

ERAS Lazio 2 – Valutazione epidemiologica dello stato di salute della popolazione residente nei pressi dei termovalorizzatori del Lazio

Executive summary

La valutazione degli effetti sulla salute associati alla residenza in prossimità di inceneritori deriva prevalentemente da studi ecologici e suggerisce un possibile effetto per alcuni esiti riproduttivi (malformazioni congenite, nascita pretermine e basso peso alla nascita) e alcune forme tumorali (laringe, polmoni, esofago, stomaco, intestino, fegato, reni, vescica e seno). Tuttavia il grado di evidenza è limitato. Lo studio è stato condotto nell'ambito del progetto ERASLazio2 e ha valutato il rischio di ricovero ospedaliero tra i residenti sul territorio, in relazione all'attivazione e alla chiusura dei due termovalorizzatori di Colleferro e San Vittore del Lazio. Nella valutazione degli effetti dei termovalorizzatori si è tenuto conto della concentrazione di PM10 derivante da altre fonti (PM10 di background).

L'approccio utilizzato è quello di coorte retrospettivo. Sono stati arruolati 47,192 soggetti residenti tra il 1° Gennaio 1996 e il 31 Dicembre 2008 in un'area di 7 km dall'impianto di Colleferro e di 5 km dall'impianto di San Vittore del Lazio, entrati in funzione nel 2002. La disponibilità delle informazioni anagrafiche georeferenziate ha consentito di attribuire l'esposizione ai livelli di inquinamento di background (concentrazione media annua di PM10 stimata nel 2018 tramite modelli random forest) e alle emissioni dei termovalorizzatori (PM10) stimate dal modello di dispersione lagrangiano SPRAY. I soggetti della coorte sono stati suddivisi in tre categorie di esposizione "bassa-media-alta" in base alle concentrazioni stimate degli inquinanti. Tutte le analisi, condotte con il modello di Cox separatamente per genere, hanno tenuto conto di età, classe di rischio, sede dell'impianto, posizione socio-economica e una serie di variabili GIS indicative della residenza in prossimità di altre potenziali fonti di inquinamento presenti nelle aree (HR e IC 95%).

L'effetto della vicinanza residenziale agli impianti di Colleferro e San Vittore del Lazio sul rischio di ospedalizzazione nelle aree a media e alta esposizione (post-attivazione vs pre-attivazione degli impianti) si manifesta con un aumento di rischio per le malattie respiratorie cronico-ostruttive (HR = 1,65; 1,41-2,61); un aumento del rischio di malattie respiratorie si osserva anche tra i residenti nell'area a media esposizione (HR = 1,15; 1-1,37). Stratificando per sesso si osserva tra gli uomini che vivono nell'area a media esposizione un eccesso di rischio di ospedalizzazione per malattie respiratorie (HR = 1,28; 1,04-1,57) mentre per le donne residenti nell'area di media esposizione si evidenzia un aumento del rischio di asma (HR = 3,12; 1,00-9,73).

I risultati indicano una associazione tra l'esposizione all'inquinamento derivante dagli impianti di termovalorizzazione e un incremento delle ospedalizzazioni per disturbi respiratori. E' quindi opportuna una continua sorveglianza epidemiologica della popolazione residente in una delle aree a più elevata criticità ambientale del Lazio.

INTRODUZIONE

Il processo di combustione, generalmente chiamato incenerimento, è oggi il trattamento termico più comune applicato per diverse tipologie di rifiuti, tra cui i rifiuti solidi urbani, i rifiuti industriali e i combustibili solidi da rifiuti (Lombardi et al., 2015). Il trattamento termico consente di ridurre i rifiuti solidi sia in massa che in volume, preservando lo spazio in discarica e riducendo il rischio di problemi sanitari dovuti alla loro decomposizione (Gohlke e Martin, 2007). Il vantaggio principale di questo processo è infatti la possibilità di recuperare energia durante la lavorazione degli scarti. Pertanto, gli impianti di trattamento termico sono oggi indicati come termovalorizzatori.

Al di là degli indubbi benefici, c'è anche una certa preoccupazione per i possibili effetti nocivi dell'incenerimento per la salute umana. Il processo termico rilascia nell'aria diverse sostanze, tra cui il particolato, sia grossolano (PM₁₀) che fine (PM_{2,5}), metalli pesanti come il mercurio o il piombo, e prodotti di combustione incompleta come le diossine o il benzene (National Research Council (US) Committee on Health Effects of Waste Incineration, 2000). Questi contaminanti, una volta rilasciati, possono raggiungere il corpo umano attraverso varie vie, e quindi potenzialmente esercitare i loro danni. L'effetto dell'incenerimento dei rifiuti sulla salute umana è stato analizzato molte volte negli ultimi anni, valutando vari possibili esiti. Revisioni recenti (Tait et al., 2019; Domingo et al., 2020; Vinti et al., 2021) hanno mostrato associazioni rilevanti tra le emissioni degli inceneritori e molteplici esiti come cancro, malattie cardiovascolari e respiratorie in termini sia di mortalità che di morbidità. Gli esiti riproduttivi e i difetti congeniti sono, così come le disfunzioni endocrine, eventi frequentemente studiati in questo tipo di contesti. I risultati degli studi sugli effetti sulla salute dell'incenerimento dei rifiuti, tuttavia, sono spesso poco chiari o incompleti, principalmente a causa di problemi di progettazione dello studio o di valutazione dell'esposizione. D'altra parte, non ci sono dubbi sugli effetti dannosi dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana, a vari livelli, (Dominski et al., 2021), e sul suo carico di malattia attribuibile. Nel 2019, ad esempio, il PM_{2.5} è stato responsabile di 463.526 (320.221 – 607.077) decessi in Europa e di 32.738 (23.731 – 41.752) in Italia. Anche la qualità della vita ne risente fortemente, con una stima di 1045 (724,6 – 1.373) DALY per 100.000 abitanti in Europa e 729,8 (528,2 – 940,7) in Italia nel 2019 (Organizzazione Mondiale della Sanità [OMS], 2022).

A partire dal 2020, gli impianti di incenerimento in Italia erano 80, per lo più situati nella parte settentrionale del Paese (ISPRA, 2022). Abbiamo ambientato il nostro studio in una nota area ecologicamente critica del Lazio, nell'Italia centrale, che comprende sei comuni. Abbiamo analizzato l'effetto della vicinanza residenziale ai due termovalorizzatori presenti nell'area (ubicati nei comuni di Colleferro e San Vittore del Lazio).

La stessa area era stata precedentemente studiata da Golini et al. (2014). I loro risultati hanno indicato un eccesso di ricoveri per malattie respiratorie in individui di sesso maschile che vivono vicino agli impianti, nonché rischi per la salute cardiovascolare e respiratoria associati al particolato proveniente dalle emissioni primarie.

Il nostro obiettivo è stato quello di definire il rischio di ricovero ospedaliero tra i residenti sul territorio, in relazione all'attivazione e alla chiusura dei due termovalorizzatori. La nostra scelta delle malattie studiate è stata coerente sia con il rationale di studi precedenti simili che con le caratteristiche specifiche del nostro ambiente. Per questo motivo, abbiamo escluso le cause tumorali a causa del tempo di induzione possibilmente poco chiaro, considerando il tempo di follow-up del nostro studio, e

i difetti riproduttivi/congeniti, a causa dell'impiego di una coorte chiusa. Invece, ci siamo concentrati sulle malattie cardiovascolari e respiratorie.

Metodi

Area di studio

Il termovalorizzatore di Colleferro è situato in un'area di circa 30.000 m² ed è costituito da due impianti, il primo attivato nel dicembre 2002, il secondo nel giugno 2003. Il termovalorizzatore di San Vittore del Lazio si estende su un'area di circa 50.000 m² ed è stato attivato nell'agosto 2002. Alla fine del 2018, la chiusura dell'impianto di Colleferro è stata decisa dall'amministrazione politica della regione Lazio, con l'impianto già sequestrato per smaltimento illecito di rifiuti nel 2009.

Colleferro è un'area ecologicamente critica della regione Lazio. Dall'inizio del 1900 ha inglobato impianti industriali di vario tipo che hanno contaminato il terreno e le falde acquifere sottostanti. La situazione critica di Colleferro è legata alla sua ubicazione nella valle del fiume Sacco, monitorata da decenni dopo la scoperta di un massiccio smaltimento illegale di rifiuti, altamente contaminati da beta-esaclorocicloesano, un composto organico ritenuto tossico (Tomczak et al., 1981). Studi di biomonitoraggio sono stati condotti negli ultimi anni in quell'area e i risultati hanno confermato la contaminazione umana da beta-esaclorocicloesano (Porta et al., 2013) e metalli pesanti (D'Ilio et al., 2013) nel sangue dei residenti nell'area.

