

Analisi dell'interazione tra isola urbana di calore e isola di inquinamento urbano sull'area metropolitana di Roma (Italia) attraverso misure in-situ di variabili meteorologiche e di qualità dell'aria.

Margherita Cecilia Erriu^{a*}

^aUniversità di Roma La Sapienza, Dipartimento di Fisica, Roma, Italia

*margherita.erriu@uniroma1.it

INFORMAZIONI ARTICOLO

Isola urbana di calore
Isola urbana di inquinamento
Particolato atmosferico
Inquinamento atmosferico

ABSTRACT

In questo lavoro, sono state analizzate misure in situ di inquinanti atmosferici, specificatamente particolato atmosferico (PM_{10} e $PM_{2.5}$), ottenute da 16 stazioni della rete ARPA Lazio localizzate nell'area metropolitana di Roma (Italia). L'obiettivo è studiare le caratteristiche dell'isola urbana di calore (UHI) e dell'isola urbana di inquinamento (UPI), con particolare focus su quest'ultima, valutando interconnessioni tra i due fenomeni. A tal fine, sono state analizzate le misure raccolte nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto) degli anni 2019 e 2020. Il metodo utilizzato per valutare l'intensità dell'isola urbana di calore (UHII) e dell'isola urbana di inquinamento (UPII) è stato il medesimo, ipotizzando l'esistenza di una relazione lineare tra imperviousness (IMP) e temperatura (per UHI) o concentrazione del particolato atmosferico (per UPI). L'imperviousness è una grandezza che misura il grado di impermeabilità delle superfici e, di conseguenza, può essere assunta come proxy del grado di urbanizzazione e, qui, i valori relativi alle singole stazioni sono derivati da dati satellitari. Valutando la differenza di temperatura o concentrazione tra stazioni con $IMP=100\%$ e stazioni con $IMP=0\%$ si ottiene, rispettivamente, l'intensità dell'UHI e dell'UPI. I risultati preliminari, presentati in questo lavoro, mostrano che sebbene l'IMP possa essere utilizzata per il calcolo dell'intensità di UHI, essa non mostra correlazioni statisticamente significative con le concentrazioni medie giornaliere di PM_{10} e $PM_{2.5}$. Di conseguenza, prima di investigare le correlazioni tra UHI e UPI, è necessario analizzare più dettagliatamente i fenomeni fisici che determinano l'UPI e individuare grandezze che permettano di valutare correttamente l'intensità di UPI.

1. Introduzione

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più importanti e complesse del nostro tempo, con impatti significativi sugli ecosistemi e sulla vita umana. Nel corso degli ultimi decenni, il dibattito scientifico e politico sul cambiamento climatico si è intensificato, poiché sempre più evidenze indicano un'accelerazione dei fenomeni climatici estremi e dei cambiamenti a medio-lungo termine nelle condizioni atmosferiche e ambientali globali (WMO-No. 1338 report). L'impatto dei cambiamenti climatici è particolarmente significativo sulle temperature nelle aree urbane, dove si registrano tipicamente valori termici più elevati rispetto alle aree circostanti rurali e dove vive la maggioranza della popolazione mondiale. Il fenomeno per cui nelle città si viene a creare un microclima più caldo rispetto alle zone periferiche prende il nome di "isola urbana di calore" (Urban Heat Island, UHI) (Rizwan et al., 2008, Chakraborty et al., 2017).

Ci sono alcuni fattori che contribuiscono alla formazione dell'UHI, ad esempio la riduzione delle aree verdi, utili per la creazione di zone ombreggiate meno esposte alla radiazione solare ed in grado di dissipare parte del calore ambientale grazie all'evapotraspirazione, oppure l'utilizzo di superfici all'interno dell'ambiente urbano, tipicamente impermeabili, con proprietà termiche differenti rispetto alle aree naturali, come ad esempio l'asfalto o il cemento, o ancora la presenza di una geometria urbana tale da limitare la ventilazione in prossimità del suolo. Questi fattori uniti alla presenza di sorgenti di calore antropico come trasporti, riscaldamento e raffreddamento degli edifici e processi industriali possono portare alla formazione dell'UHI. L'intensità dell'UHI, definita come Urban Heat Island Intensity (UHII), viene tipicamente calcolata come differenza di temperatura tra un'area urbana rappresentativa e l'area rurale circostante, assunta come non influenzata dall'antropizzazione, sebbene non sia disponibile una procedura scientifica standardizzata. Nelle aree urbane colpite dal fenomeno dell'isola urbana di calore le temperature possono essere anche 1/12 °C superiori rispetto a quelle delle zone rurali limitrofe (Santamouris, 2015; Santamouris e Kolokotsa, 2016).

C'è tuttavia un altro fenomeno peculiare che si verifica nelle aree urbane, ovvero la cosiddetta "isola urbana di inquinamento" (Urban Pollution Island, UPI). Questa si viene a formare a causa dell'accumulo di inquinanti nelle aree urbane ed è una manifestazione diretta delle attività antropogeniche, come ad esempio del traffico veicolare, della presenza di industrie e del riscaldamento domestico (Ulpiani, 2021). Il termine isola urbana di inquinamento è stato introdotto solo di recente (Crutzen, 2004; Li et al., 2018) per identificare le variazioni spaziali e temporali nella concentrazione di inquinanti attribuibili alla presenza di caratteristiche tipiche delle attività umane. In analogia con l'UHII, è proprio la differenza tra le concentrazioni di inquinanti nelle aree urbane e nelle aree suburbane o rurali che definisce l'intensità dell'UPI (Urban Pollution Island Intensity, UPII). Anche in questo caso, la procedura per la determinazione dell'UPII è ancora dibattuta e non si ha a disposizione una metodologia riconosciuta dalla comunità scientifica internazionale.

