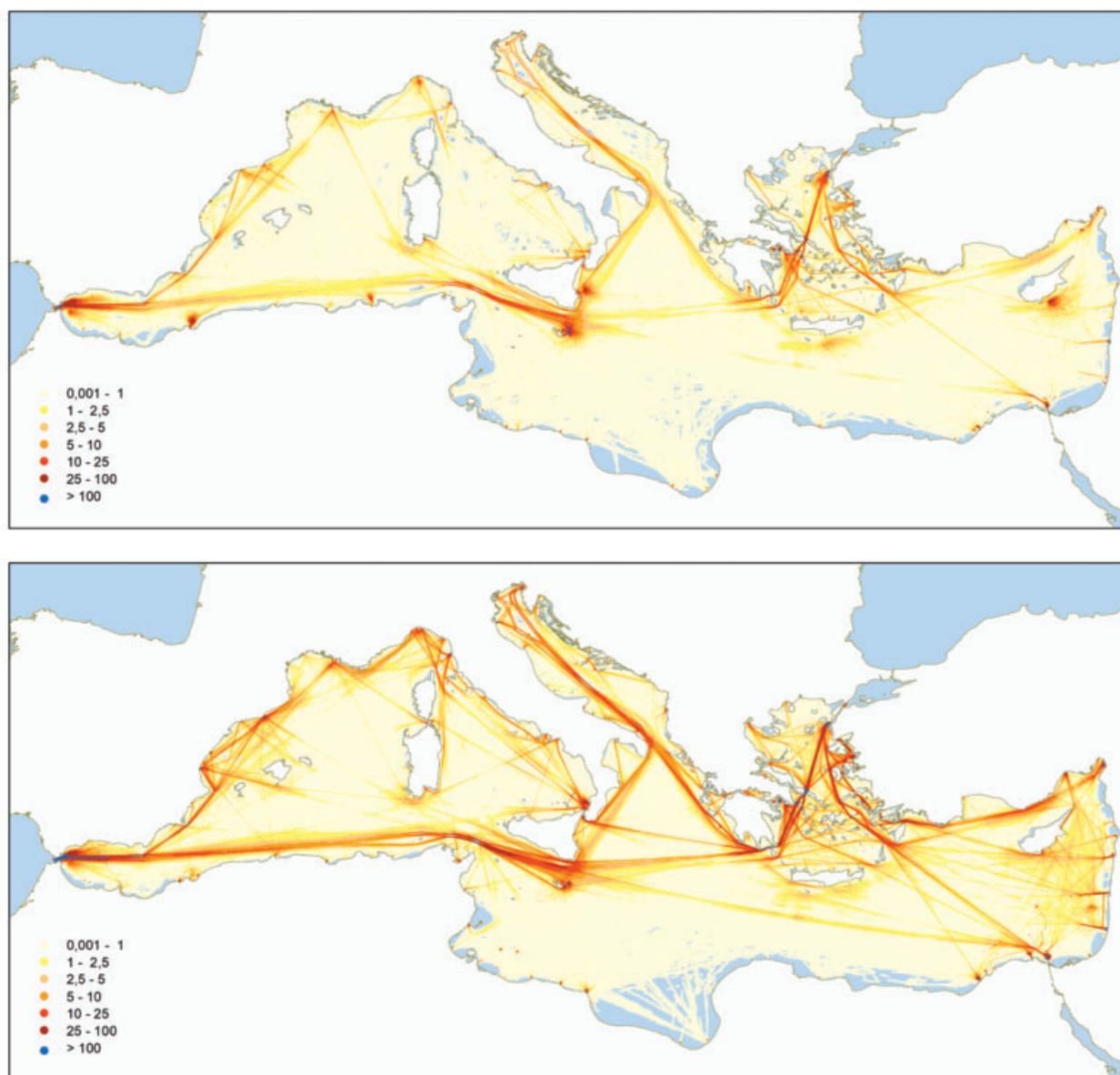


Figura 7 – Densità del traffico marittimo (ore/anno) per le categorie Cargo (in alto), e Tanker (in basso) sfruttabile per lo spargimento di calce idrata

4. DISCUSSIONE

4.1. Confronto tra il traffico navale nel Mediterraneo e nel mondo

Il confronto fra le ore di navigazioni nel Mar Mediterraneo (anno 2017) e a livello mondiale (anno 2012), stimate come descritto nei paragrafi. 2.1 e 2.2 è riportato in Tabella 6. Si nota come nonostante la superficie del Mediterraneo rappresenti solo lo 0,7% degli oceani globali (2,51Mkm² contro 361 Mkm²), il traffico navale nel Mar Mediterraneo rappresenta tra il 5% (navi da carico) e l'8% (navi passeggeri) del traffico globale.