L'area di studio è stata definita come un raggio di 5 Km dall'impianto di San Vittore e di 7 km dall'impianto di Colleferro, a causa della sua complessità. Le posizioni centrali delle aree dei due inceneritori sono state geocodificate utilizzando un sistema GIS.

Valutazione dell'esposizione

Il particolato (PM₁₀) è stato scelto come proxy dell'inquinamento atmosferico prodotto dai due impianti. Per stimare la sua concentrazione a livello del suolo, è stato utilizzato il modello di dispersione lagrangiana SPRAY delle particelle. Questo modello ha utilizzato le informazioni sulle specifiche tecniche degli impianti, i parametri meteorologici e l'orografia dell'area per fornire la concentrazione di PM₁₀ a livello del suolo con una risoluzione di 500 x 500 m. Le emissioni complessive dell'impianto di Colleferro sono state stimate sommando le emissioni delle due ciminiere. Il PM₁₀ è stato anche considerato un indicatore dell'inquinamento atmosferico di fondo dovuto alle emissioni primarie del traffico urbano. Le concentrazioni medie annuali di fondo di PM₁₀ (2016-2019) sono state stimate per ogni km² d'Italia utilizzando un approccio di machine learning, la foresta casuale (RF), che sfrutta le informazioni provenienti da predittori spazio-temporali, dati satellitari e dati di monitoraggio della qualità dell'aria. I dettagli possono essere trovati in Stafoggia et al. 2021 (25,26).

Disegno dello studio

È stato condotto uno studio retrospettivo di coorte residenziale. Tutti i residenti nell'area entro 7 km (Colleferro) e 5 km (S. Vittore) dagli impianti tra il 01/01/1996 e il 31/12/2008 sono stati registrati con indirizzi geocodificati e seguiti fino al 31/12/2022. Per ogni soggetto erano disponibili i dati anagrafici, l'indirizzo di base di residenza geocodificato utilizzando l'indirizzo del software ArcGIS, la data di immigrazione (e l'eventuale emigrazione) e lo stato anagrafico. Il follow-up per lo stato di stato civile è stato effettuato attraverso l'anagrafe comunale e il collegamento dei registri con la banca dati regionale sulla mortalità, che comprende tutti i decessi della popolazione residente. Lo stato di

vitalità delle persone che si sono trasferite al di fuori dell'area di studio nel periodo 1996-2018 è stato registrato tramite collegamento con il fascicolo della Direzione Sanitaria Regionale. I soggetti sono stati considerati a rischio fino al decesso, al di fuori della regione Lazio, o fino all'ultimo giorno del follow-up (31/12/2022).

Per ogni soggetto della coorte sono stati valutati, oltre al PM10 da emissioni primarie, l'esposizione al PM10 derivante dagli impianti, stimata all'indirizzo di residenza. Abbiamo definito tre livelli di esposizione:

- Basso: valori di PM10 inferiori al 50° percentile;
- Intermedio: valori di PM10 compresi tra il 50° e l'80° percentile;
- Alto: valori di PM10 superiori all'80° percentile.

La geocodifica degli indirizzi ha permesso, per ogni individuo, di determinare la distanza tra l'indirizzo di residenza e le autostrade, le strade molto trafficate e gli impianti industriali. La residenza all'interno dei confini dello Scalo di Colferro e in prossimità del fiume Sacco è considerata anche per le persone esposte all'impianto di Colferro. La posizione socio-economica (SEP) è stata valutata per ogni soggetto, sulla base del tratto di censimento.

Dati sanitari

I dati relativi ai ricoveri tra il 1996 e il 2022 sono stati ricavati dai sistemi informativi regionali del Lazio. Abbiamo incluso nell'analisi ogni individuo della coorte che, durante il periodo di follow-up, aveva subito almeno un ricovero con una delle cause di interesse come diagnosi primaria:

- Cause naturali, ad eccezione del parto o di traumatismi (ICD IX 001-629; 677-799);
- Malattie circolatorie (ICD IX 390-459), ulteriormente suddivise in:
 - o Malattie cardiache (ICD IX 390-429);
 - o Cardiopatie ischemiche (ICD IX 410-414);
 - o Malattie cerebrovascolari (ICD IX 430-438);
- Malattie respiratorie (ICD IX 460-519), ulteriormente suddivise in:
 - o Infezioni acute delle vie respiratorie (ICD IX 460-466; 480-487);
 - o Malattie polmonari cronico-ostruttive (ICD IX 490-492; 494-496);
 - o Asma (ICD IX 493);

Sono stati esclusi dall'analisi gli individui che avevano subito due diversi ricoveri in meno di 30 giorni.

Analisi statistica

Abbiamo eseguito un'analisi in due fasi, considerando diversi intervalli di tempo. La prima fase ha avuto l'obiettivo di valutare il rischio di ospedalizzazione dal 1/01/1996 al 31/12/2002 (prima che gli impianti fossero attivi) e dal 1/01/2003 al 31/12/2018 (quando entrambi gli impianti erano attivi). Abbiamo utilizzato il modello di Cox per gli eventi ricorrenti, inserendo un termine di interazione tra l'esposizione categoriale al PM10 e una variabile fittizia che tiene conto del periodo durante il quale si è verificato il ricovero (prima o dopo il 01/01/2003). Sono stati esclusi dal tempo a rischio il tempo trascorso in ospedale per una causa diversa dalle cause di interesse. Abbiamo stratificato per localizzazione dell'impianto e classe di rischio (un valore che è unico per ogni individuo: l'ipotesi è che chi era già stato ricoverato avesse una maggiore probabilità di subire un altro ricovero, per una delle cause studiate o per qualsiasi altra causa). Le stime sono state corrette per: PM10 da emissioni primarie, stato socio-economico (Cesaroni et al., 2006), residenza in prossimità di autostrade e strade molto trafficate, fiume Sacco, impianti industriali e confini di Colferro Scalo. Questo approccio pre-

post ha permesso di stimare il rischio di ospedalizzazione passando dal periodo precedente all'attivazione degli impianti al periodo successivo, nelle aree a media e alta esposizione, relativamente al rischio di ospedalizzazione nell'area di controllo.

La seconda fase ha riguardato solo l'impianto di Colleferro. La sua chiusura è stata decretata alla fine del 2018. In questo caso abbiamo utilizzato un approccio pre-post con due cut-off, uno il 01/01/2003, quando l'impianto è stato attivato, e uno il 01/01/2019, quando abbiamo ipotizzato la chiusura. Abbiamo usato il modello di Cox per gli eventi ricorrenti. Il gruppo di riferimento era costituito dai residenti nell'area a bassa esposizione nel periodo precedente all'attivazione dell'impianto. Le stime sono state corrette come per il modello utilizzato nella prima fase e per una variabile fittizia che tiene conto della presenza di codici ICD-9 utilizzati per Covid-19 (043.1, 043.21, 043.31, 079.82, 480.2, 480.41, 480.42, 480.3, 518.1, 518.2, 518.91, 519.1, 519.2, 5197.1) nelle diagnosi primarie o secondarie.

Tutte le analisi sono state eseguite con Stata e RStudio (StataCorp. 2019. Software statistico Stata: versione 16. Stazione dell'università, TX: LLC di StataCorp.; RStudio Team (2020). RStudio: Sviluppo integrato per R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>).

Risultati

Principali risultati

Le figure 1-6 mostrano i confini amministrativi dei comuni coinvolti in questo studio, gli impianti con buffer di 5 e 7 km, i residenti, le autostrade, le strade trafficate e i fiumi.

Le figure 1 e 2 mostrano i modelli di dispersione del PM10 derivanti dagli impianti. Le figure 3 e 4 mostrano le tre zone di esposizione (bassa, media e alta).