Sia l'isola urbana di calore che l'isola urbana di inquinamento sono manifestazioni degli intensi cambiamenti negli insediamenti umani, uso dell'energia, trasporti, industria e della pressione sulle risorse naturali causate dalla rapida urbanizzazione, dalla crescita della popolazione e dall'espansione nei territori in precedenza non edificati (Imhoff et al., 2010; Izrael et al., 1990). L'UHI e l'UPI sono fenomeni interconnessi e spesso compresenti (Crutzen, 2004). Questo perché le alte temperature accelerano alcuni cicli chimici in atmosfera, la maggior parte dei quali portano a una maggiore produzione di ozono a livello del suolo, ovvero ozono troposferico, ad una maggiore emissione di idrocarburi biogenici e una maggiore evaporazione di composti organici volatili sintetici emessi dai motori dei veicoli (Elsayed, 2012; Bretz et al., 2018). Inoltre, UHI e UPI sono entrambi strettamente legati ai processi di combustione dei settori dei trasporti, dell'industria e di altri processi antropogenici come, ad esempio, il condizionamento dell'aria che sono contemporaneamente fonti di inquinanti e di calore. Banalmente in un'isola di calore gli impianti di condizionamento dell'aria sono accesi per più ore durante la giornata e per più giorni durante l'anno. Questo non solo aumenta direttamente l'emissione di anidride carbonica e dei precursori dell'ozono (Rosenfeld et al., 1998) ma riversa anche calore di scarico nell'aria urbana, alimentando e amplificando l'UHI. Tutto ciò significa che non solo la presenza di un'isola urbana di calore è propizia allo sviluppo di un'isola urbana di inquinamento, creando una sorta di cupola di inquinanti sopra il paesaggio cittadino, ma serve anche al suo auto-mantenimento, consolidando un modello di ricircolo che prolunga e aggrava gli episodi di inquinamento atmosferico. Tuttavia, non bisogna trascurare il fatto che l'aria più calda stimola i moti turbolenti, favorendo quindi la dispersione dei contaminanti primari verso strati atmosferici più alti (Sarrat et al., 2006), mentre la riduzione della temperatura nelle aree urbane potrebbe diminuire la velocità del mescolamento turbolento, riducendo l'altezza dello strato di rimescolamento (Fallman et al., 2006) e portando quindi concentrazioni più elevate di particolato vicino alla superficie (Fallman, 2014). Anche la presenza o meno di un'isola urbana di inquinamento provoca degli effetti sull'UHI, infatti un maggior numero di aerosol correlati alla presenza di un'UPI può portare ad una maggiore diffusione della radiazione solare nello spazio, riducendo di conseguenza quella che raggiunge la superficie urbana (Jin et al., 2010; Wang et al., 2015). D'altra parte, però, gli aerosol in aumento possono intrappolare più radiazione infrarossa emessa dalla terra e riemettere più radiazione ad onda lunga verso la superficie terrestre (Lubin e Simpson, 1994; Cao et al., 2016). Quindi la presenza di un'isola urbana di calore da un lato favorisce la presenza di un'isola urbana di inquinamento, ma d'altra parte dà luogo a meccanismi di riduzione

dell'UPI. Allo stesso tempo la presenza di un'isola urbana di inquinamento genera dei meccanismi fisici in grado sia di acuire che di ridurre l'UHI.

Quindi, sebbene i fenomeni dell'UHI e dell'UPI siano molto studiati nell'ambito della climatologia urbana e sembrino correlati, la loro interazione è ancora poco esplorata e i processi fisici che guidano la loro interazione sono ancora poco chiari (Czarnecka e Nidzgorska-Lencewicz, 2014). Malgrado ci si aspetti una coincidenza sostanziale tra UHI e UPI (Jun Li et al., 2007), questi coesistono in un modello intricato di feedback a scala regionale e locale, sia a livello verticale che orizzontale (Oke, 1982).

Questo lavoro, inserendosi all'interno in un ampio gap scientifico, ha come obiettivo l'analisi delle caratteristiche dell'UHI e dell'UPI sull'area metropolitana di Roma (Italia), utilizzando misure in situ di variabili meteorologiche, utilizzate per calcolare la relativa UHI e UHII, e di qualità dell'aria per ricavare l'UPI e l'UPII relative alle concentrazioni degli aerosol (PM_{10} e $PM_{2,5}$). Il particolato atmosferico (Particulate Matter, PM) è una miscela di particelle solide e liquide in sospensione nell'aria. Può formarsi sia a seguito di fenomeni naturali, come processi di erosione del suolo, incendi boschivi o dispersione di pollini, sia da attività antropiche, in particolare dai processi di combustione e dal traffico veicolare. Queste particelle possono avere differenti dimensioni e vengono classificate in base al loro diametro aerodinamico: quelle con diametro inferiore o uguale a $10 \mu m$ sono definite PM_{10} , mentre quelle con diametro inferiore o uguale a $2.5 \mu m$ sono definite $PM_{2,5}$.

Il lavoro è strutturato come segue: nella Sezione 2, viene presentato il sito di interesse, i dataset delle variabili meteorologiche e di qualità dell'aria e la tecnica utilizzata per il calcolo sia dell'UHII che dell'UPII relativa al particolato. Nella Sezione 3 sono presentati i risultati ottenuti e, in Sezione 4, sono riportate le conclusioni dello studio e possibili sviluppi futuri.

