Report del progetto: Salute!

Abstract

Il progetto SALUTE! aveva l'obiettivo di caratterizzare l'esposizione dei ciclisti agli inquinanti atmosferici e ai pollini allergenici lungo due percorsi ciclabili urbani con caratteristiche contrastanti nella città di Bologna, Italia. Una campagna di campionamento sincronizzata, condotta mediante strumentazione montata su biciclette, è stata svolta dall'11 aprile al 26 giugno 2025 in due siti: i Viali di Bologna, ossia la circonvallazione interna attorno al centro storico, e le piste ciclabili situate nei pressi del Parco dei Noci a Borgo Panigale, un'area verde periurbana.

Sulle biciclette sono stati installati sensori portatili per il rilevamento di PM2,5 e PM10, rilevatori di composti organici volatili (VOC) e CO_2, un anemometro, un filtro per allergeni e vetrini da microscopio rivestiti con Melinex per la cattura dei pollini. Gli strumenti sono stati utilizzati durante sessioni di campionamento mattutine, alle ore 09:00, e pomeridiane, alle ore 17:00, effettuate due volte alla settimana.

Complessivamente sono stati identificati 45 tipi pollinici. Le concentrazioni di PM2,5 sono risultate significativamente più elevate al mattino in entrambi i siti. I Viali hanno mostrato dinamiche diurne più marcate per tutte le variabili misurate, compresi pollini, VOC e CO_2, mentre il Parco ha presentato condizioni più stabili nel corso della giornata.

La diversità pollinica è risultata significativamente più elevata presso i Viali, sulla base dell'indice di Shannon H' ($p = 0,043$), con una predominanza di Platanus in questo sito. Un modello di regressione lineare multipla ha spiegato il 40% della variabilità delle concentrazioni di PM2,5, individuando l'umidità e la temperatura come predittori positivi. Le conte polliniche sono diminuite significativamente nel pomeriggio e all'aumentare della temperatura.

Il confronto con i dati della rete ARPAE ha confermato la complementarità metodologica dei due approcci: sebbene le conte polliniche assolute differissero a causa del diverso disegno di campionamento, il metodo adottato nel progetto ha rilevato 29 tipi pollinici non individuati dalla rete regionale di monitoraggio, comprese specie ornamentali quali *Aesculus*, *Tilia* e *Ginkgo*.

Descrizione del progetto

1.1 Stato dell'arte e obiettivi

La promozione della mobilità urbana sostenibile costituiva uno dei pilastri delle moderne politiche di salute ambientale. Bologna, con circa 150 km di infrastrutture ciclabili, rappresentava uno degli esempi più avanzati in Italia di pianificazione urbana favorevole alla mobilità ciclistica. Tuttavia, la città era situata all'interno di un'area riconosciuta come uno dei principali hotspot europei di inquinamento atmosferico, condizione che esponeva i ciclisti a livelli elevati di particolato atmosferico (PM). Il particolato atmosferico non era costituito esclusivamente da particelle inorganiche di origine antropica: le componenti biologiche, in particolare i pollini, ne rappresentavano una rilevante frazione allergenica, i cui effetti infiammatori potevano essere amplificati dalla contemporanea inalazione di inquinanti atmosferici.

Il progetto SALUTE! era stato pertanto concepito per colmare il divario tra il monitoraggio della qualità dell'aria urbana e la valutazione dell'esposizione personale agli allergeni. I suoi tre principali obiettivi scientifici erano: (i) creare una mappa pubblicamente accessibile del rischio di esposizione al particolato e agli allergeni lungo le piste ciclabili di Bologna; (ii) sviluppare un indice integrato che mettesse in relazione dati meteorologici, dati sulla qualità dell'aria e dati pollinici, al fine di identificare i percorsi e i periodi a maggiore rischio; e (iii) sviluppare un test diagnostico a flusso laterale che consentisse ai ciclisti di monitorare autonomamente la propria esposizione ai principali allergeni pollinici.

1.2 Selezione dei siti

Sono stati selezionati due percorsi ciclabili di lunghezza comparabile, per un totale di 5 km, a seguito di una valutazione sistematica della rete ciclabile di Bologna. I criteri di selezione prevedevano che i percorsi: (i) fossero esposti a volumi consistenti di traffico motorizzato, considerando i veicoli come la principale fonte di inquinanti atmosferici; (ii) fossero situati in prossimità di una stazione ARPAE, Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia, per il monitoraggio della qualità dell'aria; e (iii) comprendessero un contatore automatico di biciclette, utile per la successiva modellizzazione dell'esposizione.

I due siti selezionati erano:

- **Viali di Bologna:** il tratto di piste ciclabili che costeggiava la circonvallazione interna, da Porta San Donato a Porta San Felice, era caratterizzato da intenso traffico veicolare, edifici alti e un'elevata densità di alberi ornamentali, in particolare *Platanus hispanica* Mill. ex Münchh.
- **Area circostante il Parco dei Noci:** il percorso ciclabile che costeggiava il fiume Reno a Borgo Panigale attraversava sia aree urbane sia parchi caratterizzati da una vegetazione più diversificata. Rispetto al centro cittadino, l'area presentava un paesaggio più aperto.

Prima dell'avvio del campionamento, è stato effettuato un censimento delle specie arboree presenti entro una fascia di 15 metri da ciascun tratto dei percorsi, riportato nell'Allegato 1, e sono stati raccolti dati biometrici per calcolare gli indici di allergenicità relativi ai diversi segmenti dei tracciati. All'interno di questa fascia, i Viali ospitavano un numero di alberi più che doppio rispetto all'area del Parco.

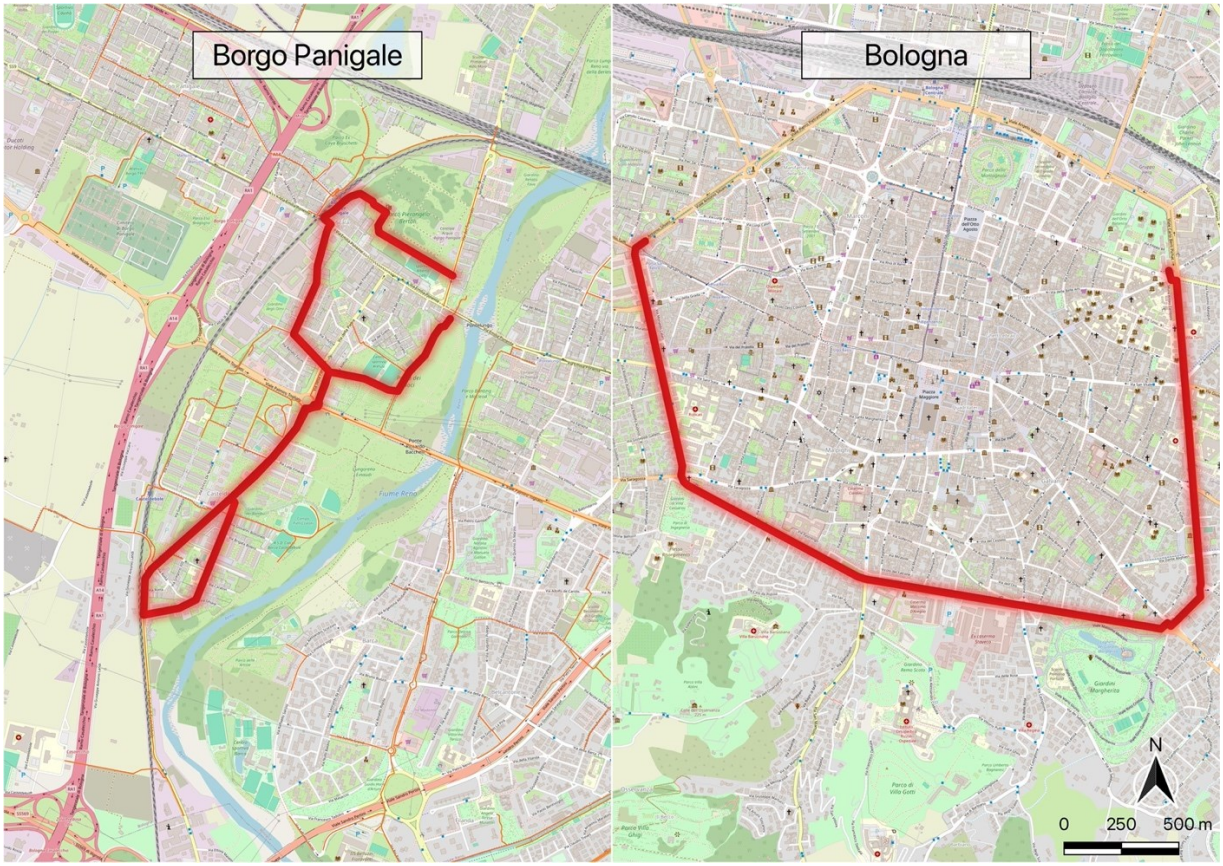

***Figura 1**: L'immagine mostra, a sinistra, il percorso ciclabile di Borgo Panigale e, a destra, il percorso ciclabile dei Viali. Mappa di base tratta da OpenStreetMap.*

