

# Monitoring and georeferencing of personal exposure to atmospheric particulate

## Monitoraggio e georeferenziazione dell'esposizione personale a particolato atmosferico

Luca Del Buono<sup>1</sup>, Davide Campagnolo<sup>1</sup>, Marta Keller<sup>1</sup>, Andrea Spinazzè<sup>1,\*</sup>, Sabrina Rovelli<sup>1</sup>, Francesca Borghi<sup>1</sup>, Andrea Cattaneo<sup>1</sup>, Valentina Bollati<sup>2</sup>, Domenico Maria Cavallo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze Cliniche e di Comunità, Università degli Studi di Milano

\*Corresponding author:

Andrea Spinazzè, Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria, Via Valleggio, 11 - 22100 Como, Italy; Ph. + +39 031 2386629, Fax. + +39 031 2386630, e-mail: andrea.spinazze@uninsubria.it

Exposure to airborne particulate matter (PM) in urban environments is characterized by high spatial and temporal variability, due to the interaction of anthropic and environmental factors. The aim of this study was to develop a protocol for continuous monitoring of personal exposure to PM and for the contextual analysis of the position of selected subjects for short urban routes. The personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> of selected subjects was determined by a direct-reading instrument (photometer), associated with a GPS system, to geo-reference of the exposure data along each individual path. The results - here referred specifically to two of the monitored subjects - showed that the proposed approach allows to analyze the time course of exposure to PM, and thus to precisely identify and quantify possible exposure peaks. This approach, if applied to a wider number of subjects, would allow to analyze the spatial variability of PM in the investigated area, and hence to identify possible hot-spots of PM exposure in the urban area and low-impact paths for personal exposure to PM.

**Key words:** Personal exposure; PM<sub>2.5</sub>; PM<sub>10</sub>; GPS; georeferencing

L'esposizione della popolazione a particolato atmosferico aerodisperso (PM) in ambienti urbani è caratterizzata da elevata variabilità spaziale e temporale, dovuta all'interazione di fattori antropici e ambientali. Obiettivo del presente studio è stato quello di sviluppare un protocollo per il monitoraggio in continuo dell'esposizione personale a PM e per la contestuale analisi della posizione di una popolazione di soggetti selezionati, per brevi tragitti percorsi in ambito urbano. L'esposizione personale a PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub> dei soggetti selezionati è stata determinata mediante uno strumento a lettura diretta (fotometro), associato a un sistema GPS, per la successiva elaborazione in ambiente georeferenziato dei singoli percorsi effettuati. I risultati - qui riferiti in particolare a due soggetti - dimostrano che l'approccio proposto in questo studio consente di analizzare l'andamento temporale dell'esposizione a PM, e quindi di individuare e quantificare eventuali picchi di esposizione in maniera puntuale e specifica. Più in generale questo approccio, applicato su una più ampia popolazione di soggetti, consentirebbe di analizzare la variabilità spaziale delle concentrazioni di PM nell'area di studio e quindi di individuare i possibili punti critici in termini di esposizione a PM nell'area di urbana e percorsi a minor impatto per l'esposizione personale a PM.

### Introduzione

Numerosi studi hanno dimostrato che l'esposizione acuta o cronica a particolato atmosferico aerodisperso (PM) può essere associato all'insorgenza di effetti avversi sulla salute, e in modo particolare a malattie cardiovascolari e respiratorie [Schwartz e Marcus, 1990; Dockery et al., 1993; Pope et al., 2004; Silibello et al., 2008; Brook et al., 2010; Stafoggia et al., 2013; Raaschou-Nielsen et al., 2016; Cohen et al., 2017]. Ulteriori ricerche si sono quindi concentrate sullo studio dei possibili meccanismi di azione e dei principali fattori di suscettibilità della popolazione associati all'insorgenza di effetti sulla salute connessi all'esposizione a PM [Raposo e Stoorvogel, 2013; Bollati

et al., 2014; Adam et al., 2015; Rodosthenous et al., 2016; Motta et al., 2016; Bonzini et al., 2017]. Di particolare interesse è l'esposizione a PM in ambienti urbani, poiché questa generalmente caratterizzata da elevata variabilità spaziale e temporale [Moore et al., 2009; Hudda et al., 2010; Spinazzè et al., 2013], dovuta all'interazione di diversi fattori antropici (ad es. volume e tipologia di traffico, tessuto urbano) e ambientali (es. variabili meteorologiche) [Ragetti et al., 2013; Rivera et al., 2012]. A questo proposito è bene notare che la mobilità della popolazione generale in ambiente urbano introduce un ulteriore fattore di variabilità, capace di determinare in maniera rilevante l'esposizione a inquinanti aerodispersi [Dons et al., 2011; Tchepel e Dias, 2011].