2. Metodologia

2.1 Area di studio

Come anticipato, il focus dello studio è l'analisi dei fenomeni dell'isola urbana di calore e dell'isola urbana di inquinamento nella città metropolitana di Roma. Roma è la città più popolosa in Italia, con circa 2,8 milioni di abitanti, nonché quella con la superficie più vasta in Italia e in Unione Europea, con un'estensione di circa 1287 km^2 . Ci concentreremo inoltre sull'area racchiusa dall'autostrada A90, ossia il Grande Raccordo Anulare.

L'analisi dell'UHI è ripresa da un recente studio effettuato da Cecilia et al. (2023), in cui sono stati analizzati i dati di temperatura di 17 stazioni meteorologiche, posizionate sui tetti di edifici urbani, della rete del progetto LIFE-ASTI (<https://lifeasti.eu/it/home-it/>), appositamente progettata per indagare il fenomeno dell'UHI su Roma e i suoi dintorni con un'alta risoluzione spaziale e temporale. Una particolarità di questa rete è che essa consente di investigare la temperatura dell'aria con misurazioni comparabili tra le diverse aree della città perché non influenzate da differenti esposizioni e/o fenomeni isolati che possono verificarsi all'interno del canyon urbano. Le stazioni sono state selezionate tra tutte quelle afferenti alla rete del progetto in modo da coprire il più omogeneamente possibile l'area di Roma racchiusa all'interno del Grande Raccordo Anulare.

L'analisi dell'UPI si focalizza sulle concentrazioni medie giornaliere di particolato atmosferico, ovvero di PM_{10} e $PM_{2,5}$, misurate da 16 stazioni della rete dell'ARPA-Lazio (<https://www.arpalazio.it/>), l'ente preposto nella regione Lazio per il monitoraggio dello stato dell'ambiente e per il controllo sulle fonti di pressione ambientale determinate da attività umane che producono impatti diretti sull'ambiente.

In *Figura 1* è riportata la mappa dell'area metropolitana di Roma con la posizione delle stazioni meteorologiche (con i segnaposto di colore rosa) e di quelle di qualità dell'aria (con i segnaposto di colore viola).

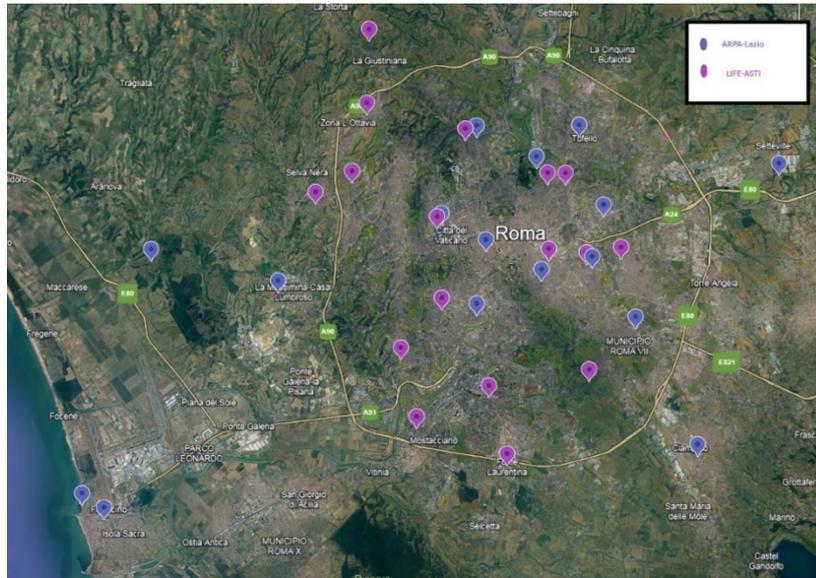


Figura 1. Localizzazione delle 17 stazioni meteorologiche della rete LIFE-ASTI e delle 16 stazioni di qualità dell'aria della rete ARPA-Lazio.

2.2 Calcolo dell'UHII e dell'UPII

Analogamente a quanto fatto da Cecilia et al. (2023) per il calcolo dell'intensità dell'UHI, il metodo proposto nel 2015 da Schatz e Kucharik (2015) è stato qui implementato in modo innovativo e originale per il calcolo dell'UPII.

Questo metodo si basa sull'utilizzo del prodotto satellitare dell'imperviousness (IMP), una grandezza che quantifica la presenza di superficie urbanizzata e artificialmente impermeabilizzata come percentuale per ciascun pixel calcolata su un'area circolare di raggio 1400 m centrata su ogni stazione. In tal modo, ad ogni stazione viene associata una percentuale di IMP. I dati satellitari utilizzati sono quelli relativi alla densità di imperviousness del 2015 liberamente accessibili sul portale web Copernicus Land Monitoring Service, con una risoluzione spaziale di 20 m. Anche per il calcolo dell'IMP relativa all'UPI, è stato utilizzato un raggio di 1400 m per la determinazione del valore caratteristico di IMP.

In analogia con Cecilia et al. (2023), si ipotizza una relazione lineare tra la concentrazione di particolato atmosferico (PM_{10} e $PM_{2.5}$) e IMP, ovvero:

$$C(IMP) = aIMP + b \quad (1)$$

L'intensità dell'UPI, ossia ΔC o UPII, è quindi definita come la differenza di concentrazione dell'inquinante in oggetto tra le aree con $IMP=100\%$, ovvero zone altamente urbanizzate, e aree con $IMP=0\%$, ovvero zone puramente rurali:

$$\Delta C = C(100) - C(0) = 100a \quad (2)$$

Il valore della pendenza a verrà calcolato utilizzando una regressione lineare tra la concentrazione dell'inquinante e l'imperviousness.

In sostanza si otterrà un dataset giornaliero proveniente da 16 stazioni, con i relativi valori di IMP associati, verrà eseguito un fit lineare per ogni giorno in modo da calcolare le serie temporali dell'intensità dell'UPI. L'accordo tra queste stime e la teoria verrà quantificato dal coefficiente di determinazione R^2 .