1.3 Campionatori e protocollo di campionamento

Due biciclette standard sono state equipaggiate con un kit di strumentazione montato anteriormente, comprendente:

- un supporto per vetrino rivestito in Melinex, con una striscia ricoperta di olio siliconico lunga 4,8 cm e larga 2 cm, utilizzato per la deposizione inerziale dei pollini;
- un portafiltro aperto lateralmente, contenente un filtro a membrana in nylon con pori da 0,2 µm (Whatman®);
- un contatore ottico portatile di particelle OPC-N3 (Alphasense) per la misurazione del PM10;
- un sensore portatile SPS30 (Sensirion) per la misurazione del PM2,5;
- un sensore portatile per VOC e CO_2;
- un anemometro portatile e un'applicazione GPS per il monitoraggio della velocità e del percorso.

I sensori per PM2,5, PM10, VOC e CO_2 sono stati forniti dal CNR-ISAC di Bologna, che ha gentilmente sostenuto il progetto.

Il campionamento è stato effettuato due volte alla settimana e due volte al giorno, in corrispondenza degli orari tipici degli spostamenti casa-lavoro: una sessione mattutina alle ore 09:00, volta a simulare il tragitto verso il luogo di lavoro, e una sessione pomeridiana alle ore 17:00, volta a simulare il rientro a casa. La campagna si è svolta dall'11 aprile al 26 giugno 2025 e ha coperto i principali picchi della stagione pollinica rilevata da ARPAE a Bologna.

Al termine di ciascuna sessione, i vetrini sono stati trattati con gelatina glicerinata alla fucsina e montati con coprioggetto; i granuli pollinici sono stati identificati a livello di morfotipo e conteggiati. Le conte standardizzate, espresse in granuli/m^3, sono state calcolate sulla base del volume d'aria campionato, stimato a partire dalla velocità della bicicletta e dall'area di impatto del filtro. I filtri a membrana in nylon sono stati invece conservati a −80 °C per le successive analisi molecolari.

2. Risultati

2.1 Dinamiche diurne e differenze spaziali

Per svolgere queste analisi sono stati applicati diversi test statistici, al fine di confrontare le due aree e le due fasce orarie, tra cui il test di Scheirer-Ray-Hare (SRH), il test di Wilcoxon e il test di Mann-Whitney.

2.1.1 Morning vs. afternoon

Il confronto tra mattino e pomeriggio ha evidenziato differenze rilevanti tra i due siti.
Presso il Parco, l'unica variabile che differiva significativamente tra mattino e pomeriggio era il PM2,5, che risultava più elevato al mattino (Wilcoxon, $p = 0,006$). Tutte le altre variabili misurate non mostravano variazioni diurne significative, suggerendo la presenza di un microambiente relativamente stabile.
Presso i Viali, il quadro era nettamente diverso: PM2,5, conte polliniche, VOC e CO_2 mostravano tutti variazioni diurne statisticamente significative (Wilcoxon, $p < 0,05$). Il PM2,5 e i pollini risultavano più elevati al mattino, mentre VOC e CO_2 aumentavano significativamente nel pomeriggio (rispettivamente $p = 0,002$ e $p = 0,003$). L'aumento pomeridiano di VOC e CO_2 in un sito caratterizzato da traffico intenso era coerente con l'incremento delle emissioni veicolari durante il picco pomeridiano degli spostamenti casa-lavoro e con la maggiore attività fotochimica associata alle temperature più elevate del pomeriggio.

2.1.2 Parco vs Viali

Nonostante le marcate differenze ambientali, le concentrazioni di PM2,5 non differivano significativamente tra i due siti quando veniva considerato l'intero dataset (Wilcoxon, $p = 0,844$). Si trattava di un risultato rilevante, poiché suggeriva che, alla scala spaziale di un percorso casa-lavoro, le differenze locali nel traffico non fossero sufficienti a produrre gradienti misurabili di PM2,5 e che la qualità dell'aria urbana di fondo e le condizioni meteorologiche rappresentassero i principali fattori di controllo.
Tuttavia, quando il confronto veniva stratificato in base alla fascia oraria, nelle sessioni mattutine emergeva una differenza significativa nei valori misurati di PM10 (Mann-Whitney, $p = 0,006$), con concentrazioni mattutine più elevate al Parco rispetto ai Viali. La dimensione dell'effetto era pari a $r = 0,52$, classificata come "ampia" secondo i criteri di Cohen. Questo risultato poteva riflettere un maggiore carico di particelle biologiche grossolane, quali pollini, spore fungine e detriti vegetali, nel

sito del Parco, caratterizzato da una vegetazione più abbondante, durante il picco mattutino di dispersione pollinica.

Nel pomeriggio, le concentrazioni di VOC e CO_2, dopo l'esclusione dei valori anomali attribuibili ad artefatti strumentali, risultavano significativamente più elevate ai Viali rispetto al Parco (Mann-Whitney, VOC: p = 0,011, r = 0,49; CO_2: p = 0,010, r = 0,50). Questo risultato confermava ulteriormente il ruolo dell'ambiente ad alto traffico nella generazione di picchi pomeridiani di inquinamento gassoso, anche in assenza di differenze rilevanti nel particolato fine tra i due siti.

Infine, l'analisi SRH confermava che la CO_2 era influenzata sia dal sito sia dalla fascia oraria come fattori indipendenti (p = 0,041 per l'area; p = 0,008 per l'orario), mentre PM10 e VOC rispondevano all'interazione tra i due fattori (rispettivamente p = 0,009 e p = 0,014). Come atteso, la temperatura era determinata principalmente dalla fascia oraria (p = 0,004), con un maggiore riscaldamento pomeridiano del percorso ciclabile del Parco, probabilmente dovuto alla minore copertura ombreggiante delle chiome arboree rispetto alla pista ciclabile alberata dei Viali. Le altre due variabili influenzate principalmente dall'orario erano la quantità di polline e il PM2,5, entrambe caratterizzate da una diminuzione nel pomeriggio.