Proprio a causa di questi fattori di variabilità spaziale e temporale, le stazioni di monitoraggio fisse non sono in grado di caratterizzare la distribuzione dell'inquinamento nell'ambito di un'area urbana [Kaur et al., 2007], introducendo così possibili errori significativi nella stima dell'esposizione [Adams et al., 2001; Gulliver e Briggs, 2004]. Per i motivi sopracitati, l'utilizzo di dispositivi di misura portatili rappresenta una soluzione efficiente per la caratterizzazione dell'esposizione a inquinanti aerodispersi con un'elevata risoluzione spaziale e temporale [Peters et al., 2013; Ragetti et al., 2013], per costruire mappe di concentrazione degli inquinanti atmosferici [Zhu et al., 2008], o per caratterizzare i contributi locali all'inquinamento atmosferico e per sviluppo di modelli di esposizione [Ragetti et al., 2014; Zwack et al., 2011]. L'accurata determinazione a livello personale dei livelli di esposizione a inquinanti aerodispersi rappresenta in questo ambito una tematica di estrema rilevanza [Steinle et al., 2013], soprattutto se combinata all'analisi delle modalità di spostamento degli individui, coadiuvata da sistemi di posizionamento (ad es. tecnologia GPS - Global Positioning System), per la successiva interpretazione dei profili di esposizione [Song et al., 2010; Dias e Tchepel, 2014]. Obiettivo del presente studio è stato quello di sviluppare un protocollo per il monitoraggio in continuo dell'esposizione a PM e per la contestuale analisi della posizione di una popolazione di soggetti selezionati. Tale studio è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca "SPHERE" (<http://users.unimi.it/sphere/>) che si propone di valutare le possibili associazioni tra esposizione a PM e specifici marker biologici ed epigenetici [Bollati et al., 2014; Motta et al., 2016; Bonzini et al., 2017].

## Materiali e metodi

### Monitoraggio dell'esposizione

Un campione di volontari reclutati tra i soggetti partecipanti al progetto SPHERE, è stato coinvolto nello sviluppo del protocollo di monitoraggio dell'esposizione a PM. Ai soggetti è stato chiesto di trasportare uno strumento portatile per il monitoraggio delle concentrazioni di  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  (particelle aerodisperse con diametro aerodinamico  $\leq 2,5$  e  $\leq 10 \mu m$ , rispettivamente). Il monitoraggio di ogni soggetto ha coperto un periodo di tempo variabile tra pochi minuti e alcune ore (28 - 221 minuti), nella fascia mattutina: la strumentazione di misura veniva avviata dal soggetto stesso al momento del risveglio, e veniva ritirata durante un appuntamento prefissato nel corso della stessa mattina, presso un ambulatorio dell'Ospedale Maggiore Policlinico di Milano, dove i soggetti si recavano per l'effettuazione di una visita medica e di un prelievo ematico. La misura dell'esposizione intendeva dunque coprire in maniera particolare il periodo di tempo comprendente il tragitto domicilio-ambulatorio, oltre che un periodo di tempo speso in un ambiente indoor domestico (il domicilio del soggetto). La strumentazione è stata consegnata al domicilio dei soggetti il giorno prima del monitoraggio ad