2.3 Dataset temperatura

Le informazioni relative alle stazioni meteorologiche sono riportate in *Tabella 1* e sono estratte da Cecilia et al. (2023).

Tabella 1. Metadata delle stazioni meteorologiche: la latitudine e la longitudine sono espresse in gradi, l'altitudine è espressa in metri sopra il livello del mare, l'imperviousness è in percentuale

Rete	ID	Latitudine	Longitudine	Altitudine	Imperviousness
LIFE-ASTI	LA-01	41.833061	12.539493	83	23.9380531
LIFE-ASTI	LA-05	41.843329	12.422196	60	65.20058997
LIFE-ASTI	LA-06	41.946015	12.462507	45	63.8259587
Meteo Lazio	ML-01	41.825492	12.477101	24	80.10089021
Meteo Lazio	ML-02	41.8111	12.432	64	69.32496307
Meteo Lazio	ML-03	41.79358	12.488335	50	54.01176471
Meteo Lazio	ML-06	41.866641	12.447706	80	87.96460177
Meteo Lazio	ML-08	41.904748	12.444863	55	81.82422452
Meteo Lazio	ML-09	41.92612	12.39171	90	61.97777778
Meteo Lazio	ML-10	41.916254	12.368974	95	61.71428571
Meteo Lazio	ML-11	41.958	12.401	135	46.36363636
Meteo Lazio	ML-12	41.925333	12.513914	65	80.0840708
Meteo Lazio	ML-13	41.925153	12.525073	42	83.91163476
Meteo Lazio	ML-15	41.889593	12.514564	51	98.07342144
Meteo Lazio	ML-17	41.887824	12.538132	60	90.875
Meteo Lazio	ML-18	41.890364	12.559702	57	85.10339734
Meteo Lazio	ML-20	41.992493	12.402409	150	25.27393225

Tre di queste stazioni fanno parte della rete LIFE-ASTI mentre 14 sono della rete amatoriale Meteo Lazio. Per queste stazioni i valori dell'imperviousness sono compresi tra il 23.93% della stazione dell'Appia Antica (LA-01), e il 98.07% della stazione del Pigneto (ML-17), la zona con il maggior grado di urbanizzazione.

2.4 Dataset qualità dell'aria

Di seguito, nella *Tabella 2*, invece sono riportate le informazioni relative alle stazioni di qualità dell'aria utilizzate nello studio. Analogamente a quanto fatto per le stazioni meteorologiche.

Tabella 2. Metadata delle stazioni di qualità dell'aria: la latitudine e la longitudine sono espresse in gradi, l'altitudine è espressa in metri sopra il livello del mare, l'imperviousness è in percentuale

Rete	ID	Latitudine	Longitudine	Altitudine	Imperviousness
ARPA Lazio	ARPA-02	41.88601	12.54161	37	56.1159702
ARPA Lazio	ARPA-03	41.94744	12.46956	43	29.60591356
ARPA Lazio	ARPA-05	41.88307	12.50894	49	63.03226015
ARPA Lazio	ARPA-08	41.85771	12.56865	53	43.56598393
ARPA Lazio	ARPA-39	41.93289	12.50694	50	35.52750243
ARPA Lazio	ARPA-40	41.88944	12.26632	61	0.228815755
ARPA Lazio	ARPA-41	41.92947	12.65847	48	26.35535101
ARPA Lazio	ARPA-45	41.79788	12.60702	134	46.35220574
ARPA Lazio	ARPA-47	41.86399	12.46956	26	56.90466939
ARPA Lazio	ARPA-48	41.94765	12.53366	41	48.31685029
ARPA Lazio	ARPA-49	41.90635	12.44758	31	58.12343841
ARPA Lazio	ARPA-55	41.91026	12.54885	32	46.37314593
ARPA Lazio	ARPA-56	41.89397	12.47538	31	62.40967679
ARPA Lazio	ARPA-57	41.87478	12.34558	55	20.85187103
ARPA Lazio	ARPA-86	41.77484	12.2234	3	44.38029396
ARPA Lazio	ARPA-87	41.76823	12.23704	2	51.10136364

In questo caso, come possiamo notare, i valori di imperviousness sono compresi tra lo 0.22% della stazione di Castel di Guido (ARPA-40) e il 63.03% della stazione di Largo Magna Grecia (ARPA-05).

Per quanto riguarda le stazioni di qualità dell'aria della rete ARPA-Lazio da noi utilizzate, bisogna specificare che non tutte offrono misurazioni sia di PM_{10} che di $PM_{2.5}$. Infatti mentre il PM_{10} è misurato con una discreta continuità in tutte le 16 stazioni che compongono il nostro dataset, il $PM_{2.5}$ è misurato solamente nella stazione di Corso Francia (ARPA-03), di Cinecittà (ARPA-08), di Villa Ada (ARPA-39), di Castel Di Guido (ARPA-40), di Tenuta Del Cavaliere (ARPA-41), di Cipro (ARPA-49), di Arenula (ARPA-56), di Malagrotta (ARPA-57) e di Fiumicino (ARPA-87).