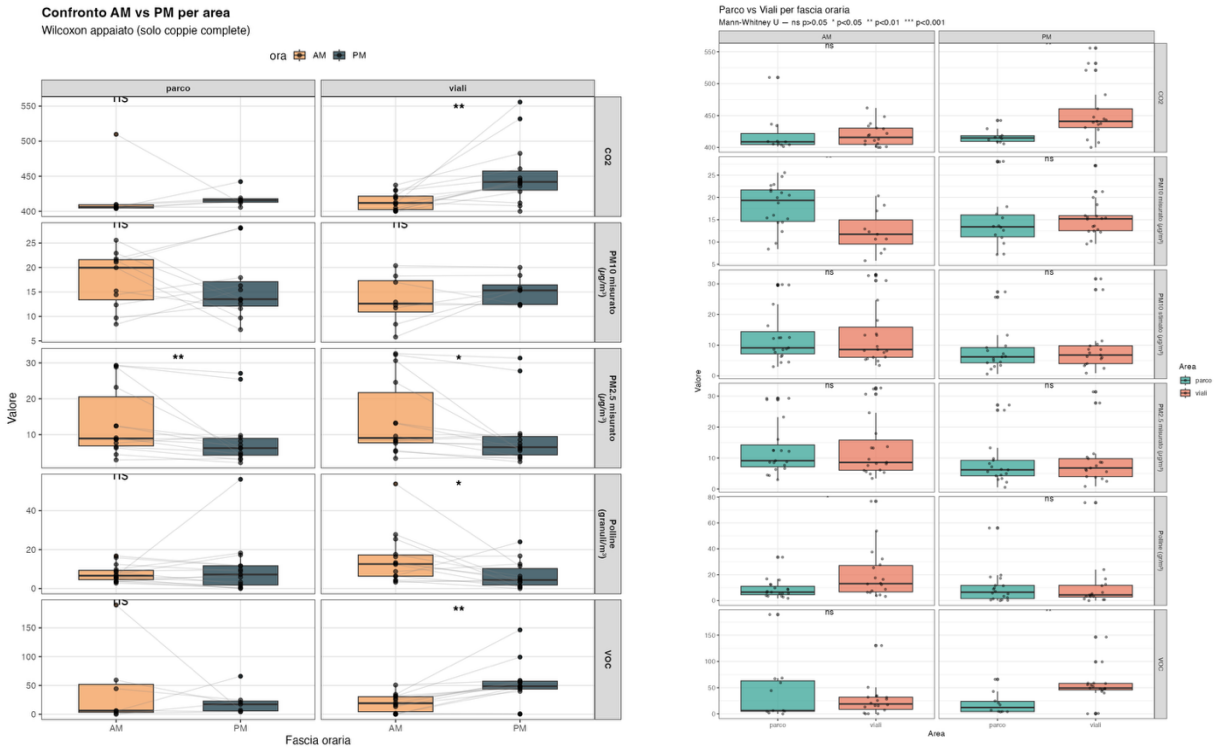

***Figura 2**: L'immagine a sinistra mostra le differenze tra le due fasce orarie (mattino vs pomeriggio) per ciascuna area. L'immagine a destra mostra le differenze tra le due aree (Parco vs Viali) per ciascuna fascia oraria.*

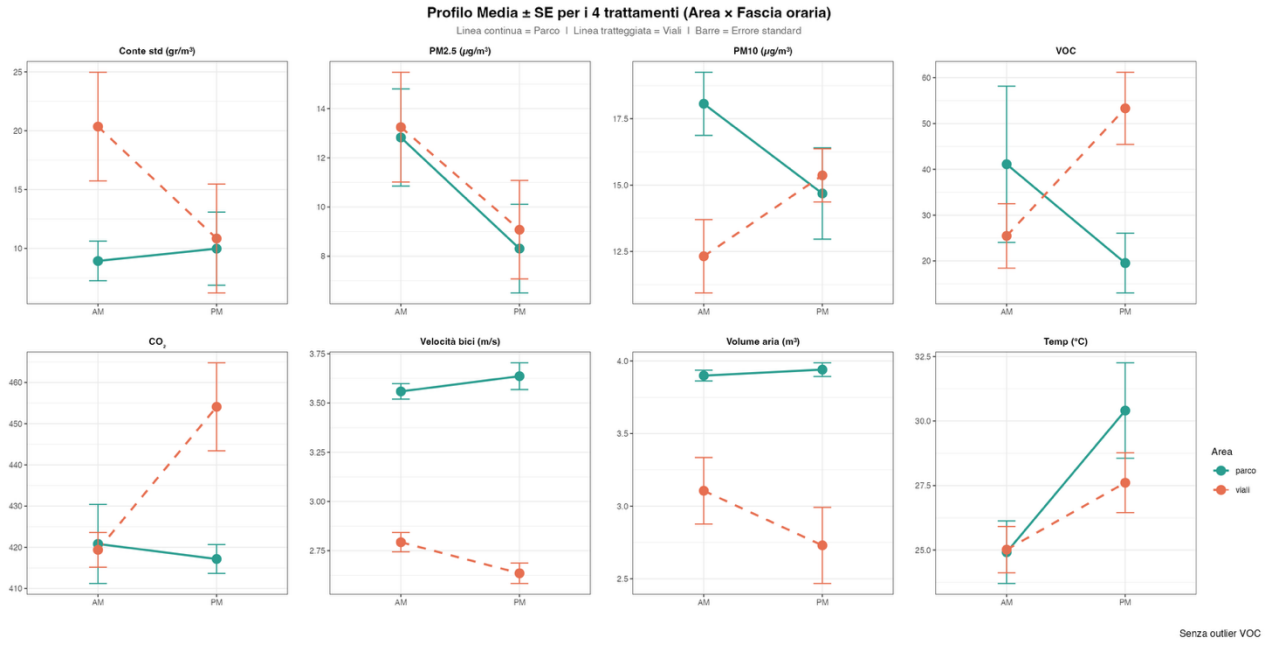

***Figura 3**: Il grafico mostra i risultati del test di Scheirer-Ray-Hare per ciascuna variabile.*

Le concentrazioni di PM2,5 misurate durante l'intera campagna presentavano un valore medio di 13,0 µg/m³ al mattino e di 8,7 µg/m³ nel pomeriggio. La differenza risultava statisticamente significativa (Wilcoxon, p = 0,007, r = 0,32). Questo aumento sistematico nelle ore mattutine rappresentava il segnale relativo agli inquinanti più robusto dell'intero dataset ed è stato osservato in entrambi i siti.

I valori misurati di PM10, al contrario, non mostravano differenze significative tra mattino e pomeriggio in nessuno dei due siti, né differenze complessive significative tra le due aree.

È stato costruito un modello di regressione lineare multipla per identificare i predittori indipendenti della variabilità del PM2,5 nell'intero dataset, sottoposto a trasformazione logaritmica per soddisfare l'assunzione di normalità (N = 69). In seguito alla selezione basata sul criterio di informazione di Akaike (AIC), il modello con il miglior adattamento ha mantenuto soltanto tre predittori meteorologici.

i) $$log(PM2.5) \sim area + orario + mese + vento + polline + temperatura + umidità$$

ii) $$log(PM2.5) \sim mese + temperatura + umidità$$

***Equazioni**: La prima formula di regressione (i) riporta tutte le variabili considerate nel modello iniziale. La seconda formula di regressione (ii) mostra il modello con il miglior adattamento, selezionato in seguito all'applicazione del criterio AIC.*

Predictor	Effetto su PM2.5	coefficiente β	p-value
Temperatura (°C)	+5.2% per 1°C	0.051	0.017
Umidità relativa (%)	+5.6% per 1%	0.055	< 0.001
Mese (trend)	+27.5% per mese	0.243	0.078 (ns)

***Tabella 1**: a tabella riporta i predittori utilizzati nel modello, i loro effetti sul PM2,5, i corrispondenti coefficienti beta e i valori di p.*

Il modello spiegava circa il 40% della variabilità del PM2,5 (R^2 = 0,40). L'effetto positivo sia dell'umidità sia della temperatura sulle concentrazioni di particolato fine era coerente con le dinamiche delle inversioni termiche atmosferiche: in condizioni più calde e umide, la stratificazione degli strati inferiori della troposfera poteva intrappolare gli inquinanti in prossimità della superficie, aumentando le concentrazioni vicino alla sede stradale all'altezza delle vie respiratorie dei ciclisti.
Il sito di campionamento (Parco vs Viali) non emergeva come predittore indipendente, confermando che le concentrazioni di PM2,5 a cui erano esposti i ciclisti erano determinate principalmente dalle condizioni meteorologiche, piuttosto che dall'intensità del traffico locale.

2.2 Polline: pattern temporali e spaziali

2.2.1 Panoramica stagionale

Entrambe le aree di campionamento mostravano concentrazioni polliniche relativamente elevate all'inizio della campagna, a metà aprile, seguite da una temporanea diminuzione alla fine del mese e da un secondo picco nella prima metà di maggio. Un marcato incremento osservato il 9 maggio esclusivamente ai Viali, e non riscontrato al Parco, suggeriva un evento di rilascio pollinico fortemente localizzato, mentre un picco condiviso veniva registrato in entrambi i siti il 20 maggio. Nel mese di giugno, con il progressivo avanzamento della stagione di fioritura verso l'estate, i livelli pollinici diminuivano in entrambe le aree.
Nel complesso, le conte polliniche risultavano più elevate ai Viali rispetto al Parco, con valori medi rispettivamente pari a 15,9 e 9,4 granuli/m^3. Questo andamento era coerente con la maggiore densità arborea rilevata nella fascia di rispetto dei Viali, sebbene la differenza non raggiungesse la significatività statistica nel confronto complessivo (Wilcoxon, p = 0,25).
La tempistica del picco pollinico di alcune specie differiva tra le due aree. In particolare, nessuna delle specie arboree che mostrava un picco ritardato ai Viali era presente nel corrispondente censimento entro la fascia di 15 metri. Questo risultato suggeriva un trasporto pollinico secondario mediato dal vento e potenzialmente canalizzato dagli edifici alti del contesto urbano.
D'altra parte, nonostante il notevole ritardo, superiore a 45 giorni, Platanus era presente all'interno della fascia censita presso il Parco. Tuttavia, il numero limitato di esemplari non era sufficiente a riprodurre il picco più precoce registrato ai Viali.
Infine, la fioritura anticipata di Olea, Quercus, Poaceae e di altre specie poteva indicare un anticipo della stagione di fioritura dovuto all'effetto isola di calore urbana.