opera di un operatore specializzato, che ha provveduto contestualmente a fornire ai volontari le istruzioni necessarie alla conduzione del monitoraggio. La determinazione in continuo (frequenza 1 dato/minuto) dei livelli di esposizione personale a  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$ , è stata effettuata utilizzando un fotometro (Aerocet 831 - Met One Instruments Inc., Grant Pass, Oregon, USA; accuratezza  $\pm 10\%$  rispetto l'aerosol usato per la calibrazione), in grado di classificare il PM in 5 classi dimensionali ( $PM_1$ ;  $PM_{2,5}$ ;  $PM_4$ ;  $PM_{10}$ ; TSP). Lo strumento è stato modificato in modo tale da poter eseguire un monitoraggio personale (ovvero effettuando il prelievo dell'aria presso la zona respiratoria del soggetto), come mostrato in Figura 1. È necessario tuttavia notare che sensori e strumenti portatili per la misura in continuo della concentrazione di PM, UFP sono in genere caratterizzati da prestazioni di misura peggiori rispetto alle corrispondenti tecniche standard di riferimento [Buonanno et al., 2011]; tuttavia, le prestazioni dello strumento utilizzato per questo studio sono state valutate in condizioni reali in un recente studio, [Spinazzè et al., 2017]. I risultati di tale studio mostrano che nel complesso le concentrazioni di  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  misurate dallo strumento in oggetto sono comparabili a quelle ottenute con strumenti di misura di riferimento (per analisi gravimetrica del particolato), pur mostrando un certo grado di sovrastima nella misura (considerato comunque accettabile), che può essere attribuita a diversi fattori, quali le differenti proprietà chimico-fisiche (es. composizione, densità, forme irregolari delle particelle, distribuzione dimensionale) del PM urbano rispetto a quelle definite dai fattori di calibrazione dello strumento), oltre che a fattori relativi all'ambiente in cui viene effettuata la misura (es. umidità relativa) [Spinazzè et al., 2017]. La registrazione dei percorsi "domicilio-ambulatorio" effettuati dai soggetti, è stata effettuata mediante un sistema GPS (GT 730 FL; Can, more Electronics Co, LTD, Hsinchu County, Taiwan), impostato per la determinazione della posizione con frequenza di un 1 dato ogni 10 secondi.

### Elaborazione dei dati

I percorsi "domicilio-ambulatorio" registrati con il sistema GPS, sono stati elaborati in ambiente georeferenziato mediante apposito software (ArcGIS 9.3, ESRI, Redlands, California, USA). Operazione preliminare a tale elaborazione, è stata la creazione di un database nel quale a ciascun valore di esposizione misurato, sono state associate le coordinate spaziali registrate dal GPS. Data la differente frequenza di acquisizione dei due sistemi utilizzati (Aerocet e GPS), è stato deciso di associare al valore di esposizione misurato le coordinate GPS rilevate nell'istante più prossimo. Nel database sono stati inseriti solamente i tracciati completi (13 su 57 soggetti). È bene notare infatti che a causa della perdita di segnale (ad esempio soste prolungate in ambienti chiusi o mal funzionamento del sistema GPS), non per tutti i soggetti monitorati è stato possibile ottenere un tracciato completo del percorso effettuato. L'elaborazione tramite software GIS, ha permesso quindi di

costruire delle mappe utili ad evidenziare la variabilità spaziale dell'esposizione, individuare i valori di picco e discriminare i potenziali determinati. In tal senso, sono stati prelevati dai database cartografici di Regione Lombardia (<http://www.geoportale.regione.lombardia.it/downloaddati>) e del Comune di Milano (<http://geodata.sitmilano.opendata.arcgis.com/>) ulteriori elementi georeferenziati da inserire nelle mappe (ad esempio: rete stradale principale e secondaria, rete ferroviaria, varchi "area C", parchi e giardini pubblici, aree residenziali).