3. Risultati

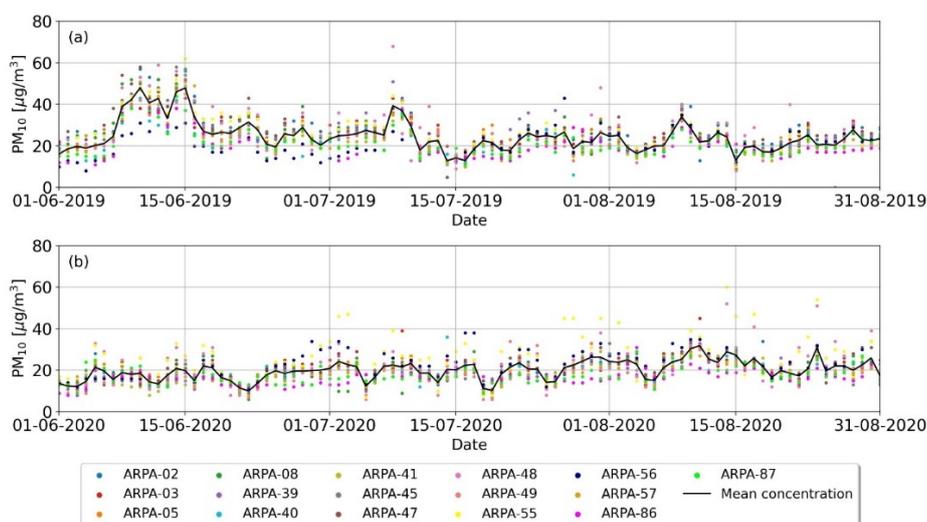


Figura 2. Serie temporale della concentrazione del PM_{10} nell'estate 2019 (a) e nell'estate 2020 (b).

Nella *Figura 2* possiamo osservare la serie temporale della concentrazione del PM_{10} nelle 16 stazioni che compongono il nostro dataset (ognuna indicata con un colore differente), mentre la linea nera è la concentrazione media giornaliera calcolata considerando tutte le stazioni che forniscono le misure. Viene graficato l'intervallo di nostro interesse, ovvero i mesi di giugno, luglio e agosto, 2019 (*Figura 2a*) e 2020 (*Figura 2b*).

Possiamo notare che la concentrazione media di PM_{10} rimane praticamente sempre al di sotto dei 40 $\mu g/m^3$, tranne tra l'8 e il 15 giugno del 2019, quando per quasi un'intera settimana si è mantenuta al di sopra di questo valore. Si sono ricercati i motivi di questa anomalia e si è trovato un report dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna (ARPAE) dell'11 giugno 2019 in cui veniva segnalato il trasporto di polvere proveniente dal deserto del Sahara che aveva fatto salire i livelli del PM_{10} al di sopra del limite di 50 $\mu g/m^3$ in due stazioni della loro rete di monitoraggio, con picco di concentrazione il giorno 9 giugno 2019. Questo report è coerente con i valori anomali registrati nella città di Roma nel medesimo periodo, supponendo che lo stesso fenomeno avvertito abbia interessato anche l'area in esame.

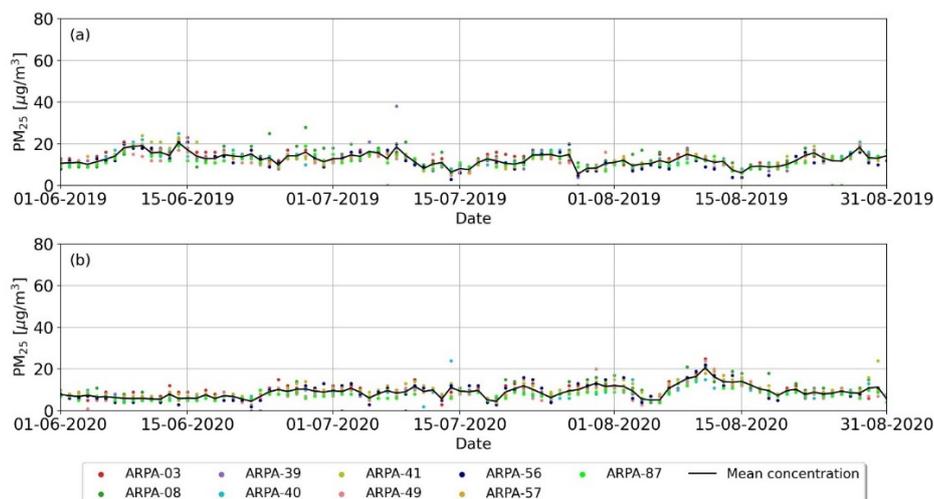


Figura 3. Serie temporale della concentrazione del PM_{2,5} nell'estate 2019 (a) e nell'estate 2020 (b).

Analogamente, la *Figura 3* riporta la serie temporale della concentrazione del PM_{2,5} nelle 9 stazioni che misurano questa grandezza. Come atteso, la concentrazione del PM_{2,5} è notevolmente inferiore rispetto a quella del PM₁₀ e la sua media si mantiene tipicamente al di sotto dei 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Seppur meno accentuata anche nella serie temporale del PM_{2,5} si nota una lieve anomalia nell'intervallo temporale che va dall'8 al 15 giugno, soprattutto se raffrontata al medesimo periodo dell'anno successivo. Le particelle di polvere sahariana hanno diametri tipicamente compresi tra i 3 μm e i 10 μm , per questo motivo il segnale dovuto al trasporto di questi aerosol è molto più marcato nella serie temporale del PM₁₀ rispetto a quella del PM_{2,5}.

In *Figura 4*, è riportato l'andamento dell'intensità dell'isola urbana di inquinamento per il PM₁₀. In generale, la concentrazione del particolato risulta essere maggiore nelle aree urbane, come atteso, a parte in alcuni intervalli temporali, come ad esempio tra la fine di giugno e l'inizio di luglio 2019, quando possiamo vedere valori di UPII intorno o al di sotto dello zero per alcuni giorni consecutivi.