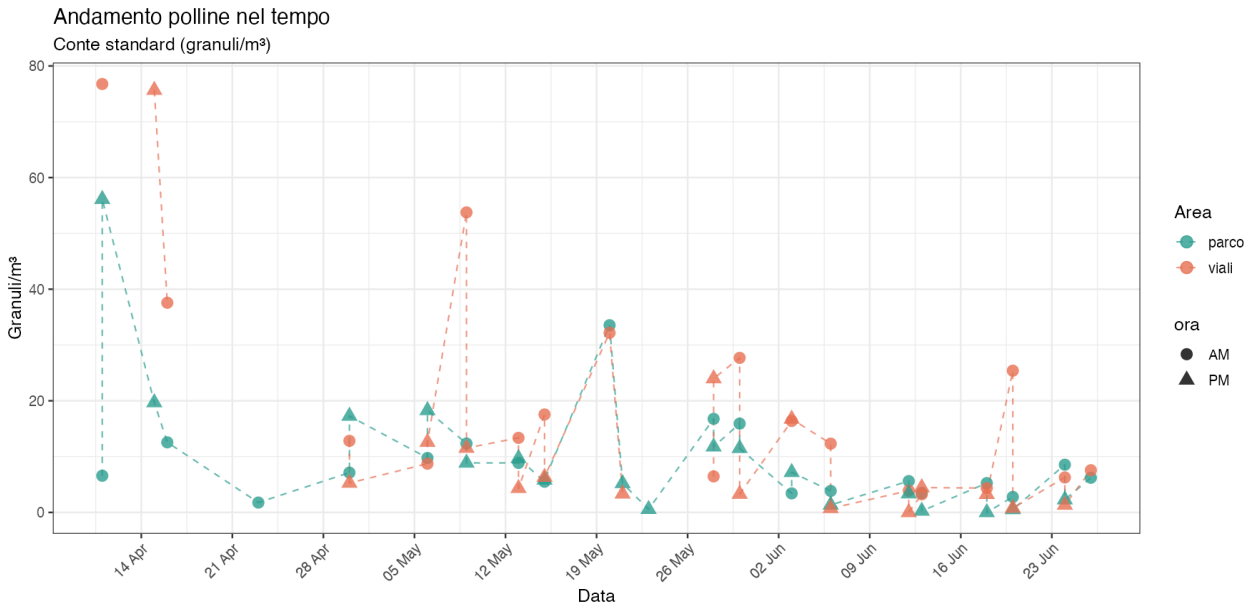

***Figura 4**: Serie temporale del carico pollinico, suddivisa per area, Parco (verde) e Viali (arancione), e per fascia oraria: mattino (cerchi) e pomeriggio (triangoli).*

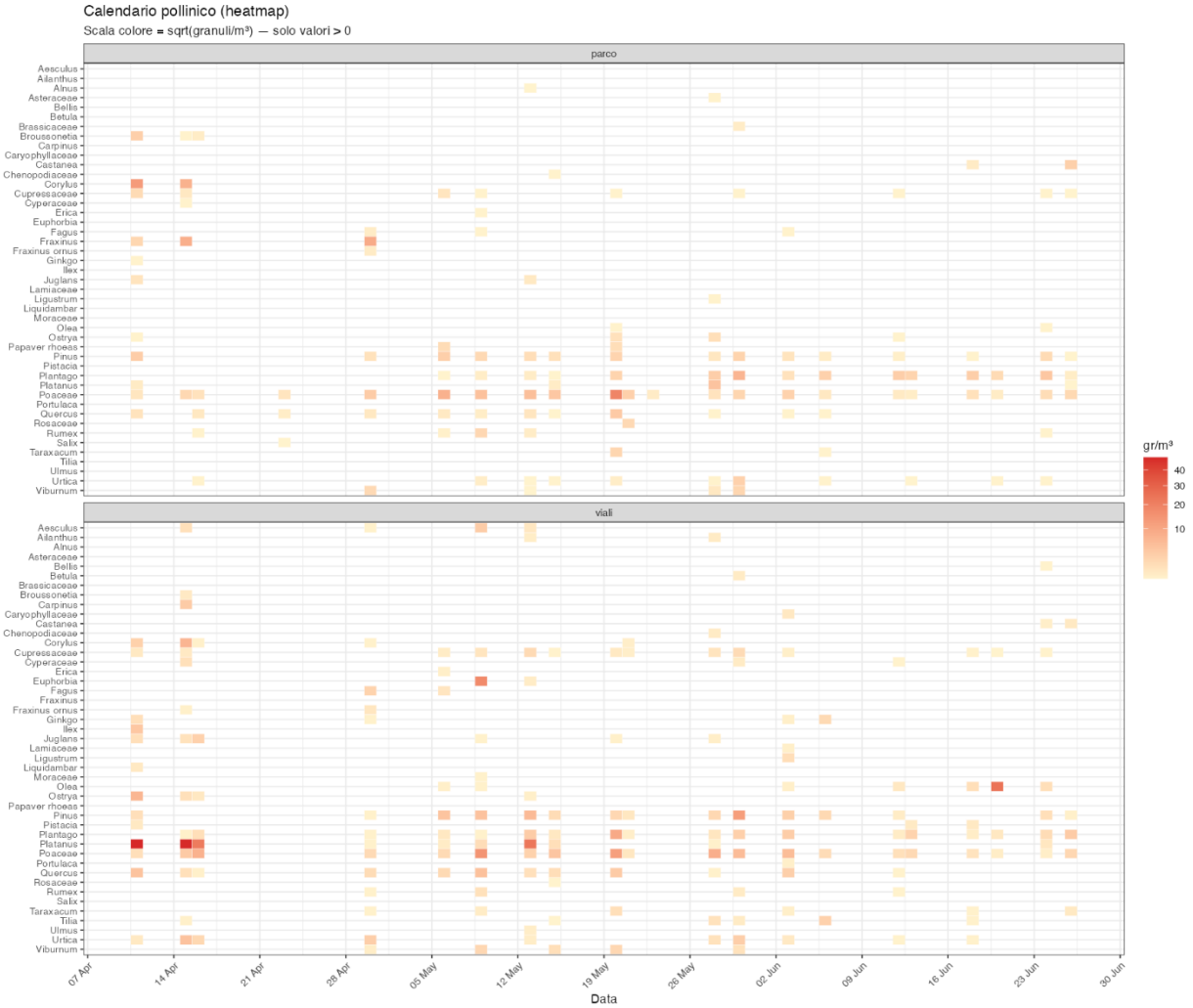

***Figura 5**: Calendario pollinico delle due aree di studio. Nei giorni in cui sono stati raccolti sia campioni mattutini sia campioni pomeridiani, è stato calcolato il carico pollinico medio. La scala cromatica rappresenta la radice quadrata della quantità di polline, consentendo di visualizzare più chiaramente anche i valori più bassi.*