Figura 1 Modello di dispersione del PM10 derivante dall'impianto di Colleferro

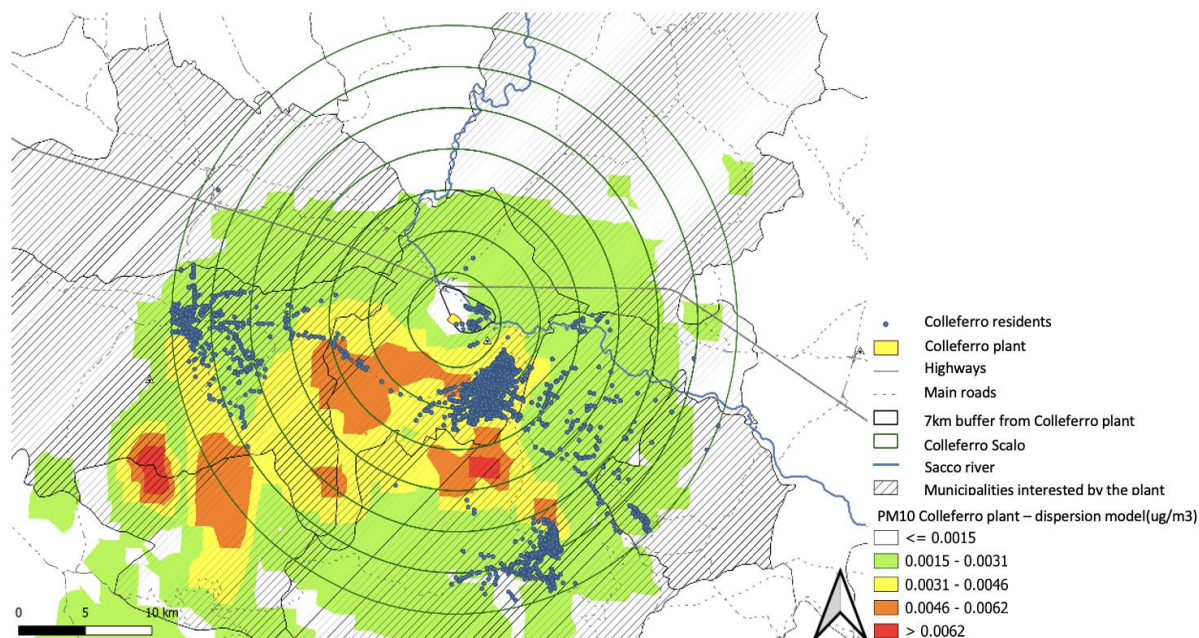


Figura 2 Modello di dispersione del PM10 derivante dall'impianto di San Vittore del Lazio

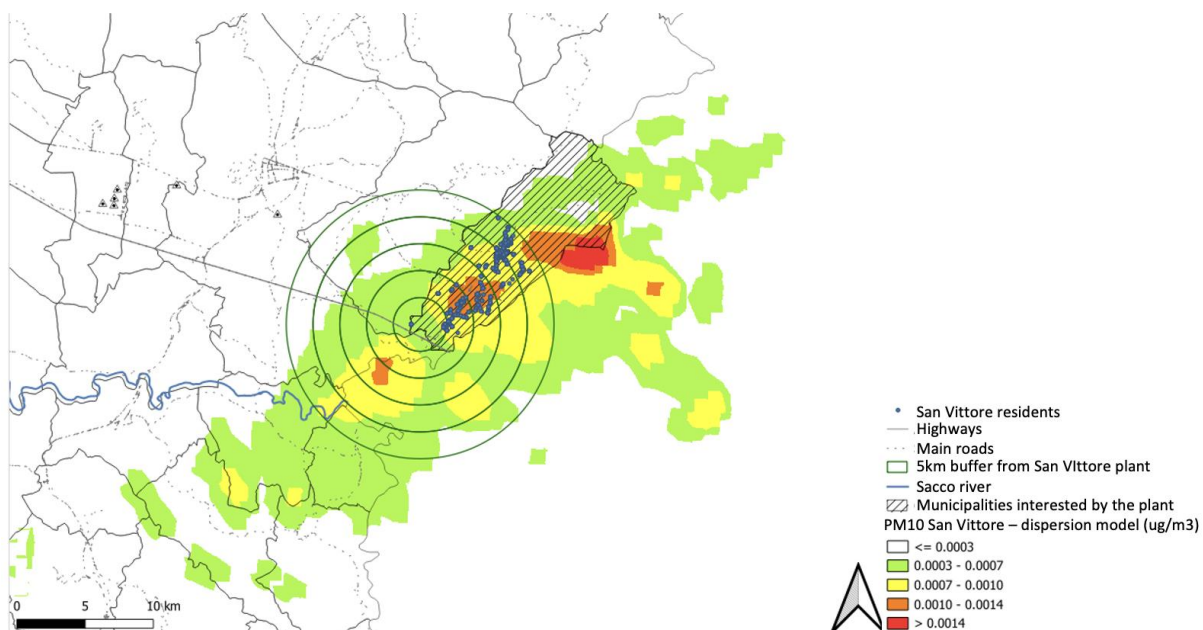


Figura 3 Zone di esposizione al PM10 derivanti dall'impianto di Colleferro

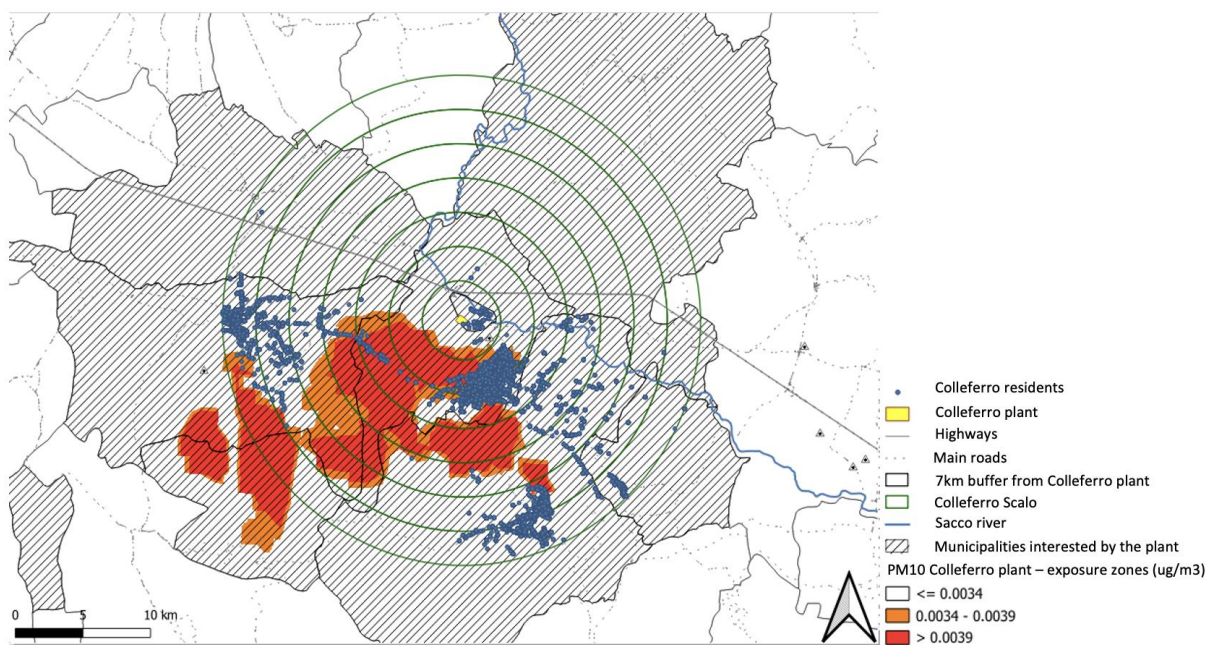
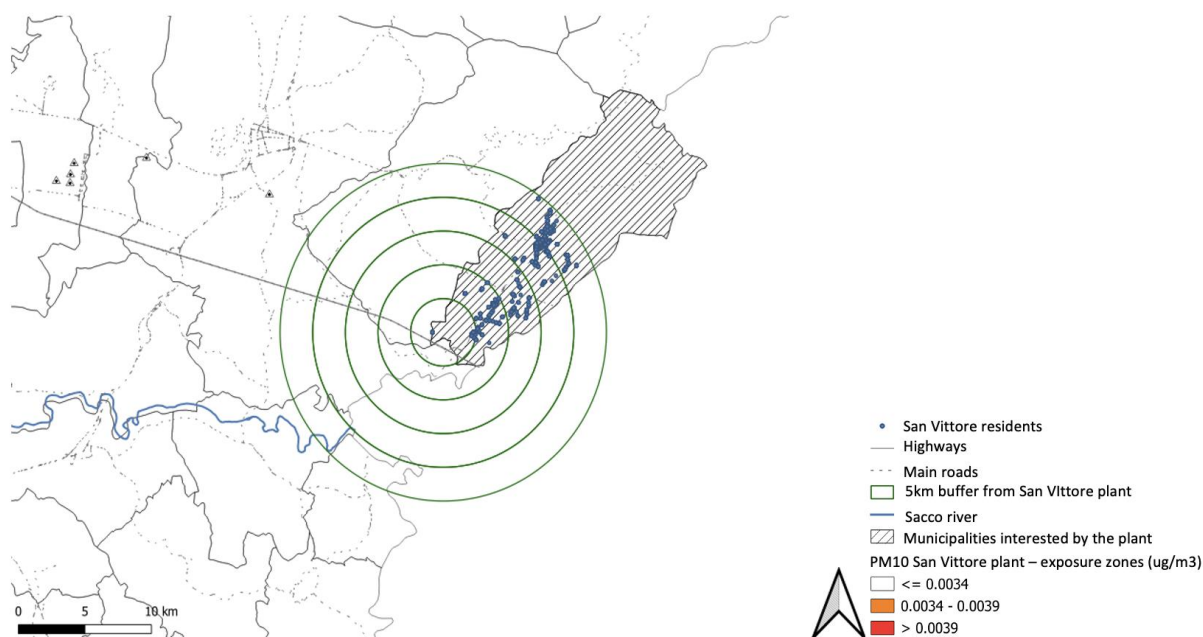