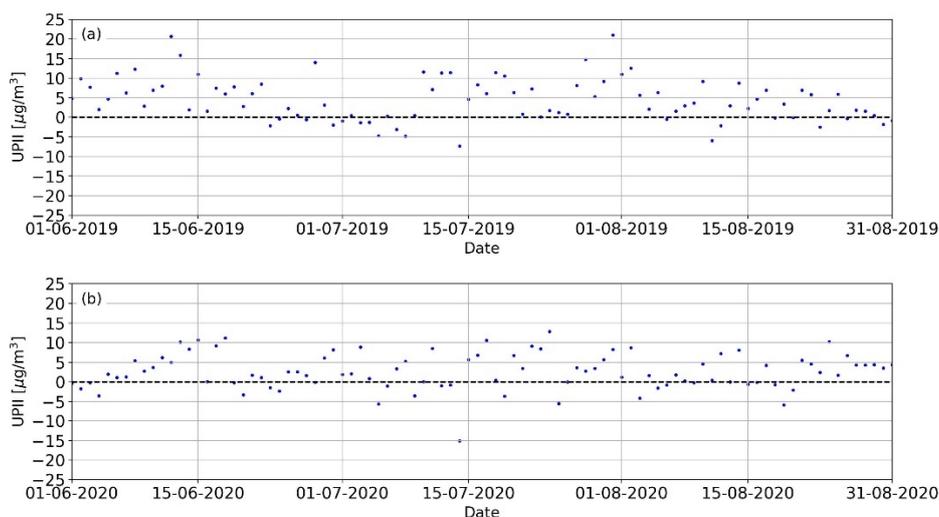


Figura 4. Serie temporale dell'intensità dell'isola di inquinamento urbano relativa al PM₁₀ nell'estate 2019 (a) e nell'estate 2020 (b).

Ovviamente possiamo notare che l'anomalia vista nella *Figura 2* non è presente nella *Figura 4*, questo perché nel caso di trasporto di polvere sahariana i livelli di concentrazione del PM_{10} vengono uniformemente aumentati sia nelle zone urbane che in quelle rurali.

La stessa analisi, mostrata in *Figura 5*, è stata effettuata anche per il $PM_{2,5}$ ed in questo caso la situazione è quasi diametralmente opposta. L'intensità dell'isola urbana di inquinamento assume frequentemente valori negativi, indicando che la concentrazione di $PM_{2,5}$ solitamente è maggiore nelle zone rurali piuttosto che in quelle urbane. Questa affermazione è vera soprattutto nei mesi di giugno 2019, agosto 2019 e giugno 2020, non lo è nel mese di luglio 2019, luglio 2020 e agosto 2020. Al fine di valutare la ripetizione inter-annuale di questo fenomeno, sarebbe utile estendere l'analisi anche ad altri anni. Poiché la stazione di Castel Di Guido si trova in una zona altamente sfruttata dal punto di vista agricolo e dell'allevamento, la concentrazione di $PM_{2,5}$ elevata riscontrata in questa zona potrebbe essere legata ad una certa stagionalità delle coltivazioni o delle pratiche di allevamento intensivo.

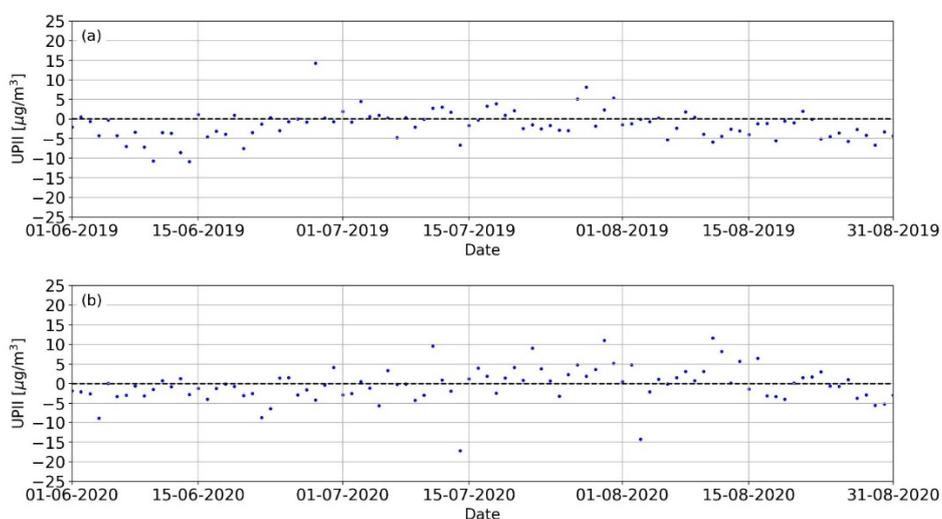


Figura 5. Serie temporale dell'intensità dell'isola di inquinamento urbano relativa al $PM_{2,5}$ nell'estate 2019 (a) e nell'estate 2020 (b).

Infine, le Figure 6a e 6b mostrano lo scatter plot della concentrazione media di entrambi i particolati nelle varie stazioni in funzione dei relativi valori di imperviousness.

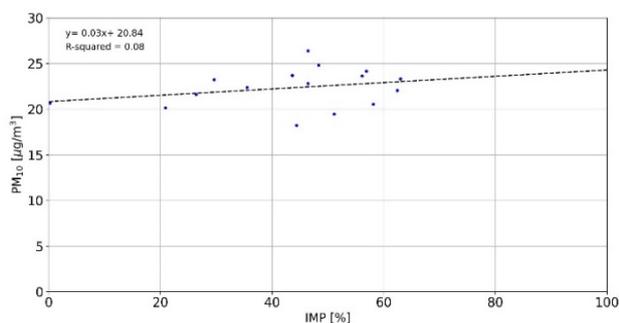


Figura 6a. Scatter plot tra la concentrazione di PM_{10} e il valore dell'imperviousness.