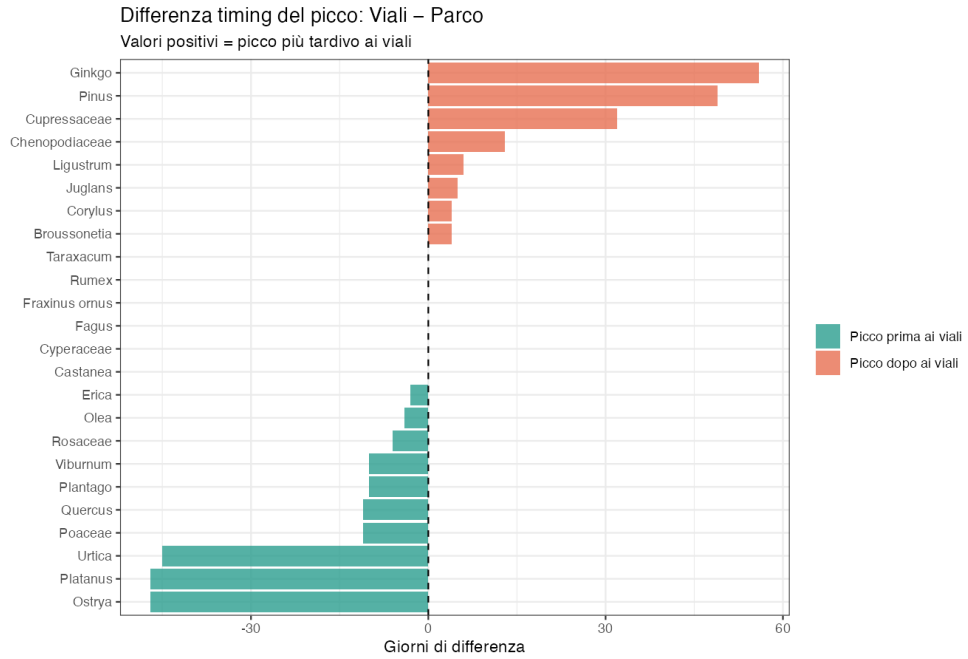

***Figura 6**: Il grafico mostra la differenza temporale tra i picchi pollinici nelle due aree. Il colore verde indica un picco più precoce ai Viali, mentre il colore arancione indica un picco ritardato ai Viali.*

2.2.2 Dinamiche diurne del polline

Considerando l'intero dataset, le conte polliniche risultavano significativamente più elevate al mattino rispetto al pomeriggio (Wilcoxon, p = 0,023, r = 0,27). Questo andamento era particolarmente marcato e statisticamente robusto ai Viali, dove le concentrazioni polliniche mattutine erano più che doppie rispetto a quelle rilevate nel pomeriggio (15,2 vs 6,8 granuli/m³; Wilcoxon, p = 0,038). Al Parco, la differenza tra mattino e pomeriggio era più contenuta e non raggiungeva la significatività statistica.

Un modello di regressione multipla applicato alle conte polliniche trasformate logaritmicamente (N = 47, R^2 = 0,35) confermava che la fascia oraria pomeridiana rappresentava il principale predittore della riduzione del carico pollinico (β = −0,67, corrispondente a una diminuzione di circa il 49% rispetto al mattino; p = 0,018). La temperatura costituiva l'altro predittore significativo (β = −0,052, pari a una riduzione di circa il 5% per ogni aumento di 1 °C; p = 0,038), riflettendo il progressivo avanzamento della stagione dalla primavera all'estate e la conseguente diminuzione dell'intensità della fioritura.

I coefficienti negativi, sebbene non significativi, osservati nel modello sia per il PM2,5 sia per il PM10 suggerivano una possibile relazione inibitoria tra il carico di particolato e il polline aerodisperso. Tuttavia, non era possibile stabilire un rapporto di causalità e, al momento, non risultavano disponibili evidenze scientifiche a sostegno di tale relazione.

i) $$log1p(Polline) \sim PM2.5 + PM10 + volume\,d'aria + temperatura + area + orario$$

ii) $$log1p(Polline) \sim PM2.5 + PM10 + temperatura + orario$$

***Equazioni**: La prima formula di regressione (i) riporta tutte le variabili considerate nel modello iniziale. La seconda formula di regressione (ii) mostra il modello con il miglior adattamento, selezionato in seguito all'applicazione del criterio AIC.*

2.2.3 Covariazione polline-inquinanti

L'analisi di correlazione per ranghi di Spearman tra le conte polliniche e le concentrazioni degli inquinanti non ha evidenziato associazioni significative a livello globale. Tuttavia, stratificando l'analisi, sono emerse relazioni specifiche per ciascun contesto.

Al Parco è stata osservata una tendenza positiva, sebbene solo marginalmente non significativa, tra VOC e conte polliniche (ρ = 0,41, p = 0,066), potenzialmente riconducibile a una covariazione determinata dalle emissioni di VOC biogenici da parte della vegetazione in fioritura. Ai Viali non è stata invece rilevata alcuna relazione analoga.

Il segnale più robusto emerso dall'analisi della covariazione è stato osservato nel sottoinsieme dei campioni pomeridiani: il PM2,5 risultava significativamente e negativamente correlato con le conte polliniche (ρ = −0,45, p = 0,010). Questa relazione inversa rifletteva verosimilmente le dinamiche temporali già descritte, secondo cui le condizioni pomeridiane caratterizzate da traffico intenso determinavano concentrazioni più elevate di PM2,5, dovute alle emissioni veicolari, in un momento della giornata in cui la dispersione pollinica era naturalmente diminuita, piuttosto che un effetto inibitorio diretto del particolato sul polline.

È importante sottolineare che i modelli di regressione confermavano come i fattori associati al PM2,5, ossia umidità e temperatura, e quelli associati alle conte polliniche, ossia temperatura e fascia oraria, agissero in direzioni opposte rispetto alla temperatura. Ciò rafforzava l'interpretazione secondo cui tali relazioni riflettevano processi stagionali e diurni distinti, anziché un nesso causale diretto.

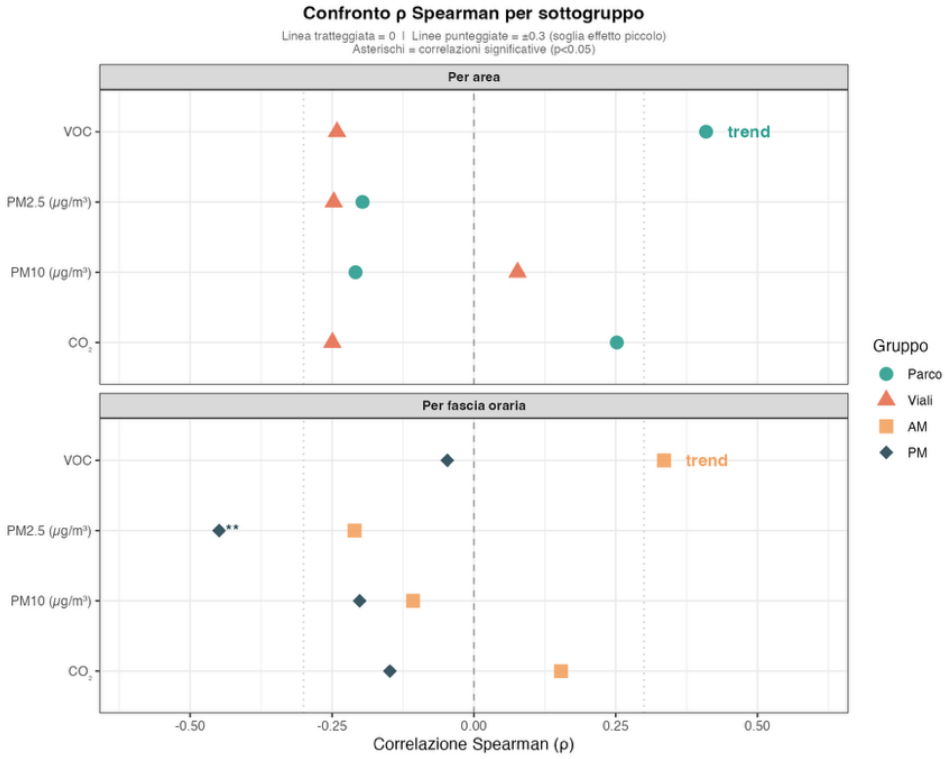

***Figura 7**: Il grafico mostra i coefficienti di correlazione per ranghi di Spearman (ρ), suddivisi per area e fascia oraria.*

2.3 Composizione e diversità pollinica

2.3.1 Struttura della comunità

L'analisi delle componenti principali (PCA), applicata ai dati di abbondanza dei tipi pollinici trasformati secondo Hellinger, ha incluso 45 tipi pollinici con almeno un'osservazione e ha spiegato il 41% della varianza totale lungo i primi due assi (PC1: 23,6%; PC2: 17,4%). Si trattava di un risultato soddisfacente, considerando l'elevata proporzione di valori nulli tipica dei dati relativi alle comunità ecologiche. L'ordinamento ha evidenziato una parziale segregazione spaziale tra i due siti. I campioni del Parco tendevano a raggrupparsi nella porzione inferiore del biplot, principalmente in associazione con Plantago e Poaceae. I campioni dei Viali si concentravano invece nella porzione superiore, con Platanus, Urtica e Olea come principali tipi pollinici discriminanti. Gli assemblaggi correlati di Pinus, Poaceae e Quercus erano associati all'asse positivo della PC1 e riflettevano la presenza di tipi a dispersione anemofila comuni a entrambe le aree. Di seguito era inoltre riportato un grafico tridimensionale complementare comprendente il terzo asse (PC3: 10,9%), grazie al quale la quota complessiva di varianza spiegata raggiungeva il 51,8%.