Figura 4 Zone di esposizione al PM10 derivanti dall'impianto di San Vittore del Lazio



Le figure 5 e 6 mostrano la concentrazione media annua di PM10 del 2018 nelle aree di interesse.

Figura 5 Concentrazione media di PM10 (2018) nell'area di Colleferro

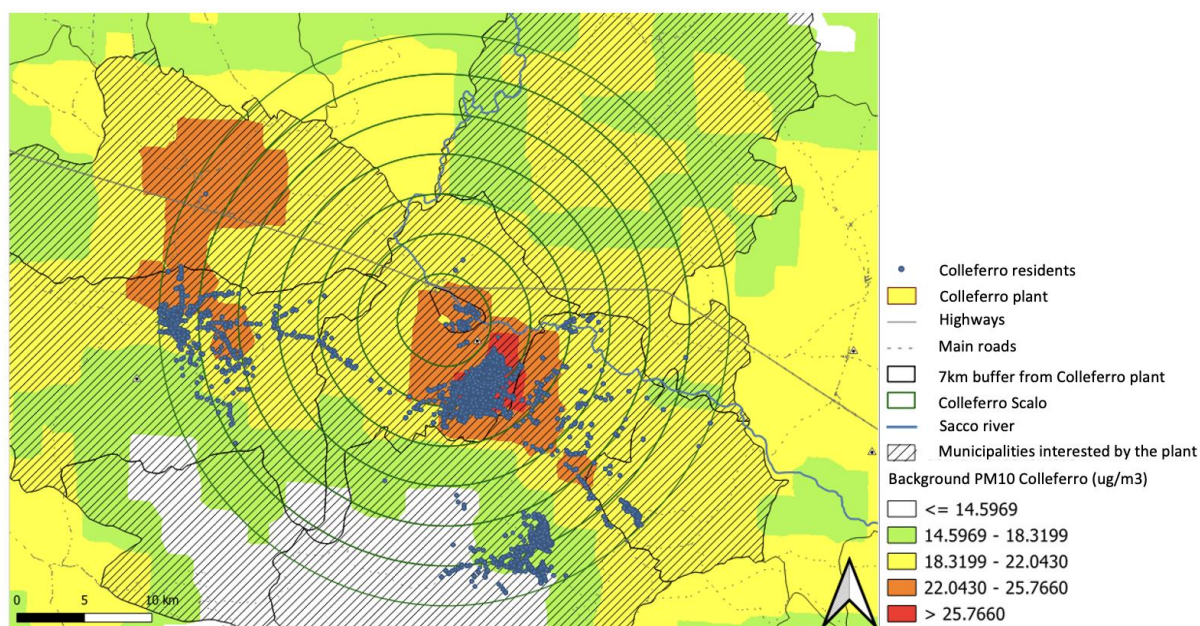
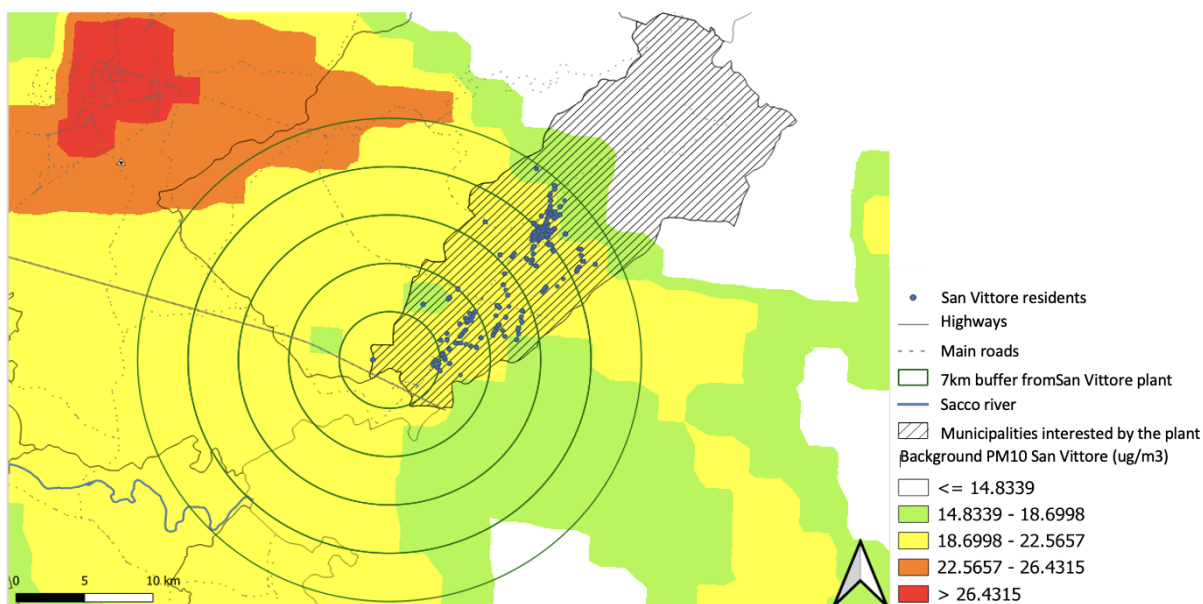


Figura 6 Concentrazione media di PM10 (2018) nell'area di San Vittore del Lazio



Nella Tabella 1 abbiamo riassunto alcune caratteristiche della popolazione in studio al basale. La coorte è composta da 47.192 residenti nell'area di studio (50,6% femmine). La maggior parte degli individui aveva un'età compresa tra 15 e 44 anni al baseline (44,6%). Il 27,1% dei residenti aveva una posizione socioeconomica medio-alta e solo il 6,2% si collocava nella classe più bassa di questo indicatore. La maggior parte degli individui risiedeva in prossimità dello stabilimento di Colleferro (94%), con solo il 6% della coorte riferita allo stabilimento di San Vittore. Considerando il PM10 da emissioni primarie, la maggior parte degli individui (48,7%) apparteneva alla classe di esposizione più bassa, seguita dalla classe intermedia (36,9%). La maggior parte (55%) degli individui viveva a meno di 150 metri da strade molto trafficate. Il contrario è stato registrato considerando le autostrade, con il 99,3% della coorte che vive a più di 500 metri. Il 65,4% degli individui risiedeva a meno di 2 km da un impianto industriale. L'11% dei soggetti risiedeva in prossimità (fino a 1 km) del fiume Sacco. Solo il 3% degli individui risiedeva all'interno dei confini di Colleferro Scalo. Durante il periodo di studio (1996-2022), il 15,6% degli individui è emigrato dalla coorte e il 17,7% è deceduto.

Tabella 1. Caratteristiche della popolazione in studio per periodo e classe di esposizione al PM10.