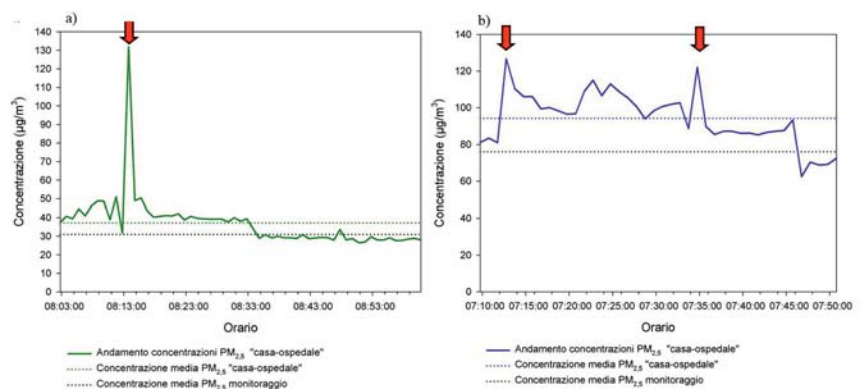


**Figura 1:** Strumentazione per il monitoraggio dell'esposizione: (a) strumento per la misura in continuo delle concentrazioni di PM (Aerocet 831), (b) sistema GPS miniaturizzato; (c) strumentazione modificata per esecuzione di campionamento personale (prelievo in zona respiratoria)

## Risultati e discussione

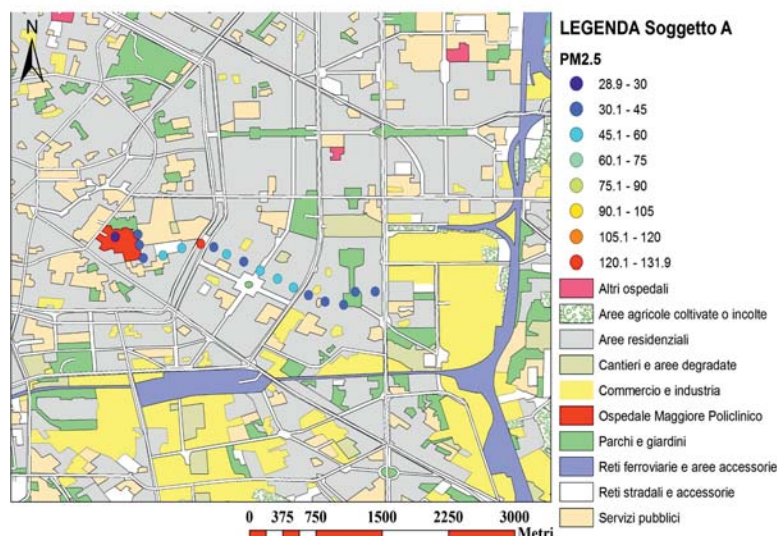
Lo studio è stato condotto da novembre 2015 a aprile 2016 e ha previsto il monitoraggio di 59 soggetti. Di questi, solo per 13 soggetti è stato possibile ricavare un tracciato completo del percorso effettuato. Per brevità, in questo caso studio verranno presentati e discussi solamente i risultati inerenti l'esposizione a  $PM_{2,5}$  di due soggetti (A e B). Tali soggetti hanno utilizzato modalità di spostamento differenti, ed in particolare spostamenti in bicicletta (soggetto A) e con mezzo pubblico (soggetto B). In Figura 2 sono stati rappresentati i profili di esposizione in continuo e il valore medio di esposizione a  $PM_{2,5}$  registrati dai due soggetti durante il tragitto "domicilio-ambulatorio". Gli indicatori rossi presenti sui due grafici riportati in Figura 2 identificano due eventi di picco per il soggetto B e uno per il soggetto A. È possibile quantificare il picco del sog-