La PERMANOVA ha confermato un effetto statisticamente significativo dell'interazione tra area e fascia oraria sulla composizione della comunità pollinica (R^2 = 0,090, p = 0,004). Anche l'area (R^2 = 0,035, p = 0,026) e la fascia oraria (R^2 = 0,041, p = 0,011) risultavano significative come fattori indipendenti, ma il modello di interazione era quello che spiegava la quota maggiore di varianza. Tuttavia, la varianza spiegata rimaneva molto bassa, indicando che variabili non considerate, quali la tempistica fenologica, le condizioni meteorologiche e altri fattori, contribuivano alla maggior parte della variabilità osservata nella comunità pollinica.

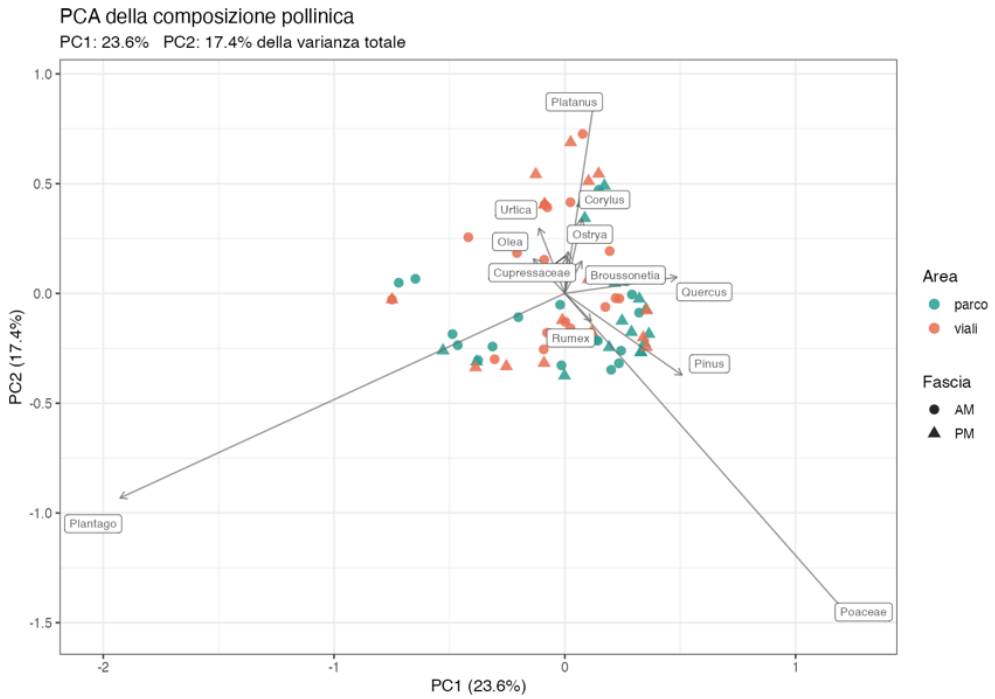

***Figura 8**: Il grafico mostra i primi due assi principali della PCA, che spiegavano complessivamente il 41% della varianza totale. I loadings indicavano quali tipi pollinici contribuivano maggiormente alla separazione dei campioni.*

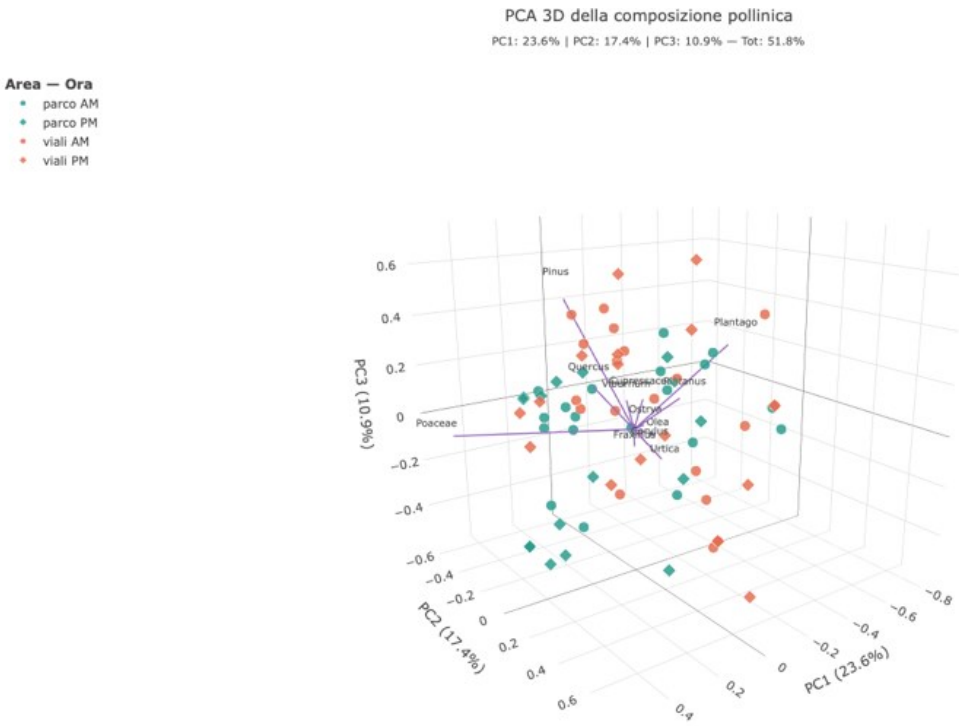

***Figura 9**: Il grafico tridimensionale mostra i primi tre assi principali della PCA, che spiegavano complessivamente quasi il 52% della varianza totale. I loadings indicavano quali tipi pollinici contribuivano maggiormente alla separazione dei campioni.*

2.3.2 Tipi pollinici domiannti

Considerando complessivamente entrambi i siti, i sei tipi pollinici più abbondanti, sulla base delle conte cumulative, erano:

Rank	Tipi pollinici	Conte polliniche (grains/m³)	Sito principale
1	Poaceae	213.5	Entrambi
2	*Platanus*	159.3	Viali (dominante)
3	*Pinus*	101.6	Viali
4	*Plantago*	86.2	Parco
5	*Quercus*	52.6	Entrambi
6	*Corylus*	45.3	Parco (Aprile)

***Tabella 2**: La tabella riporta i sei tipi pollinici più abbondanti, le rispettive conte totali e le aree in cui ciascun tipo è stato osservato più frequentemente.*

Il polline delle Poaceae risultava complessivamente il più abbondante, confermando ancora una volta la natura ubiquitaria e anemofila di queste specie. *Platanus* si distingueva come il secondo tipo pollinico più abbondante in assoluto, ma la sua distribuzione era fortemente asimmetrica: rappresentava il tipo dominante ai Viali, contribuendo a circa la metà del polline totale nei giorni con le conte più elevate, mentre al Parco compariva solo sporadicamente e più avanti nella stagione, probabilmente a causa del minor numero di esemplari presenti come sorgenti locali. Questa asimmetria era coerente con la densità nettamente maggiore di alberi stradali di *Platanus hispanica*

lungo i Viali, dove costituivano più di un terzo di tutti gli alberi presenti entro la fascia di 15 metri. Il tipo pollinico *Corylus* era stato rilevato prevalentemente nei campioni del Parco, con una maggiore concentrazione nel mese di aprile, in accordo con la fenologia primaverile precoce del nocciolo. Diversi tipi pollinici erano esclusivi, o quasi esclusivi, di una delle due aree: *Euphorbia* e *Urtica* erano stati rilevati quasi interamente ai Viali, mentre *Viburnum*, *Fraxinus*, *Broussonetia* e *Castanea* erano maggiormente caratteristici del Parco.