		1996-2022	1996-2002	2003-2022			
					PM10		
				Basso	Medio	Alto	Total
		N	N	N	N	N	N
	Totale	47192	40227	20857	12132	8390	41379
		%	%	%	%	%	%
Sesso	Maschio	49.4	49.1	49.7	48.0	48.7	49.0
	Femmina	50.6	50.9	50.3	52.0	51.3	51.0
Età	0-14	22	19.3	24.1	23.6	21.1	23.3
	15-44	44.6	43.8	45.7	45.1	44.1	45.2
	45-64	20.3	22.2	19.8	21.7	23.5	21.1
	65+	13.1	14.7	10.4	9.6	11.3	10.4
Posizione socioeconomica	Alto	9.6	10.1	4.0	5.8	28.6	9.5
	Medio-alto	27.6	28.3	27.1	22.4	35.9	27.5
	Medio	33	33	23.0	48.0	35.3	32.8
	Medio-basso	18.7	18.2	24.3	22.2	0.0	18.8
	Basso	6.2	5.8	12.2	0.0	0.0	6.1
impianto	Colleferro	94	94	87.3	100.0	100.0	93.6
	San Vittore	6	6	12.7	0.0	0.0	6.4
PM10 da emissioni primarie	<24,71 µg/m3	48.7	47.2	84.0	20.0	4.0	49.0
	24,71-26,49 µg/m3	36.9	38.1	10.6	18.2	14.0	36.5
	>26,49 µg/m3	13.6	13.8	3.5	61.8	82.0	13.5
Distanza dalle strade trafficate	>150 m sopra il livello del mare	45	45.1	43.9	57.5	29.0	44.9
	≤150 m sopra il livello del mare	55	54.9	56.1	42.5	71.0	55.1
Distanza dalle autostrade	>500 m sopra il livello del mare	99.3	99.3	98.6	100.0	100.0	99.3
	≤500 m sopra il livello del mare	0.7	0.7	1.4	0.0	0.0	0.7
Distanza da impianti industriali	>2 km	34.5	34.3	67.3	2.1	3.2	35.2
	0-1 km	19.6	20.2	7.5	39.7	18.4	19.2
	1-2 km	45.8	45.6	25.1	58.2	78.3	45.6
Distanza dal fiume Sacco	>1 km	88.6	88.6	89.4	79.8	99.9	88.7
	≤1 km	11.4	11.4	10.6	20.2	0.1	11.3
Residenza all'interno dei confini di Colleferro Scalo	No	97	97	94.2	100.0	100.0	97.1
	Sì	3	3	5.8	0.0	0.0	2.9
Stato in vita	Vivo	69.4	69.6	74.7	75.1	73.5	74.6
	Emigrato	15.6	10.6	11.4	11.8	11.8	11.6
	Morto	17.7	19.8	13.8	13.1	14.7	13.8

La tabella 2 mostra il numero di anni-persona, stratificato per periodo di studio, ubicazione dell'impianto e classe di esposizione.

Tabella 2 Anni-persona, stratificati per periodo di studio, ubicazione dell'impianto e classe di esposizione.

	Bassa esposizione	Esposizione media	Alta esposizione	Totale
San Vittore	60396.04	0	0	60396.04
1996-2002	14876.46	0	0	14876.46
2003-2022	45519.58	0	0	45519.58
Colleferro	418910.48	291311.03	203166.31	913387.82
1996-2002	103120.08	75914.67	54412.63	233447.38
2003-2018	259146.00	177117.70	122797.56	559061.26
2019-2022	56644.40	38278.66	25956.12	120879.18
Totale	479306.52	291311.03	203166.31	973783.86

La Tabella 3 mostra il numero totale di ricoveri ospedalieri causa-specifici, stratificati per periodo di studio, ubicazione dell'impianto e classe di esposizione.

Tabella 3 Numero totale di ricoveri ospedalieri causa-specifici, stratificato per periodo di studio, ubicazione dell'impianto e classe di esposizione.

Causa del ricovero	1996-2002			2003-2018			2019-2022		
	Bassa esposizione	Esposizione media	Alta esposizione	Bassa esposizione	Esposizione media	Alta esposizione	Bassa bassa	Esposizione media	Alta esposiz
Cause naturali	10394	6016	4142	19505	11062	7507	4314	2567	1704
Colleferro	8741	6016	4142	15715	11062	7507	3693	2567	1704
San Vittore	1653	0	0	3790	0	0	621	0	0
Malattie circolatorie	2099	1117	718	3997	2153	1507	977	523	433
Colleferro	1689	1117	718	3077	2153	1507	821	523	433
San Vittore	410	0	0	920	0	0	156	0	0
Malattie cardiache	1326	675	445	2541	1440	1002	674	398	323
Colleferro	1014	675	445	1964	1440	1002	586	398	323
San Vittore	312	0	0	577	0	0	88	0	0
Cardiopatie ischemiche	319	208	160	772	499	347	262	172	129
Colleferro	260	208	160	599	499	347	231	172	129
San Vittore	59	0	0	173	0	0	31	0	0
Malattie cerebrovascolari	401	205	115	850	399	277	198	76	74
Colleferro	346	205	115	625	399	277	149	76	74
San Vittore	55	0	0	225	0	0	49	0	0
Malattie respiratorie	1092	591	384	1967	1137	719	567	342	216
Colleferro	941	591	384	1694	1137	719	489	342	216
San Vittore	151	0	0	273	0	0	78	0	0
Disassi respiratori infettivi	317	169	112	627	357	183	292	195	131
Colleferro	282	169	112	533	357	183	261	195	131
San Vittore	35	0	0	94	0	0	31	0	0
Malattie polmonari cronico-ostruttive	245	75	52	199	91	68	22	14	5
Colleferro	184	75	52	155	91	68	18	14	5
San Vittore	61	0	0	44	0	0	4	0	0
Asma	65	22	24	88	43	21	1	0	0

Colleferro	57	22	24	73	43	21	1	0	0
San Vittore	8	0	0	15	0	0	0	0	0

La Tabella 4 mostra i risultati della prima fase dell'analisi di questo studio. Viene illustrato l'effetto degli impianti di incenerimento dei rifiuti di Colleferro e San Vittore del Lazio sul rischio di ospedalizzazione tra i residenti nelle aree a media e alta esposizione (post-attivazione vs pre-attivazione degli impianti). L'aumento di rischio più elevato si riscontra nell'area ad alta esposizione per le malattie respiratorie cronico-ostruttive (HR = 1,65; 1,41-2,61). Si segnala, inoltre, un significativo aumento del rischio di malattie respiratorie tra i residenti nell'area a media esposizione (HR = 1,15; 1-1,37).

Nella Figura 7 sono mostrati i risultati stratificati per sesso. Per i residenti di sesso maschile che vivono nell'area a media esposizione, il rischio di malattie respiratorie è aumentato (HR = 1,28; 1,04-1,57). Per le donne residenti nell'area di media esposizione, c'è un aumento del rischio di asma (HR = 3,12; 1,00-9,73).

La Tabella 5 mostra i risultati della seconda fase di questo studio. Nell'area di esposizione media, si osserva un rischio di 1,33 (IC 95%: 0,99 - 1,77) per malattie respiratorie infettive; i residenti nell'area ad alta esposizione mostrano rischi di 1.07 (IC 95%: 1.00 - 1.15) per cause naturali, 1.29 (IC 95%: 1.09 - 1.52) per le malattie circolatorie, 1.27 (IC 95%: 1.03 - 1.57) per le malattie cardiache e di 1.52 (IC 95%: 1.02 - 2.26) per le malattie cerebrovascolari. La figura 8 mostra i risultati stratificati per genere.

Tabella 4 *Effetto della vicinanza residenziale ai termovalorizzatori sul rischio di ospedalizzazione nelle aree a media e alta esposizione (periodo di post-attivazione rispetto al periodo di pre-attivazione), valutato dal 1996 al 2018. I risultati sono espressi come hazard ratio (HR) con intervalli di confidenza del 95% (IC95%). Le stime sono corrette per: età, ubicazione dell'impianto, classe di rischio, PM10 di fondo, stato socioeconomico, vicinanza residenziale alle industrie, autostrade, strade trafficate, fiume Sacco, Colleferro Scalo.*

Causa	Bassa esposizione HR (IC 95%)	Esposizione media HR (IC 95%)	Alta esposizione HR (IC 95%)
Cause naturali	1	1.01 (0.97 - 1.06)	1.03 (0.98 - 1.09)
Malattie circolatorie	1	1.00 (0.90 - 1.12)	1.12 (0.99 - 1.27)
Malattie cardiache	1	1.05 (0.91 - 1.22)	1.14 (0.97 - 1.34)
Cardiopatie ischemiche	1	0.98 (0.75 - 1.27)	0.92 (0.69 - 1.22)
Malattie cerebrovascolari	1	0.94 (0.75 - 1.18)	1.20 (0.91 - 1.58)
Malattie respiratorie	1	1.15 (1 - 1.33)	1.15 (0.99 - 1.35)
Disassi respiratori infettivi	1	1.23 (0.97 - 1.56)	0.94 (0.71 - 1.25)
Malattie polmonari cronico-ostruttive	1	1.40 (0.86 - 2.28)	1.65 (1.04 - 2.61)
Asma	1	1.78 (0.93 - 3.43)	0.85 (0.402- 1.78)