4.2. Confronto con i dati EDGAR

È stata analizzata la percentuale dei segnali LRIT (usate come proxy per il downscaling delle emissioni di CO₂ dal 2010 al 2018) delle navi nel Mar Mediterraneo (le categorie analizzate sono le stesse dei dati EMODnet) rispetto al totale mondiale. I dati forniti in formato tif sono stati convertiti in dati puntuali tramite la funzione "Raster To Point" del software "ArcGis", e sono state effettuate le somme dei dati dei segnali per le due aree, riportati in Tabella 7.

Le percentuali del traffico marittimo nel Mar Mediterraneo rispetto a quello globale (in termini di ore di navigazione) stimate sulla base dei dati EDGAR sono sostanzialmente inferiori a quelli precedentemente valutati dai dati EMODnet/IMO relativi al 2017/2012. Tale differenza può essere solo in parte dovuta ai diversi anni considerati, in

quanto la variazione media delle emissioni di CO₂ da traffico navale nel periodo 2012-2015 mostra un aumento molto ridotto (IMO, 2014; ICCT, 2017); una giustificazione migliore è che la banca dati EDGAR considera soltanto le navi battenti bandiera degli Stati che contribuiscono al rilevamento dei dati LRIT da parte del Cooperative Data Centre (CDC) dell'Unione Europea, nonostante nel Mar Mediterraneo sia presente un traffico significativo di navi battenti bandiere di Stati non europei.

Come mostrato in Tabella 8, secondo i dati UNCTAD (UNCTAD, 2019a), le navi commerciali battenti bandiera di uno Stato europeo (Norvegia inclusa) costituiscono il 14% della flotta commerciale mondiale in termini numerici (21% in termini di tonnellaggio lordo), mentre le navi appartenenti a compagnie navali con sede in uno Stato europeo (inclusi il Principato di Monaco e i territori d'oltremare di Stati europei come ad es. le Isole Bermuda) contano per il 29% del totale della flotta commerciale mondiale (41% in termini di tonnellaggio lordo), l'86% delle quali batte bandiera straniera (cioè una bandiera di un paese diverso da quello della sede della compagnia navale proprietaria). Questi numeri sono congruenti con numerosi studi (es. Deloitte, 2017; Commissione Europea, 2015; Luo et al., 2013), che hanno mostrato la rilevanza della pratica del "flagging out", che porta le compagnie di navigazione europee a utilizzare bandiere di comodo di paesi extraeuropei, come ad es. Panama, Isole Marshall, Liberia, ecc. per ottenere agevolazioni fiscali, riducendo così i costi del personale di bordo e di sicurezza sociale.

Tabella 6 – Rapporto tra le ore di navigazione dai dati EMODnet e le ore di navigazione dai dati IMO

		<i>Passenger</i>	<i>Cargo</i>	<i>Tankers</i>
Ore di navigazione/anno – Mar Mediterraneo (EMODnet)	a	1.302.896	5.155.684	2.297.837
Numero di navi – Mondo (IMO)	b	3.347	23.574	9.344
Media giorni/anno navigazione – Mondo (IMO)	c	193	184	177
Ore totali equivalenti navigazione/anno – Mondo	d=b·c	15.490.391	104.293.055	39.582.558
% ore/anno Mar Mediterraneo / Mondo	% a/d	8,4%	4,9%	5,8%

Tabella 7 – Dati proxy delle emissioni di CO₂ associati al traffico marittimo nel Mediterraneo e nel mondo (Fonte: EDGAR)

		<i>Passenger</i>	<i>Cargo</i>	<i>Tankers</i>
Segnali LRIT navi – Mar Mediterraneo	a	448.611	336.370	411.389
Segnali LRIT navi – Mondo	b	14.089.216	14.085.525	14.085.146
% Mar Mediterraneo/Mondo	% a/b	3,2%	2,4%	2,9%