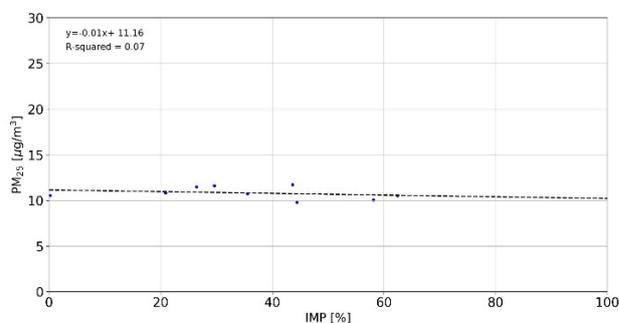


Figura 6b. Scatter plot tra la concentrazione di $PM_{2,5}$ e il valore dell'imperviousness.

Il coefficiente di determinazione R^2 è molto basso in entrambi i casi. Possiamo però notare che in alcuni casi il fit passa quasi esattamente sui valori medi di concentrazione. Per quanto riguarda il PM_{10} questa quasi perfetta sovrapposizione si ha, in ordine per valori di imperviousness crescenti, per la stazione rurale di Castel Di Guido (ARPA-40), per quella di Tenuta Del Cavaliere (ARPA-41), per quella di Villa Ada (ARPA-39), per quella di Ciampino (ARPA-45) e per quella di Largo Magna Grecia (ARPA-05), quella con valore di imperviousness maggiore. Di queste 5 stazioni 3 si trovano al di fuori del Grande Raccordo Anulare (ARPA-40-41-45) e una si trova all'interno del parco di Villa Ada. L'ARPA Lazio fornisce una propria classificazione per quanto riguarda le sue stazioni dislocate nel territorio regionale, andando ad osservare questo tipo di classificazione possiamo notare che quasi tutte appartengono a classificazioni differenti: Castel Di Guido è una stazione di rural background, Tenuta Del Cavaliere di sub-urban background, Villa Ada di urban background, Ciampino e Largo Magna Grecia di urban traffic. Andando a ricercare analogie tra queste stazioni notiamo che tutte si trovano a quote oltre i 49 m sul livello del mare. Per quanto riguarda invece le stazioni più distanti dalla linea del fit, si può osservare che le stazioni di Bufalotta (ARPA-48), ad un'altitudine di 41 metri, e Preneste (ARPA-02), ad un'altitudine di 37 metri, si tengono al di sopra. Entrambe sono nella zona nord-est della città e sono classificate come urban background. Quelle più distanti ma al di sotto del fit sono invece le due stazioni di Fiumicino, quella cittadina (ARPA-87) classificata come urban background e posta ad una quota di 2 metri, e quella del porto (ARPA-86), per la quale ARPA Lazio non fornisce classificazione ambientale essendo una stazione portuale ed è posta ad una quota di 2 metri.

Anche nel caso del $PM_{2,5}$ in tre stazioni abbiamo una quasi perfetta sovrapposizione, queste sono Malagrotta (ARPA-57), Villa Ada (ARPA-39) e Arenula (ARPA-56), quest'ultima è quella con valore di imperviousness maggiore tra quelle che offrono anche la misura di $PM_{2,5}$. In questo caso abbiamo solo una stazione al di fuori del Grande Raccordo Anulare, ovvero quella di Malagrotta, che l'ARPA-Lazio classifica come sub-urban background. Le altre due stazioni invece sono classificate come urban background. In questo caso le altitudini delle stazioni sono tutte molto differenti. Il punto più distante al di sopra del fit è quello relativo alla stazione di Cinecittà (ARPA-08), classificata come urban background, mentre il più lontano al di sotto è quello relativo alla stazione di Fiumicino (ARPA-87). Importante sottolineare che per entrambi i particolari il fit approssima molto bene le misure nella stazione di Villa Ada.

4. Conclusioni

In questo lavoro si è effettuata una valutazione delle condizioni di qualità dell'aria nell'area metropolitana di Roma (Italia), analizzando le concentrazioni del particolato atmosferico, PM_{10} e $PM_{2,5}$, misurate rispettivamente da 16 e da 9 stazioni della rete di monitoraggio gestita da ARPA Lazio dislocate sia all'interno che all'esterno del Grande Raccordo Anulare. I dati analizzati sono stati quelli relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto del 2019 e del 2020 e tramite questi si sono studiate le principali caratteristiche dell'UPI per ricercare eventuali interconnessioni tra questo fenomeno e l'UHI. L'intensità dell'isola urbana di inquinamento (UPII) è stata valutata ipotizzando l'esistenza di una relazione lineare tra imperviousness (IMP), una grandezza utilizzabile per quantificare il grado di urbanizzazione, e concentrazione del particolato atmosferico. L'UPII è stata quindi valutata tramite la differenza di concentrazione del particolato atmosferico tra stazioni con $IMP=100\%$ e stazioni con $IMP=0\%$. Nel nostro caso le stazioni avevano una percentuale di IMP compresa tra 0% e 63%. Dall'analisi delle serie temporali delle concentrazioni di PM_{10} e $PM_{2,5}$ siamo stati in grado di ipotizzare la presenza di fenomeni meteorologici a larga scala come l'intrusione di polvere sahariana nella seconda settimana di giugno 2019. L'analisi delle serie temporali dell'UPII dovuta al PM_{10} non ha mostrato particolari anomalie, mentre da quelle dell'UPII dovuta al $PM_{2,5}$ si sono osservati valori negativi nel mese di giugno di entrambi gli anni, 2019 e 2020, ciò sta ad indicare che le concentrazioni di questo aerosol in questi mesi sono risultate maggiori nelle zone rurali rispetto a quelle urbane.