getto A in  $132 \mu g \cdot m^{-3}$ , mentre i due eventi registrati dal soggetto B rispettivamente a  $127 \mu g \cdot m^{-3}$  e  $121 \mu g \cdot m^{-3}$ . Come atteso, per entrambi i soggetti le concentrazioni medie riferite al tragitto "domicilio-ambulatorio" ( $PM_{2,5}$  soggetto A:  $37 \pm 14 \mu g \cdot m^{-3}$ ; soggetto B:  $94 \pm 15 \mu g \cdot m^{-3}$  e  $PM_{10}$  soggetto A:  $88 \pm 75 \mu g \cdot m^{-3}$ ; soggetto B:  $230 \pm 103 \mu g \cdot m^{-3}$ ), risultano essere superiori rispetto alle medie riferite al monitoraggio completo, comprendente anche un periodo di tempo trascorso in ambienti indoor ( $PM_{2,5}$  soggetto A:  $31 \pm 14 \mu g \cdot m^{-3}$ ; soggetto B:  $76 \pm 15 \mu g \cdot m^{-3}$  e  $PM_{10}$  soggetto A:  $80 \pm 46 \mu g \cdot m^{-3}$ ; soggetto B:  $158 \pm 83 \mu g \cdot m^{-3}$ ). In prima analisi, è plausibile affermare che nel corso del tragitto "domicilio-ambulatorio" i soggetti siano venuti a contatto con sorgenti di emissione tipiche dell'ambiente urbano (es. traffico veicolare), oppure che alcuni aspetti relativi alle attività del soggetto (es. esposizione a fumo di sigaretta o a fumo passivo, scelta del percorso) abbiano contribuito a determinare livelli superiori di esposizione dei soggetti alla frazione più fine del particolato. Osservando le differenze tra i livelli medi di esposizione dei soggetti, il soggetto B è quello che mostra entrambi i livelli di esposizione media maggiori. Tale soggetto ha utilizzato un mezzo pubblico per spostarsi e, come evidenziato dalla letteratura scientifica, questo può avere contribuito ad aumentarne l'esposizione personale a particolato atmosferico [Adams et al., 2001; Lonati et al., 2011; Colombi et al., 2013; Dias e Tchepel, 2014; Karanasiou et al., 2014; Suárez et al., 2014]. Infatti, l'attesa del mezzo alla pensilina a bordo strada, l'affollamento del mezzo (soprattutto negli orari di punta), la vetustà e l'alimentazione dei mezzi di trasporto e le emissioni da traffico veicolare, sono alcuni dei fattori determinanti che possono avere incrementato i livelli di esposizione del soggetto B durante il suo percorso.



**Figura 2:** Esposizione a  $PM_{2,5}$  per i soggetti A (grafico a) e B (grafico b): (i) concentrazioni registrate con frequenza di un minuto durante il tragitto domicilio-ambulatorio (linea continua); (ii) concentrazione media del tragitto "domicilio-ambulatorio" (linea tratteggiata colorata); (iii) concentrazione media riferita all'intero periodo di monitoraggio (linea tratteggiata nera); (iv) eventi di picco di esposizione (freccette rosse)

Al contrario, il soggetto A, che ha utilizzato come mezzo di trasporto la bicicletta, mostra livelli di esposizione mediamente inferiori (pari a circa la metà) rispetto al soggetto B. Una spiegazione di questa differenza nel livello di esposizione potrebbe essere appunto legata al fatto che l'utilizzo della bicicletta permette di effettuare una scelta di tragitto migliore (e quindi utile a evitare gli ingorghi dovuto al traffico, a attraversare zone chiuse al traffico veicolare oppure prendere strade secondarie meno trafficate), incrementando così la distanza dalla sorgente di emissione traffico e riducendo il tempo trascorso a contatto con tale fonte di PM [Adams et al., 2001; Panis et al., 2010; Lonati et al., 2011; Colombi et al., 2013; Karamasiou et al., 2014; Suàrez et al., 2014; Carteni et al., 2015]. Oltre alle differenze registrate nei livelli di esposizione misurati, è bene considerare che altri fattori possono determinare differenze sostanziali nell'impatto sulla salute, proprio in funzione della tipologia di spostamento utilizzata; ad esempio, tra i fattori che influenzano l'esposizione dei soggetti che scelgono una modalità di trasporto "passiva" (auto, mezzo pubblico) o una modalità di trasporto "attiva" (ciclisti e pedoni), il più importante è della frequenza respiratoria e del volume corrente che aumenta il volume totale inalato per questi ultimi soggetti. In secondo luogo, per la stessa quantità inalata, la quantità di particelle che rimane nel tratto respiratorio è maggiore durante lo svolgimento di un'attività fisica, a causa dell'aumentata deposizione [Int Panis et al., 2010]. La georeferenziazione dei valori di esposizione misurati, ha permesso di avvalorare queste ipotesi e di ricavare inoltre informazioni sulla localizzazione dei picchi di esposizione (evidenziati in Figura 2) e sulla variazione di concentrazioni di esposizione nello spazio. Le Figure 3 e 4 rappresentano i tragitti domicilio-ambulatorio percorsi dai soggetti, e il valore di esposizione ad essi associati. Le coordinate registrate dal percorso sono state rappresentate mediante simboli geometrici ai quali è stata associata una scala di colori che corrisponde a sua volta ad un range di concentrazioni di  $PM_{2,5}$  misurate in quella posizione. Nella Figura 3 il valore massimo di esposizione registrato per il soggetto A, che si è spostato usando la bicicletta, è indicato con il cerchio rosso. Esso è collocato in corrispondenza di una strada a due corsie per senso di marcia e ad alta intensità di traffico veicolare. Attraverso questa semplice interpretazione a posteriori, tale valore di picco è stato ricondotto alle emissioni dei veicoli in marcia e fermi al semaforo, nel momento in cui il soggetto ha attraversato quest'area. Oltre al valore di picco di esposizione, è interessante osservare i livelli di esposizione misurati all'inizio del percorso effettuato dal soggetto A: essi sono tra i livelli più bassi registrati, e sono