Tabella 8 – Numero di navi e tonnellaggio lordo totale registrati all'interno dell'Unione Europea e nel mondo (Fonte: UNCTAD, 2019a). (1) Oltre ad Unione Europea è considerato il territorio di Norvegia, Islanda, Monaco e territori d'oltremare

Paese o territorio di proprietà della nave	Numero di navi				Tonnellaggio lordo (DWT), 10 ⁶ ton			
	Bandiera nazionale	Bandiera straniera	Totale	% bandiera straniera/totale	Bandiera nazionale	Bandiera straniera	Totale	% bandiera straniera/totale
UE+Norvegia, Islanda, Monaco e territori d'oltremare	3.251	12.500	15.219	82%	111,4	685	796,1	86%
Totale Mondo	22.556	29.128	51.684	45%	542,1	1.420	1.963,6	72%
EU/Mondo	14%	43%	29%		21%	48%	41%	

Ad esempio, Mediterranean Shipping Company (MSC), prima compagnia navale europea per emissioni di CO₂ (Transport & Environment, 2019), risulta utilizzare la bandiera di Panama per buona parte della sua flotta. Relativamente alle nazioni, ad esempio il 52% delle navi appartenenti a compagnie di navigazione con sede in Grecia, costituenti circa il 9% della flotta mondiale commerciale, batte bandiera liberiana, panamense o marshallense (UNCTAD, 2019b).

Inoltre, da un'analisi a campione effettuata su navi circolanti nel Mar Mediterraneo registrate dal sito marinetraffic.com risulta rilevante la quota di navi battenti bandiere di paesi extraeuropei.

Sembra quindi molto plausibile che una parte significativa delle emissioni di CO₂ delle navi non sia rappresentata dalla banca dati EDGAR; ciò comporta una sottovalutazione del traffico marittimo nel Mediterraneo, e delle corrispondenti emissioni degli altri inquinanti. Va però ricordato che per alcuni inquinanti (SO_x, PM, NMVOC, CO) EDGAR fornisce stime di emissioni globali dal trasporto marittimo nettamente più elevate di quelle di IMO, a causa di utilizzo di valori più elevati di emissioni specifiche (fattori di emissione) e questo potrebbe compensare parte della differenza legata al minore numero di ore di navigazione stimate per il Mediterraneo.

5. CONCLUSIONI

Le elaborazioni condotte hanno permesso di quantificare il traffico marittimo nel Mediterraneo per le tre principali categorie di navi adibite al trasporto di merci, considerando sia l'aspetto legato alle ore di navigazione che quello riguardante la numerosità delle stesse, e hanno inoltre fornito un'importante analisi della densità dei flussi navali.

Al di là delle incertezze riguardanti la precisa quantificazione spaziale nel traffico marittimo, il

Mediterraneo è caratterizzato da un traffico navale molto intenso, di gran lunga maggiore alla media globale. Questo dato, se da un lato fa emergere l'importante peso dovuto alle emissioni di CO₂ da traffico marittimo in quest'area, dall'altro indica un elevato potenziale di utilizzo del traffico navale esistente per lo spargimento di idrossido di calcio. I dati elaborati nella ricerca presentata risultano inoltre di grande utilità per impostare scenari di spargimento dai quali stimare, tramite simulazioni modellistiche, i potenziali benefici derivanti dall'utilizzo dell'idrossido di calce per contrastare l'acidificazione del mare e l'aumento delle concentrazioni di CO₂ in atmosfera.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Alessandrini A., Guizzardi D., Janssens-Maenhout G., Pisoni E., Trombetti M., Vespe M. (2017) Estimation of shipping emissions using vessel Long Range Identification and tracking data. *Journal of Maps*, 13, 2, 946-954.
- Butenschön M., Lovato T., Masina S. (2020) Simulazione di scenari di alcalinizzazione del Mediterraneo. Relazione al convegno "La rimozione di CO₂ dall'atmosfera e il progetto Desarc-Maresanus", Politecnico di Milano 4-5 Febbraio. www.desarc-maresanus.net/appuntamenti.
- Commissione Europea (2015). Study on the Analysis and Evolution of International and EU Shipping. Final report, September 2015.
- Crippa M., Solazzo E., Huang G., Guizzardi D., Koffi E. et al. (2019) High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), *Nature Scientific Data*, 2019, submitted.
- Deloitte (2017) EU Shipping Competitiveness Study, International benchmark analysis.
- Doney S.C., Bopp L., Long M.C. (2014) Historical and Future Trends in Ocean Climate and Biogeochemistry. *Oceanography*, 27, 1, 108-119.
- Dove S.G., Kline D.I., Pantos O., Angly F.E. et al. (2013) Future reef decalcification under a business-as-usual CO₂ emission scenario. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 38, 15342-15347.