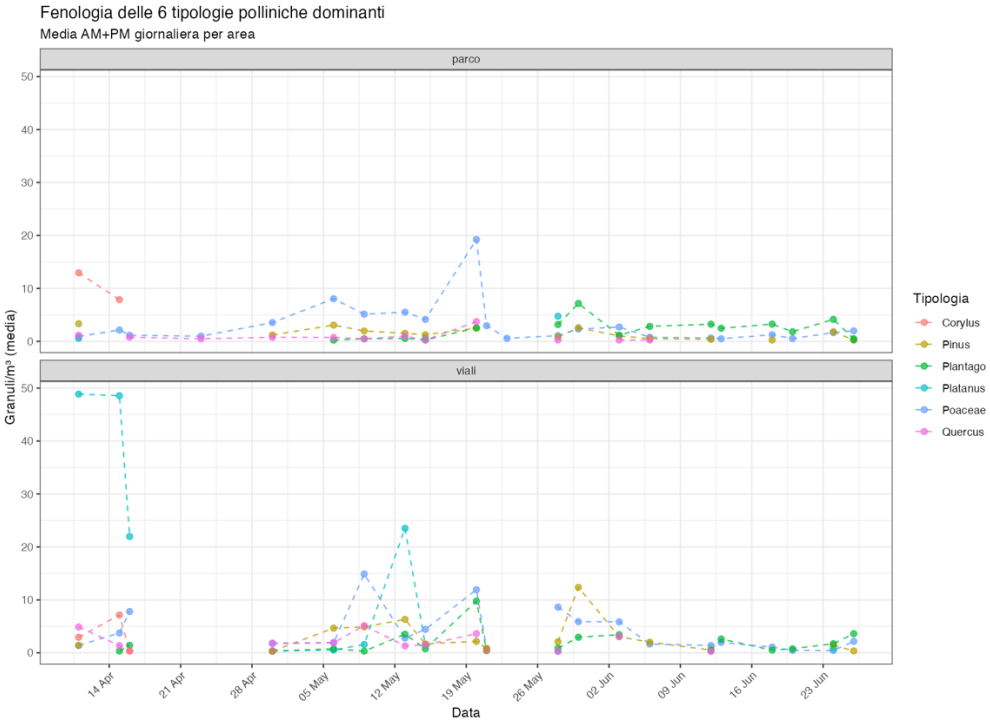

***Figura 10**: Il grafico mostra le serie temporali dei sei tipi pollinici più abbondanti nelle due aree.*

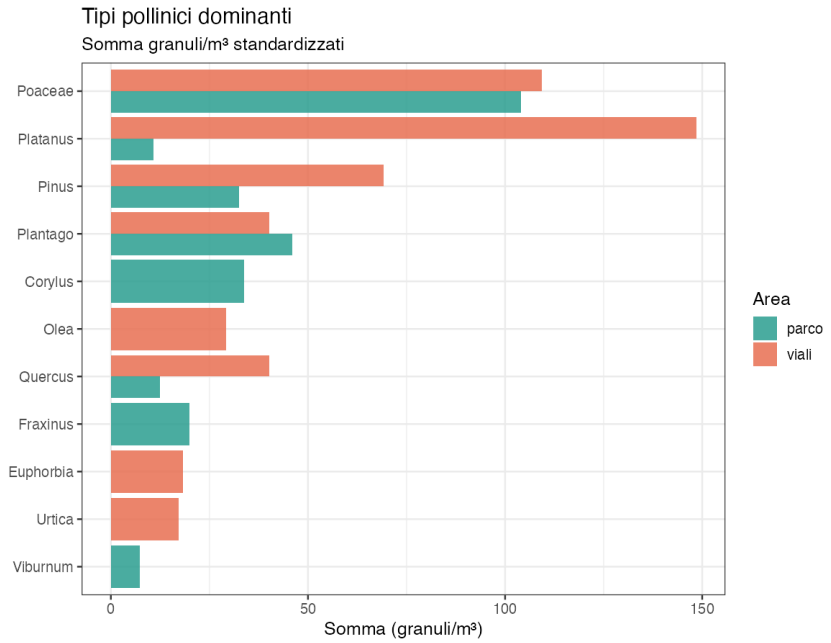

***Figura 11**: Il grafico a barre mostra i dieci tipi pollinici più abbondanti, suddivisi per area.*

2.3.3 Diversità pollinica

Gli indici di diversità di Shannon (H') risultavano significativamente più elevati ai Viali rispetto al Parco (Wilcoxon, W = 497, p = 0,043). I valori medi di H' erano pari a 1,40 al mattino e 0,92 al pomeriggio ai Viali, rispetto a 1,19 al mattino e 0,75 al pomeriggio al Parco. La ricchezza dei tipi pollinici seguiva lo stesso andamento, con una media di 7,2 tipi per sessione mattutina ai Viali e di 5,5 tipi per sessione mattutina al Parco.

Questo risultato apparentemente controintuitivo, ossia una maggiore diversità nel sito più urbanizzato e caratterizzato da traffico più intenso, rifletteva probabilmente la maggiore varietà di specie arboree ornamentali presenti nei giardini residenziali e lungo i Viali. La differenza di diversità era concentrata soprattutto nelle sessioni mattutine, mentre nei campioni pomeridiani risultava meno marcata, probabilmente a causa di dinamiche naturali, come la riduzione del rilascio pollinico.

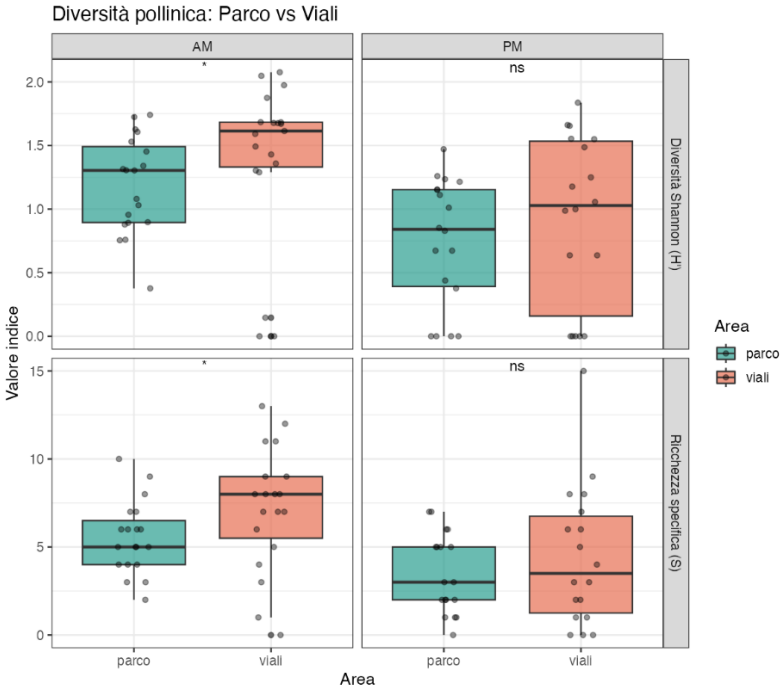

***Figura 12**: I box plot mostrano l'indice di diversità di Shannon e la ricchezza dei tipi pollinici, suddivisi per area e fascia oraria.*

2.4 Confronto contestuale con i dati di monitoraggio ARPAE

Poiché l'obiettivo principale del progetto SALUTE! non era la validazione dei sensori rispetto ai dati ARPAE, bensì la caratterizzazione dell'esposizione in tempo reale dei ciclisti, i dati della rete ARPAE sono stati presentati come riferimento contestuale e non come standard di riferimento.

2.4.1 Particolato atmosferico

Per il PM2,5, le misurazioni mobili effettuate ai Viali hanno mostrato una forte correlazione di Pearson con la stazione fissa ARPAE più vicina, situata a Porta San Felice (r = 0,74, p = 0,0001), indicando che gli andamenti temporali del particolato fine erano stati rilevati in modo efficace. I

valori ottenuti con il campionamento mobile tendevano a sovrastimare quelli ARPAE mediamente di circa il 23% (media di 9,9 vs 8,0 µg/m³), in accordo con l'ipotesi che le misurazioni effettuate in prossimità della sede stradale e all'altezza delle vie respiratorie dei ciclisti intercettassero concentrazioni di particelle superiori rispetto ai sensori fissi collocati in posizione sopraelevata. Le distribuzioni risultavano statisticamente simili (Kolmogorov-Smirnov, p = 0,31).
Per il PM10, il confronto con i dati ARPAE ha evidenziato una correlazione debole (r = −0,16 ai Viali; r = 0,30 al Parco rispetto alla stazione di Via Chiarini), con differenze significative tra i valori medi misurati ai Viali (Wilcoxon, p = 0,022). Tuttavia, era importante considerare che i dati ARPAE relativi al PM10 erano ottenuti mediante un approccio metodologico differente, basato su misurazioni effettuate nell'arco dell'intera giornata e non soltanto in specifiche fasce orarie. Pertanto, queste analisi sono state presentate esclusivamente come riferimento indicativo.