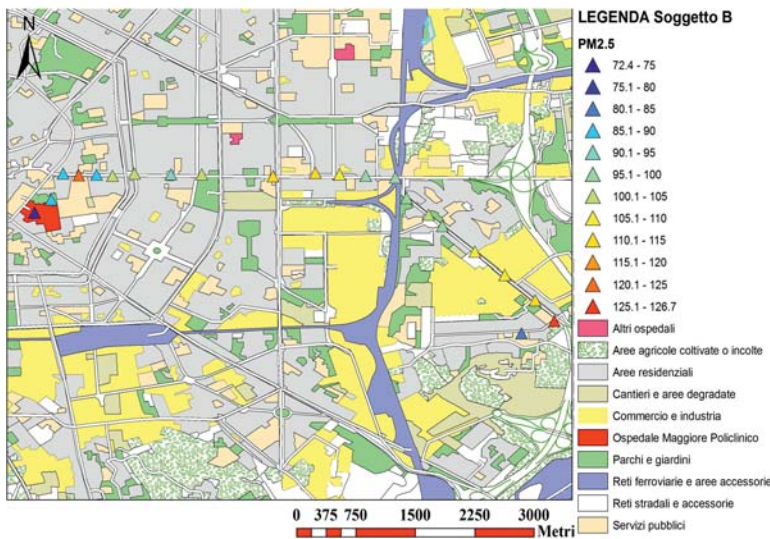
**Figura 3:** Mappa del percorso "casa-ospedale" soggetto A - il percorso è rappresentato mediante simboli geometrici (cerchi), la cui variazione di colore indica il valore di esposizione a  $PM_{2,5}$  registrato a quelle coordinate

stati registrati durante l'attraversamento di un'area verde (parco o giardino). Per il soggetto B, che si è spostato usando mezzi di trasporto pubblici, sono stati registrati due picchi di esposizione. Il primo si è verificato all'inizio del percorso, mentre il secondo a circa 400 metri dall'area dell'ospedale (Figura 4). Verosimilmente, i due picchi di esposizione si sono verificati presso le pensiline di attesa del mezzo pubblico, poco prima di salire e subito dopo la discesa dal mezzo. È dunque ipotizzabile che tali picchi di esposizione siano dovuti prevalentemente alla vicinanza della sorgente traffico veicolare. Entrambe le pensiline sono collocate in prossimità di vie di transito contraddistinte da volume di traffico elevato. A supporto di questa affermazione, si può osservare come i valori di esposizione successivi, mostrino un netto trend in diminuzione rispetto ai valori di picco, evidente in modo particolare dopo il secondo picco. In quest'ultimo caso, il soggetto, per raggiungere l'ospedale attraversa una strada secondaria a senso unico e una via pedonale: la scelta di percorrere questo tratto sembra avere mitigato l'esposizione dovuta alla componente traffico veicolare. La metodologia messa a punto, consente dunque di misurare in continuo l'esposizione personale a diverse frazioni di PM in ambiente urbano e di transito. È evidente che il successivo approfondimento dello studio di esposizione mediante analisi geospaziale, come presentata in questo caso studio, rappresenta un metodo di analisi preliminare per l'analisi dei profili di esposizione personale e per la definizione di potenziali determinanti dell'esposizione della popolazione oggetto di studio. In tal senso, un utile complemento per l'interpretazione dei livelli di esposizione sarebbe l'utilizzo di un "diario delle attività" per permettere al soggetto di indicare le attività svolte o eventi particolari acca-