Figura 7 Effetto della vicinanza residenziale ai termovalorizzatori sul rischio di ospedalizzazione nelle aree a media e alta esposizione (periodo di post-attivazione relativamente al periodo di pre-attivazione), valutato dal 1996 al 2018. I risultati sono visualizzati come hazard ratio (HR) con intervalli di confidenza del 95% (IC95%). Le stime sono corrette per: età, ubicazione dell'impianto, classe di rischio, PM10 di fondo, stato socioeconomico, vicinanza residenziale alle industrie, autostrade, strade trafficate, fiume Sacco, Colferro Scalo

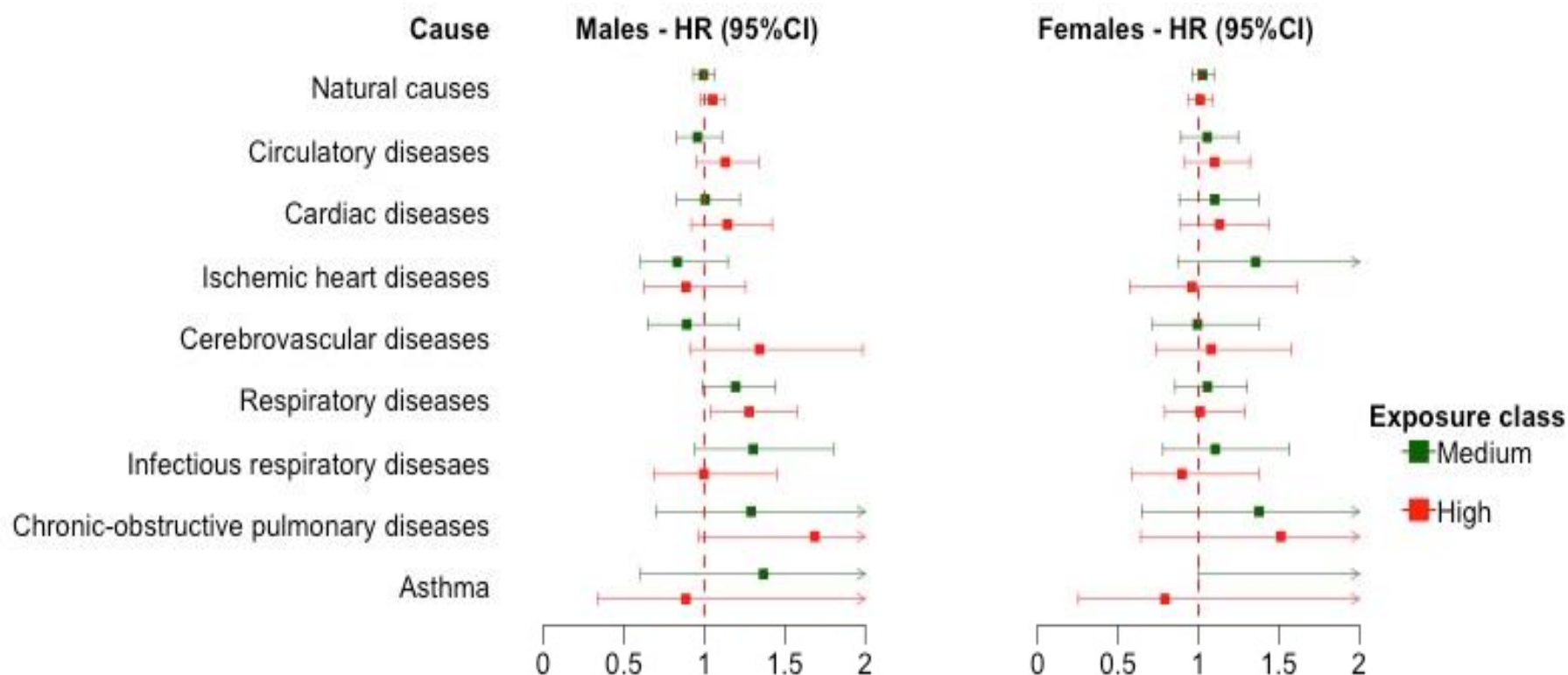
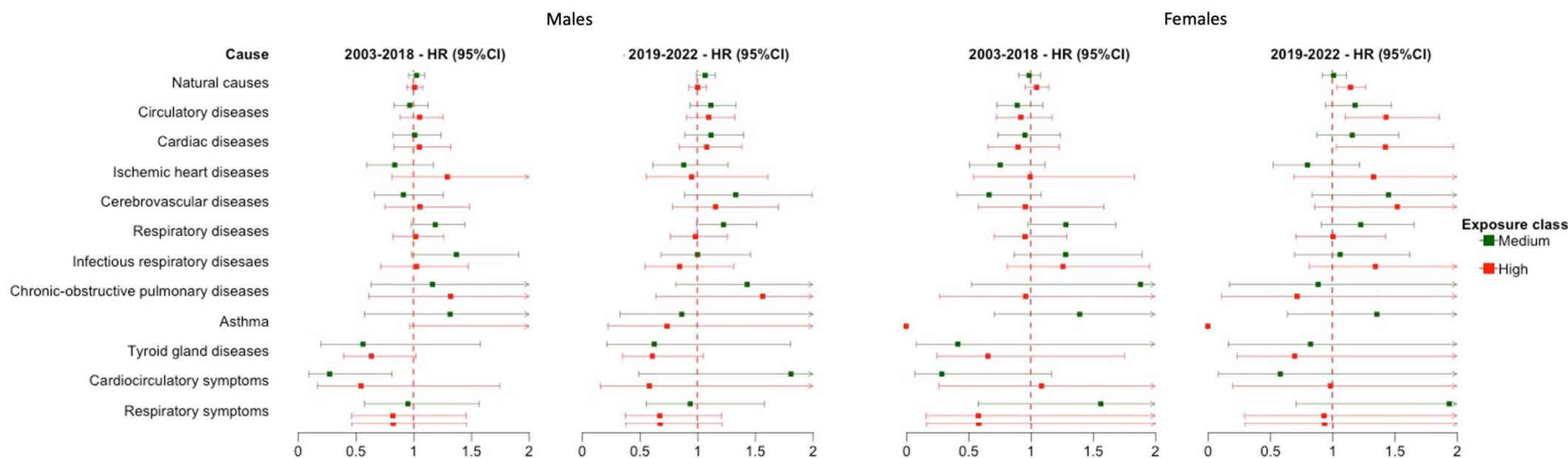


Tabella 5 Effetto della vicinanza residenziale ai termovalorizzatori sul rischio di ospedalizzazione nelle aree a media e alta esposizione, valutato dal 1996 al 2022. I risultati sono espressi come hazard ratio (HR) con intervalli di confidenza del 95% (IC95%). I rischi sono espressi per due archi temporali (2003-2018, durante l'attività dell'impianto, e 2019-2022, dopo la chiusura dell'impianto), considerando come gruppo di riferimento la categoria a bassa esposizione nel periodo 1996-2003. Le stime sono corrette per: età, ubicazione dell'impianto, classe di rischio, background PM₁₀, stato socioeconomico, vicinanza residenziale a industrie, autostrade, strade trafficate, fiume Sacco, Colleferro Scalo e codici ICD-IX COVID-19 nelle diagnosi primarie o secondarie.