2.4.2 Polline

Il campionatore volumetrico ARPAE di tipo Hirst raccoglieva campioni continui nell'arco delle 24 ore a un'altezza di circa 15–20 m dal suolo, mentre i vetrini montati sulle biciclette intercettavano la deposizione pollinica all'altezza dei ciclisti durante due sessioni distinte al giorno. Queste differenze metodologiche fondamentali spiegavano l'ampia discrepanza quantitativa osservata: i valori medi giornalieri rilevati durante la campagna erano pari a 14,4 granuli/m³ al Parco e 26,4 granuli/m³ ai Viali, rispetto ai 185 granuli/m³ registrati dalla stazione ARPAE negli stessi giorni, con una differenza compresa tra 7 e 13 volte. Anche in questo caso, il confronto è stato discusso esclusivamente come indicazione generale e non come test di validazione della campagna di campionamento pollinico.
Dal punto di vista qualitativo, i campioni raccolti in entrambe le aree condividevano con la stazione ARPAE tre tipi pollinici dominanti: Poaceae, Pinus e Quercus. Tuttavia, la campagna ha rilevato anche 29 taxa del tutto assenti nei dati ARPAE, comprese specie ornamentali quali *Aesculus hippocastanum* L., *Tilia* spp., *Ginkgo biloba* L. e *Liquidambar styraciflua* L.
Questo profilo pollinico "peri-ciclista" era una conseguenza diretta del campionamento effettuato a livello stradale, dove gli alberi ornamentali piantati localmente, potenzialmente non rilevati dalle stazioni di monitoraggio sopraelevate, contribuivano in misura rilevante all'ambiente allergenico sperimentato dai ciclisti urbani.
In particolare, Plantago mostrava una buona corrispondenza quantitativa tra i dati della campagna e quelli ARPAE: presso il Parco sono stati rilevati 46 granuli/m³, rispetto ai 74 granuli/m³ registrati da ARPAE, con un rapporto pari a 0,62. Questo risultato suggeriva che le specie erbacee di bassa statura, localizzate in prossimità del suolo, fossero particolarmente ben rappresentate nel campionamento effettuato all'altezza dei ciclisti.
Un risultato anomalo era rappresentato dall'elevata concentrazione di *Olea europaea* L. rilevata ai Viali, pari a 29,2 granuli/m³ rispetto ai 10 granuli/m³ registrati da ARPAE. Questo dato suggeriva la presenza, lungo il percorso ciclabile, di una sorgente locale particolarmente intensa di polline di olivo, non rappresentata dalla stazione regionale di monitoraggio. Tuttavia, poiché gli olivi non erano presenti nel censimento effettuato entro la fascia di 15 metri, era probabile che si trovassero all'interno di giardini privati.

2.5 Risassunto dei risulatti principali

Variabile	Confronto	Risultato	Significatività
PM2.5	Mattino vs pomeriggio (complessivamente)	Più alto di mattina (13.0 vs 8.7 µg/m³)	p = 0.007 **
PM2.5	Parco vs Viali (complessivamente)	Nessuna differenza	p = 0.844 ns
PM2.5	Mattino vs pomeriggio ai Viali	Più alto di mattina (14.5 vs 9.5 µg/m³)	p = 0.014 *
PM2.5	Mattino vs pomeriggio al Parco	Più alto di mattina (13.6 vs 8.7 µg/m³)	p = 0.006 **
VOC & CO_2	Mattino vs pomeriggio ai Viali	Più alto di pomeriggio (picco di traffico)	p < 0.005 **
CO_2	Parco vs Viali (solo al pomeriggio)	Più alto ai Viali	p = 0.010 *
Polline	Mattino vs pomeriggio (complessivamente)	Più alto di mattina (14.5 vs 10.4 grains/m³)	p = 0.023 *
Polline	Parco vs Viali (complessivamente)	Nessuna differenza	p = 0.25 ns
Polline	Mattino vs pomeriggio ai Viali	Più alto di mattina (15.2 vs 6.8 grains/m³)	p = 0.038 *
Polline	Mattina, Parco vs Viali	Più alto sui Viali (8.9 vs 20.3 grains/m³)	p = 0.026 *
Shannon diversity	Parco vs Viali	Più alto sui Viali	p = 0.043 *
Composizione pollinica	Interazione Area × Time	Differenziazione significativa della comunità	p = 0.004 **

***Tabella 3**: La tabella riporta i principali risultati statistici complessivi.*

3. Conclusioni

SALUTE! ha dimostrato che era possibile rilevare differenze significative nell'esposizione dei ciclisti sia al particolato atmosferico sia ai pollini allergenici tra percorsi ciclabili urbani e periurbani di Bologna. Tali differenze risultavano tuttavia fortemente modulate dalla fascia oraria e, nel caso del PM2,5, dalle condizioni meteorologiche più che dalla sola intensità del traffico locale.

I Viali, corrispondenti al percorso ad alto traffico lungo la circonvallazione interna, erano caratterizzati da carichi pollinici mattutini più elevati, maggiore diversità pollinica, un profilo diurno dell'inquinamento più complesso, con elevate concentrazioni pomeridiane di VOC e CO_2, e un

assemblaggio pollinico più ricco, dominato da Platanus. Il Parco presentava invece un profilo di esposizione giornaliera più stabile e un numero inferiore di tipi pollinici.

Il censimento pollinico effettuato all'altezza dei ciclisti ha rilevato una biodiversità del polline aerodisperso sostanzialmente diversa da quella registrata dalla rete regionale, individuando 29 tipi aggiuntivi, comprese specie ornamentali urbane completamente assenti dal monitoraggio volumetrico standard, ma in grado di contribuire direttamente al carico allergenico a cui erano esposti i ciclisti.

4. Appendice

Allegato 1: Specie presenti entro la fascia di 15 metri e corrispondente numero di individui al Parco (a sinistra) e ai Viali (a destra).

Specie (Parco)	**N of individ.**
Celtis australis	53
Cupressus sempervirens	30
Tilia cordata	27
Fraxinus angustifolia	27
Ailanthus altissima	26
Quercus robur	14
Robinia pseudoacacia	14
Carpinus betulus 'Fastigiata'	14
Tilia intermedia	13
Fraxinus excelsior	12
Pyrus calleriana "chanticlaire"	11
Acer campestre	11
Thuia orientalis	10
Fraxinus ornus	10
Pinus nigra	9
Populus nigra	8
Ulmus carpinifolia (campestre)	7
Populus alba	6
Prunus cerasifera (var. Pissardi)	6
Platanus acerifolia	5
Ficus carica	4
Cedrus deodara	4
Acer negundo	4
Cedrus atlantica	4
Celtis rugosa (Trema rugosa)	3
Populus hybrida	3
Quercus petraea	3
Acer pseudoplatanus	3
Libocedrus decurrens	3
Ulmus pumila (siberiano)	2
Aesculus hippocastanum	2
Sambucus nigra	2
Populus nigra 'Italica'	2
Populus canescens	2
Prunus sp	2
Broussonetia papyrifera	2
Fraxinus intermedia	1
Gleditschia triacanthos	1
Ulmus laevis	1
Acer platanoides	1
Catalpa bignoniodes	1
Malus domestica	1

Specie (Viali)	**N of individ.**
Aesculus hippocastanum	361
Platanus acerifolia	313
Parrottia persica	43
Gleditschia triacanthos 'Sunburst'	38
Fraxinus oxycarpa Raywood	29
Celtis australis	28
Zelkova serrata	11
Sophora japonica	1
Cupressus sempervirens	1
Photinia x fraseri 'Red Robin'	1
Total	**826**

Lagestroemia indica	1
Salix sp.	1
Juglans regia	1
Prunus domestica	1
Ligustrum sp.	1
Total	**369**