duti nel corso del monitoraggio. L'estensione del protocollo qui presentato a una popolazione più ampia, e quindi l'ottenimento di un volume maggiore di dati georeferenziati, consentirebbe l'utilizzo di altre tecniche di analisi dei dati (es. Kriging, Land Use Regression Models), e quindi di ottenere analisi di maggior dettaglio [Cattani et al., 2017; Grana et al., 2017; Van Den Bossche; 2018] questo potrebbe consentire di individuare i possibili punti critici in termini di esposizione a PM nell'area di urbana e quindi percorsi a minor impatto per l'esposizione personale a PM.

### Finanziamento

Lo studio presentato in questo articolo è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca "SPHERE" (<http://users.unimi.it/sphere/>). Il progetto è stato sostenuto da: "EU Programme "Ideas" (ERC-2011-StG 282413; Principal investigator Prof. Valentina Bollati).



**Figura 4:** Mappa del percorso "casa-ospedale" soggetto B - il percorso è rappresentato mediante simboli geometrici (triangoli), la cui variazione di colore indica il valore di esposizione a PM<sub>2,5</sub> registrato a quelle coordinate

### Conclusioni

L'approccio utilizzato in questo studio ha consentito di misurare l'esposizione a PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> di una popolazione di soggetti selezionati durante brevi tragitti effettuati in ambiente urbano. L'utilizzo di strumenti per il monitoraggio in continuo dell'esposizione a PM, ha permesso di visualizzare l'andamento temporale dell'esposizione e quindi di individuare e quantificare eventuali picchi di esposizione. L'utilizzo contestuale di un sistema GPS, ha permesso inoltre di monitorare la posizione dei soggetti nel corso dei rispettivi spostamenti, e quindi di geolocalizzare i livelli di esposizione dei soggetti monitorati. La possibilità di associare ad ogni valore di esposizione registrato le relative coordinate spaziali, e di elaborarle mediante software in ambiente georeferenziato, ha consentito di analizzare la variabilità spaziale delle concentrazioni di PM in diverse zone della città. Tramite la costruzione di mappe è infine stato possibile individuare in maniera specifica possibili determinanti dell'esposizione presenti lungo il percorso.