Causa	2003-2018			2019-2022	
	Bassa esposizione	Esposizione media	Alta esposizione	Esposizione media	Alta esposizione
	HR (IC 95%)	HR (IC 95%)	HR (IC 95%)	HR (IC 95%)	HR (IC 95%)
Cause naturali	1	1.02 (0.97 - 1.07)	1.03 (0.98 - 1.09)	1.01 (0.95 - 1.08)	1.07 (1 - 1.15)
Malattie circolatorie	1	1 (0.89 - 1.13)	1.11 (0.97 - 1.26)	0.9 (0.77 - 1.06)	1.29 (1.09 - 1.52)
Malattie cardiache	1	1.02 (0.88 - 1.19)	1.1 (0.93 - 1.3)	0.94 (0.76 - 1.14)	1.27 (1.03 - 1.57)
Cardiopatie ischemiche	1	0.96 (0.73 - 1.26)	0.9 (0.67 - 1.22)	0.82 (0.59 - 1.14)	0.94 (0.66 - 1.34)
Malattie cerebrovascolari	1	0.98 (0.78 - 1.24)	1.24 (0.94 - 1.64)	0.8 (0.56 - 1.14)	1.52 (1.02 - 2.26)
Malattie respiratorie	1	1.11 (0.96 - 1.29)	1.1 (0.94 - 1.29)	1.14 (0.93 - 1.4)	1.18 (0.94 - 1.48)
Disassi respiratori infettivi	1	1.22 (0.96 - 1.55)	0.93 (0.7 - 1.23)	1.33 (0.99 - 1.78)	1.26 (0.91 - 1.73)
BPCO	1	1.26 (0.77 - 2.06)	1.43 (0.9 - 2.29)	1.37 (0.55 - 3.39)	0.99 (0.31 - 3.17)
Asma	1	1.71 (0.88 - 3.31)	0.81 (0.38 - 1.72)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)

Figura 8 Effetto della vicinanza residenziale ai termovalorizzatori sul rischio di ospedalizzazione nelle aree a media e alta esposizione, valutato dal 1996 al 2022. I risultati sono espressi come hazard ratio (HR) con intervalli di confidenza del 95% (IC95%). I rischi sono visualizzati per due intervalli temporali (2003-2018, durante l'attività dell'impianto, e 2019-2022, dopo la chiusura dell'impianto), considerando come gruppo di riferimento la categoria a bassa esposizione nel periodo 1996-2003. Le stime sono corrette per: età, ubicazione dell'impianto, classe di rischio, background PM_{10} , stato socioeconomico, vicinanza residenziale a industrie, autostrade, strade trafficate, fiume Sacco, Colleferro Scalo e codici ICD-IX COVID-19 nelle diagnosi primarie o secondarie.



Discussione

Questo studio ha rivelato un aumento dei rischi di ospedalizzazione per malattie respiratorie, in particolare broncopneumopatie croniche ostruttive (BPCO), tra tutti i residenti a seguito dell'attivazione di impianti di termovalorizzazione, con un rischio maggiore nelle zone ad alta concentrazione stimata delle emissioni degli impianti. Inoltre, dal 2019 al 2022 c'è stato un notevole aumento dei ricoveri per disturbi dell'apparato circolatorio, in particolare per malattie cardiache e cerebrovascolari, tra i residenti nelle aree ad alta esposizione, con le donne che mostrano un rischio maggiore di disturbi circolatori.

Rispetto ai risultati del primo studio ERAS (Golini et al., 2014) che copre il periodo 2003-2008, questo aggiornamento al 2018 ha mostrato un aumento dei rischi di BPCO tra tutti i residenti. In particolare, c'è stato un aumento statisticamente significativo dei rischi di malattie respiratorie tra le femmine nelle aree a media esposizione, dove le analisi precedentemente condotte non avevano identificato rischi significativi.

Questi risultati sono in linea con quanto riportato in letteratura. Tait et al. (2019) hanno esaminato gli effetti sulla salute associati all'attività dell'inceneritore, comprese le malattie nel nostro studio. L'associazione dell'esposizione short e long term a particolato sulla salute cardiovascolare presentano risultati contrastanti; alcuni studi (Fukuda et al., 2003; Ranzi et al., 2011) non mostrano tendenze chiare, mentre Galise et al. (2012) hanno associato un aumento dello 0,06% del rischio di ricoveri ospedalieri correlati a malattie cardiache con emissioni di PM10 di 40 µg/m³. Al contrario, Chen et al. (2006) hanno rivelato un'associazione più forte (OR = 5,58; 1,63-19,62) tra i livelli di diossina e l'ipertensione tra i residenti vicino agli inceneritori. Per le malattie respiratorie, Galise et al. (2012) hanno notato un aumento dello 0,12% dei ricoveri ospedalieri legati alle emissioni di PM10, in contrasto con i risultati di Ranzi et al. (2011). Tuttavia, il confronto di questi risultati è difficile a causa dei diversi disegni di studio e valutazioni dell'esposizione. Gli studi esaminati da Tait et al. (2019) hanno in genere impiegato disegni trasversali o ecologici. Minichilli et al. (2016) hanno condotto uno studio di coorte vicino a un inceneritore (Arezzo, Toscana) mostrando un aumento del rischio di morbidità cardiovascolare (HR = 1,18; 1,06-1,32), aggiustando per le covariate. Al contrario, Romanelli et al. (2019) studiando l'inceneritore di Pisa non hanno riscontrato alcun rischio significativo di ospedalizzazione correlato agli NOx emessi in uno studio di coorte retrospettivo.

I nostri risultati sono in linea con i meccanismi biologici proposti che collegano l'esposizione al particolato alle malattie studiate. Grzywa-Celinska et al. (2020) hanno delineato questi meccanismi per quanto riguarda le malattie respiratorie, in cui il particolato danneggia le cellule epiteliali, innescando l'infiammazione e la formazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS). Le risposte infiammatorie coinvolgono la secrezione di citochine, portando a condizioni come la bronchite cronica e una maggiore suscettibilità alle infezioni batteriche. Inoltre, il particolato esacerba l'asma negli individui suscettibili causando irritazione ed eccessiva produzione di muco. Per quanto riguarda le malattie cardiovascolari, Yu et al. (2022) hanno evidenziato i meccanismi patogenetici associati all'esposizione al particolato. Questa esposizione induce la formazione di ROS, innescando lo stress ossidativo e la disfunzione mitocondriale, portando infine a

un'ulteriore produzione di ROS. Questi meccanismi contribuiscono alla disfunzione endoteliale, alla fibrosi vascolare e cardiaca, con conseguenti esiti avversi a livello di popolazione.

Le differenze nei rischi tra individui di sesso maschile e femminile osservate in questo studio potrebbero essere dovute a una suscettibilità sesso-specifica agli inquinanti atmosferici. (Clougherty et al., 2011; Frampton et al., 2006; Zhang et al., 2022). Gli studi sugli animali hanno evidenziato alcuni meccanismi biologici che potrebbero variare tra i sessi dopo l'esposizione al particolato e che potrebbero contribuire alle differenze nel rischio cardiovascolare (Liao et al., 2023).

I residenti possono continuare a sperimentare effetti a lungo termine anche dopo la chiusura di un impianto a causa dell'esposizione cronica agli inquinanti atmosferici. Tale esposizione prolungata potrebbe portare a problemi di salute persistenti legati a malattie respiratorie e cardiovascolari, come evidenziato dagli studi sopra citati. Queste conseguenze durature potrebbero persistere nella popolazione nonostante la cessazione delle emissioni dell'impianto. Questo studio ha diversi punti di forza. In primo luogo, le dimensioni considerevoli della coorte e l'ampio periodo di follow-up di 25 anni, insieme a precisi dati amministrativi sulla popolazione, supportano solide inferenze. In secondo luogo, la geocodifica degli indirizzi residenziali ha consentito valutazioni individuali dell'esposizione, classificando ogni persona in specifici gruppi di esposizione. Inoltre, questo processo ha facilitato l'aggiustamento dei modelli in base a importanti covariate, come la vicinanza residenziale a potenziali fonti di inquinamento come autostrade e impianti industriali. L'uso di modelli di dispersione per l'inquinamento da particolato di fondo ha migliorato significativamente l'accuratezza della stima dell'impatto del particolato emesso dalle strutture studiate. Infine, il disegno dello studio ha incorporato gli stessi individui in diversi periodi di tempo, adattando indirettamente i modelli per i singoli fattori di rischio.

A parte questi punti di forza, questo studio non è esente da limitazioni. Ci siamo concentrati sulle esposizioni croniche, ma disporre di dati che coprono un numero comparabile di anni prima e dopo l'apertura e la chiusura dei termovalorizzatori sarebbe stato ottimale per discernere meglio il loro impatto sulla salute della popolazione vicina. La valutazione dell'esposizione al particolato emesso dai due impianti è stata effettuata all'inizio del periodo di follow-up del 1996 e potrebbe essere cambiata in modo sostanziale nel tempo. Inoltre, potrebbero esistere potenziali periodi di chiusura dello stabilimento di Colleferro senza registrazioni documentate. Il nostro affidarci esclusivamente a fonti amministrative ufficiali per dedurre l'attività dell'impianto potrebbe introdurre delle limitazioni. L'utilizzo dei codici ICD-IX nelle diagnosi di ospedalizzazione potrebbe aver contribuito a un certo grado di errata classificazione degli esiti, in particolare dopo il 2019 per quanto riguarda le malattie respiratorie dovute all'influenza della pandemia di COVID-19. Le informazioni relative ai fattori dello stile di vita individuale, come la dieta o le abitudini di fumo, potrebbero essere servite come preziose covariate per regolare i modelli.