L'analisi condotta nel presente lavoro ha dimostrato che, a differenza dell'UHI, per l'UPI l'imperviousness non mostra una correlazione statisticamente significativa con le concentrazioni del particolato atmosferico. Tuttavia, i risultati ottenuti hanno sollevato numerosi quesiti e hanno evidenziato la necessità di indagare ulteriormente alcuni punti prima di analizzare nel dettaglio l'interconnessione tra UHI e UPI.

Sicuramente bisognerà verificare se utilizzando raggi differenti per la misura dell'imperviousness si ottengono risultati migliori, questo perché in prima battuta si è utilizzato lo stesso raggio calcolato da Cecilia et al. (2023) ma non è detto che il raggio ottimizzato per l'UHI sia lo stesso di quello per l'UPI.

Bisognerà inoltre investigare ulteriormente le cause che hanno portato ad avere valori di UPII negativa relativa al PM₁₀ tra la fine di giugno e l'inizio di luglio 2019.

È da studiare ulteriormente anche la questione relativa all'UPII negativa nei mesi di giugno sia del 2019 che del 2020 per quanto riguarda il PM_{2,5}. Per comprendere meglio questo aspetto sarà opportuno estendere l'analisi anche ad altri anni, oltre che ad altri mesi.

Potrebbe essere molto interessante utilizzare questo metodo per studiare l'UPII anche nella prima metà dell'anno 2020, durante il periodo del lockdown, per vedere se si sono registrate importanti variazioni o anomalie.

Inoltre, potrebbe risultare interessante estendere questa analisi anche ad altri composti misurati dalle stazioni di ARPA-Lazio, a partire sicuramente da NO, NO₂ e NO_x, in quanto sono quelli maggiormente misurati da questa rete.

Ringraziamenti

Si ringrazia Annalisa Di Bernardino, mia relatrice, per gli impagabili consigli e per il grande supporto nella stesura di questa tesi. Si ringrazia Andrea Cecilia per aver fornito i dati di temperatura delle stazioni meteorologiche e le analisi di UHI presenti in questo elaborato, ed aver inoltre fornito i dati di IMP relative alle stazioni di qualità dell'aria. Inoltre si ringrazia ARPA Lazio per aver fornito i dati di qualità dell'aria utilizzati in questo studio.

Bibliografia

- Bretz, S., Akbari, H., Rosenfeld, A. (1998). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmos. Environ.* 32, 95–101.
- Cao, C., Lee, X., Liu, S., Schultz, N., Xiao, W., Zhang, M., Zhao, L. (2016). Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nat. Commun.* 7.
- Cecilia A. et al. (2023). Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data.
- Chakraborty, T., Sarangi, C., Tripathi, S.N., 2017. Understanding diurnality and interseasonality of a sub-tropical urban heat island. *Bound.-Layer Meteorol.* 163 (2), 287–309.
- Crutzen, P.J. (2004). New directions: the growing urban heat and pollution “island” effect—impact on chemistry and climate. *Atmos. Environ.* 38 (38), 3539–3540.
- Czarnecka, M., Nidzgorska-Lencewicz, J. (2014). Intensity of urban heat island and air quality in Gdańsk during 2010 heat wave. *Polish J. Environ. Stud.* 23, 329–340.
- Elsayed, I.S.M. (2012). Mitigation of the urban heat island of the city of Kuala Lumpur, Malaysia. *Middle East J. Sci. Res.* 11, 1602–1613.
- Fallmann, J. (2014). Numerical Simulations to Assess the Effect of Urban Heat Island Mitigation Strategies on Regional Air Quality. Universität zu Köln.
- Fallmann, J., Forkel, R., Emeis, S. (2016). Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. *Atmos. Environ.* 125, 199–211.
- Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sens. Environ.* 114, 504–513.
- Izrael, Y., Hashimoto, M., Tegart, W. (1990). Potential impacts of climate change. Rep. IPCC Work. Gr. II.

- Jin, M., Shepherd, J.M., Zheng, W. (2010). Urban surface temperature reduction via the urban aerosol direct effect: a remote sensing and WRF model sensitivity study. *Adv. Meteorol.*
- Jun Li, L., Wang, Y., Zhang, Q., Yu, T., Zhao, Y., Jin, J. (2007). Spatial distribution of aerosol pollution based on MODIS data over Beijing, China. *J. Environ. Sci.* 19, 955–960.
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., Sodoudi, S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Sci. Total Environ.* 636, 818–828.
- Lubin, D., Simpson, A.S. (1994). The longwave emission signature of urban pollution: radiometric FTIR measurement. *Geophys. Res. Lett.* 21 (1), 37–40.
- Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island (Symons Memorial Lecture, 20 May 1980). *Q. Journal, R. Meteorol. Soc* 108, 1–24.
- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C., Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *J. Ecol. Environ. Sci.* 20, 120–128.
- Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Romm, J.J., Pomerantz, M., et al. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energ. Build* 51 (28), 62 1998.
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Sci. Total Environ.* 512–513, 582–598.
- Santamouris, M., Kolokotsa, D. (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques.*
- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., Guedalia, D., 2006. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmos. Environ.* 40, 1743–1758.
- Schatz, Jason, Kucharik, Christopher, 2015. Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA. *Environ. Res. Lett.* 10, 094024.
- Stewart, Iain, Oke, T., 01 (2009). Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: the case of Nagano, Japan.
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Sci. Total. Environ.* 751, 141727.
- Wang, L., Gao, Z., Miao, S., Guo, X., Sun, T., Liu, M., Li, D. (2015). Contrasting characteristics of the surface energy balance between the urban and rural areas of Beijing. *Adv. Atmos. Sci.* 32 (4), 505.
- WMO-No. 1338 report. 978-92-63-11338-2.