- EASAC (2018) Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? European Academies' Science Advisory Council policy report 35, February. https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf
- EDGAR (2018) Emissions Database for Global Atmospheric Research. <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>
- EDGAR (2020) EDGAR v5.0 Global Greenhouse Gas Emissions: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=50_GHG
- EMODNET (2019) EU Vessel density map. Detailed Method. EMODnet Human Activities report, v. 1.5.
- ESSF (2017) European Sustainable Shipping Forum. Guidance/Best practices document on monitoring and reporting of fuel consumption, CO₂ emissions and other relevant parameters pursuant to Regulation 2015/757 on monitoring, reporting and verification emissions from maritime transport.
- Fuss S., Lamb W.F., Callaghan M.W., Hilaire J. et al. (2018) Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13, 063002.
- Honegger M., Reiner D. (2018) The political economy of negative emissions technologies: consequences for international policy design. 18:3, 306-321.
- Hönisch B., Ridgwell A., Schmidt D.N., Thomas E. et al. (2012) The geological record of ocean acidification. *Science*, 335(6072), 1058-1063.
- ICCT (2017) Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015. International Council on Clean Transportation.
- IMO (2014) Third IMO Greenhouse Gas Study. International.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2018) Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kheshgi H.S. (1995) Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity. *Energy*, 20, 915-922.
- Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S. et al. (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141-2194.
- Lenton A., Matear R.J., Keller D.P., Scott V., Vaughan N.E. (2018) Assessing carbon dioxide removal through global and regional ocean alkalization under high and low emission pathways. *Earth Syst. Dynam.*, 9, 339-357.
- Luo M., Fan L., Li K.X. (2013) Flag choice behaviour in the world merchant fleet. *Transportmetrica A: Transport Science*, 9, 5, 429-450.
- Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M. W., Fuss S., et al. (2018) Negative Emissions – Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13, 063001.
- Nagelkerken I., Connell S.D. (2015) Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO₂ emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 13272-13277.
- Nemet G.F., Callaghan M.W., Creutzig F., Fuss S. et al. (2018) Negative emissions – Part 3: Innovation and up-scaling. *Environmental Research Letters* 13, 063002.
- NILIM, National Institute for Land and Infrastructure Management of Japan (2011) Technical note No. 309.
- Rau G.H. (2019) The race to remove CO₂ needs more contestants. *Nature Climate Change*, 9, 256.
- Renforth P., Jenkins B.G., Kruger, T. (2013) Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 60, 442 -452.
- Renforth P., Henderson G. (2017) Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Rev. Geophys* 55, 636-674.
- Rockström J., Gaffney O., Rogelj J., Meinshausen M., Nakicenovic N. (2017) A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355, 633, 1269-1271.
- Smith P., Davis S.J., Creutzig F., Fuss S., et al. (2016) Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42-50.
- Transport & Environment (2019) EU shipping's climate record-Maritime CO₂ emissions and real-world ship efficiency performance.
- UNCTAD (2019a) Review of maritime transport 2019. United Nations Conference on Trade and Development.
- UNCTAD (2019b) Handbook of statistics, 2019. United Nations Conference on Trade and Development.
- Wang C., Corbett J.J., Firestone J. (2008) Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories, *Env. Sci. Techn.*, 42, 1, 193-199.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca esposta nel presente articolo si è svolta nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus (www.desarc-maresanus.net), che ha ricevuto il supporto finanziario di Amundi SGR SpA. Gli autori desiderano ringraziare la dr.ssa Monica Crippa per la collaborazione riguardante il dataset EDGAR e lo scambio di informazioni, il dr. Luigi Falco e il dr. Alessandro Pititto per la preziosa collaborazione nell'acquisizione dei dati EMODnet, nonché l'Ing. Andrea Panarello (Interprogetti s.r.l.) per i preziosi suggerimenti. Si ringrazia altresì la dr.ssa Francesca Cella per il supporto nelle elaborazioni dei dati.

MATERIALE SUPPLEMENTARE

Il materiale supplementare è disponibile su www.ingegneriadellambiente.net.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2020 è sostenuta da:



better together



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 3/2020