Conclusioni

In questo studio abbiamo fornito evidenze circa l'aumento del rischio di malattie respiratorie a seguito dell'attivazione di due termovalorizzatori nella regione Lazio, Italia nel periodo dal 1996

al 2022. La chiusura di uno dei due impianti potrebbe aver avuto un effetto benefico sulla riduzione del rischio per la popolazione esposta di malattie respiratorie, anche se non sono chiare le evidenze soprattutto per quanto riguarda le malattie cardiocircolatorie che potrebbero essere emerse come effetto dell'esposizione cronica. I risultati sono coerenti con precedenti analisi simili e con i meccanismi biologici che legano il particolato all'insorgenza delle malattie studiate.

Referenze

- ARPA Lazio. Sistema di modellazione della qualità dell'aria. Disponibile all'indirizzo: <http://www.arpalazio.net/main/aria/doc/SM/previsioni.php>
- Cesaroni G, Agabiti N, Rosati R, Forastiere F, Perucci CA. Indice della situazione socioeconomica basato sul censimento del 2001, Roma. *Epidemiol Prev* 2006; 30(6):352-7
- Clougherty, J. E. (2011). Un ruolo crescente per l'analisi di genere nell'epidemiologia dell'inquinamento atmosferico. *Ciência & Saúde Coletiva*, 16(4), 2221-2238. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232011000400021>
- D'Ilio S, Forastiere F, Draicchio A, et al. Biomonitoraggio umano di Cd, Hg e Pb nel sangue degli abitanti della Valle del Sacco (Italia). *Ann Ist Super Sanita*. 2013; 49(1):24-33. DOI:10.4415/ANN_13_01_06
- Domingo JL, Marquès M, Mari M, Schuhmacher M. Effetti negativi sulla salute per le popolazioni che vivono vicino agli inceneritori di rifiuti, con particolare attenzione agli inceneritori di rifiuti pericolosi. Una rassegna della letteratura scientifica. *Environ Res*. 2020;187:109631. doi:10.1016/j.envres.2020.109631
- Dominski FH, Lorenzetti Branco JH, Buonanno G, Stabile L, Gameiro da Silva M, Andrade A. Effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute: una revisione della mappatura di revisioni sistematiche e meta-analisi. *Ambiente Res*. 2021;201:111487. DOI:10.1016/j.envres.2021.111487
- Fantini F, Porta D, Fano V, et al. Indagini epidemiologiche sullo stato di salute della popolazione residente nell'area della Valle del Sacco [Epidemiologic studies on the health status of the population living in the Sacco River Valley]. *Epidemiol Prev*. 2012; 36(5 Suppl 4):44-52.
- Frampton MW, Stewart JC, Oberdörster G, et al. L'inalazione di particelle ultrafini altera l'espressione leucocitaria del sangue delle molecole di adesione negli esseri umani. *Prospettiva ambientale per la salute*. 2006; 114(1):51-58. DOI:10.1289/ehp.7962
- Fukuda Y, Nakamura K, Takano T. Diossine rilasciate dagli impianti di incenerimento e mortalità per le principali malattie: un'analisi dei dati statistici per comuni. *J Med Dent Sci*. 2003; 50(4):249-255.
- Galise I, Serinelli M, Bisceglia L, Assennato G. Valutazione ex-ante dell'impatto sulla salute attribuibile all'inquinamento da inceneritore a Modugno (Bari) [Health impact assessment of pollution from incinerator in Modugno (Bari)]. *Epidemiol Prev*. 2012; 36(1):27-33.
- Gohlke O, Martin J. Driver per l'innovazione nella tecnologia di termovalorizzazione. *Gestione dei rifiuti Res*. 2007; 25(3):214-219. DOI:10.1177/0734242X07079146

- Golini MN, Ancona C, Badaloni C, et al. Stato di salute della popolazione residente nei pressi dei termovalorizzatori del Lazio: uno studio di coorte retrospettivo con approccio pre-post [Morbidity in a population living close to urban waste incinerator plants in Lazio Region (Central Italy): a retrospective cohort study using a before-after design]. *Epidemiol Prev.* 2014; 38(5):323-334.
- Grzywa-Celińska A, Krusiński A, Milanowski J. "Lo smogging uccide" - Effetti dell'inquinamento atmosferico sul sistema respiratorio umano. *Ann Agric Environ Med.* 2020; 27(1):1-5. DOI:10.26444/aaem/110477
- ISPRA, Rapporto sui Rifiuti da Attività Economiche – 2022
- Liao M, Braunstein Z, Rao X. Differenze di sesso nelle malattie cardiovascolari legate all'inquinamento atmosferico da particolato: una revisione delle prove umane e animali. *Sci Ambiente Totale.* 2023;884:163803. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163803
- Lombardi L, Carnevale E, Corti A. Una rassegna delle tecnologie e delle prestazioni dei sistemi di trattamento termico per il recupero energetico dai rifiuti. *Gestione dei rifiuti* 2015;37:26-44. doi:10.1016/j.wasman.2014.11.010
- Minichilli F, Santoro M, Linzalone N, Maurello MT, Sallese D, Bianchi F. Studio epidemiologico di coorte residenziale su mortalità e ricoveri ospedalieri nell'area intorno all'inceneritore di San Zeno, Arezzo [Epidemiological population-based cohort study on mortality and hospitalization in the area near the waste incinerator plant of San Zeno, Arezzo (Tuscany Region, Central Italy)]. *Epidemiol Prev.* 2016; 40(1):33-43. doi:10.19191/EP16.1.P033.012
- Comitato del Consiglio Nazionale delle Ricerche (USA) sugli effetti sulla salute dell'incenerimento dei rifiuti. *Incenerimento dei rifiuti e salute pubblica.* Washington (DC): National Academies Press (Stati Uniti); 2000.
- Porta D, Fantini F, De Felip E, et al. Uno studio di biomonitoraggio sui livelli ematici di beta-esaclorocicloesano tra le persone che vivono vicino a un'area industriale. *Ambiente Salute.* 2013;12:57. Pubblicato il 16 luglio 2013. DOI:10.1186/1476-069X-12-57
- Ranzi A, Fano V, Erspamer L, Lauriola P, Perucci CA, Forastiere F. Mortalità e morbilità tra le persone che vivono vicino agli inceneritori: uno studio di coorte basato su modelli di dispersione per la valutazione dell'esposizione. *Salute dell'ambiente.* 2011;10:22. Pubblicato il 24 marzo 2011. DOI:10.1186/1476-069X-10-22
- Romanelli AM, Bianchi F, Curzio O, Minichilli F. Mortalità e morbilità in una popolazione esposta all'emissione di un inceneritore di rifiuti urbani. Uno studio di coorte retrospettivo. *Int J Environ Res Salute pubblica.* 2019; 16(16):2863. Pubblicato il 10 ago 2019. DOI:10.3390/ijerph16162863
- Stafoggia M, Bellander T, Bucci S, et al. Stima delle concentrazioni giornaliere di PM10 e PM2.5 in Italia, 2013-2015, utilizzando un modello di foresta casuale spazio-temporale di uso del suolo. *Ambiente Int.* 2019;124:170-179. DOI:10.1016/j.envint.2019.01.016
- Tait PW, Brew J, Che A, et al. Gli impatti sulla salute dell'incenerimento dei rifiuti: una revisione sistematica. *Aust N Z J Salute pubblica.* 2020; 44(1):40-48. DOI:10.1111/1753-6405.12939

- Tomczak S, Baumann K, Lehnert G. Esposizione professionale all'esaclorocicloesano. IV. Alterazioni degli ormoni sessuali nei lavoratori esposti a HCH. *Int Arch occupa la salute dell'ambiente*. 1981; 48(3):283-287. DOI:10.1007/BF00405615
- Organizzazione Mondiale della Sanità, The Global Health Observatory <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-deaths> (consultato il 09/12/2023).
- Yu Y, Sun Q, Li T, et al. Percorso di esito avverso del particolato fine che porta ad un aumento della morbidità e della mortalità cardiovascolare: una prospettiva integrata dalla tossicologia e dall'epidemiologia. *J Hazard Mater*. 2022;430:128368. DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.128368
- Zhang J, Wang X, Yan M, et al. Differenze di sesso nel rischio cardiovascolare associato all'esposizione a lungo termine al PM2.5: una revisione sistematica e una meta-analisi degli studi di coorte. *Fronte Salute Pubblica*. 2022;10:802167. Pubblicato il 2 febbraio 2022. DOI:10.3389/fpubh.2022.802167