## Bibliografia

- Adam, M., Schikowski, T., Carsin, A. E., et al., 2015. *Adult lung function and long-term air pollution exposure. ESCAPE: a multicentre cohort study and meta-analysis*. Eur. Respir. J., **45** (1), 38 - 50.
- Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., McMullen, M.A.S., & Khandelwal, P., 2001. *Fine particle (PM<sub>2.5</sub>) personal exposure levels in transport microenvironments*. London, UK. Sci. Tot. Environ., **279** (1), 29 - 44.
- Bollati, V., Iodice, S., Favero, C., et al., 2014. *Susceptibility to particle health effects, miRNA and exosomes: rationale and study protocol of the SPHERE study*. BMC public health, **14** (1), 1137.
- Bonzini, M., Pergoli, L., Cantone, L., et al., 2017. *Short-term particulate matter exposure induces extracellular vesicle release in overweight subjects*. Environ. Res., **155**, 228 - 234.
- Brook, R.D., Rajagopalan, S., Pope, C.A., et al., 2010. *Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association*. Circulation, **121**, 2331 - 2378.
- Buonanno, G., Fuoco, F.C., Stabile, L., 2011. *Influential parameter on particle exposure of pedestrian in urban microenvironments*. Atmos. Environ., **45**, 1434 - 1443.
- Carteni, A., Cascetta, F., & Campana, S., 2015. *Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system*. Atmos. Environ., **101**, 328 - 337.
- Cattani, G., Gaeta, A., di Bucchianico, A.D.M., et al., 2017. *Development of land-use regression models for exposure assessment to ultrafine particles in Rome, Italy*. Atmos. Environ., **156**, 52 - 60.
- Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., 2017. *Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015*. The Lancet, **389** (10082), 1907 - 1918.
- Colombi, C., Angius, S., Gianelle, V., & Lazzarini, M., 2013. *Particulate matter concentrations, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system*. Atmos. Environ., **70**, 166 - 178.
- Dias, D., Tchepel, O., 2014. *Modelling of human exposure to air pollution in the urban environment: a GPS-based approach*. Environ. Sci. Pollut. Res., **21** (5), 3558 - 3571.
- Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., et al., 1993. *An association between air pollution and mortality in six US cities*. N. Engl. J. Med., **329** (24), 1753 - 1759.
- Dons, E., Panis, L.I., Van Poppel, M., et al., 2011. *Impact of time-activity patterns on personal exposure to black carbon*. Atmos. Environ., **45** (21), 3594 - 3602.
- Grana, M., Toschi, N., Vicentini, L., Pietroiusti, A., Magrini, A., 2017. *Exposure to ultrafine particles in different transport modes in the city of Rome*. Environ. Pollut., **228**, 201 - 210.
- Gulliver, J., Briggs, D.J., 2004. *Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments*. Atmos. Environ., **38**, 1 - 8.
- Hudda, N., Cheung, K., Moore, K.F., Sioutas, C., 2010. *Inter-community variability in total particle number concentrations in the Eastern Los Angeles air Basin*. Atmos. Chem. Phys., **10**, 11385 - 11399.
- Int Panis, L., De Geus, B., Vandenbulcke, G., et al., 2010. *Exposure to particulate matter in traffic: a comparison of cyclists and car passengers*. Atmos. Environ., **44** (19), 2263 - 2270.
- Karanasiou, A., Viana, M., Querol, X., Moreno, T., & de Leeuw, F., 2014. *Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities - Recommendations and policy implications*. Sci. Tot. Environ., **490**, 785 - 797.
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., 2007. *Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments (Review)*. Atmos. Environ., **41** (23), 4781 - 4810.
- Lonati, G., Ozgen, S., Ripamonti, G., Cernuschi, S., & Giugliano, M., 2011. *Pedestrian exposure to size-resolved particles in Milan*. J. Air. Waste Manag. Assoc., **61** (11), 1273 - 1280.
- Moore, K., Krudysz, M., Pakbin, P., Hudda, N., Sioutas, C., 2009. *Intra-community variability in total particle number concentrations in the San Pedro Harbor Area (Los Angeles, California)*. Aerosol. Sci. Technol., **43**, 587 - 603.
- Motta, V., Favero, C., Dioni, L., et al., 2016. *MicroRNAs are associated with blood-pressure effects of exposure to particulate matter: Results from a mediated moderation analysis*. Environ. Res., **146**, 274 - 281.
- Panis, L.I., De Geus, B., Vandenbulcke, G., et al., 2010. *Exposure to particulate matter in traffic: a comparison of cyclists and car passengers*. Atmos. Environ., **44** (19), 2263 - 2270.
- Peters, J., Theunis, J., Van Poppel, M., Berghmans, P., 2013. *Monitoring PM<sub>10</sub> and ultrafine particles in urban environments using mobile measurements*. Aerosol Air Qual. Res., **13** (2), 509 - 522.
- Pope, C.A., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Godleski, J.J., 2004. *Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution*. Circulation, **109** (1), 71 - 77.
- Raaschou-Nielsen, O., Beelen, R., Wang, M., 2016. *Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer*. Environ. Int., **87**, 66 - 73.
- Ragetti, M.S., Corradi, E., Braun-Fahrlander, C., et al., 2013. *Commuter exposure to ultrafine particles in different urban locations, transportation modes and routes*. Atmos. Environ., **77**, 376 - 384.
- Ragetti, M.S., Ducret-Stich, R.E., Foraster, M., Morelli, X., Aguilera, I., Basagañá, X., Corradi, E., Ineichen, A., Tsai, M.Y., Probst-Hensch, N., Rivera, M., Slama, R., Künzli, N., Phuleria, H.C., 2014. *Spatio-temporal variation of urban ultrafine particle number concentrations*. Atmos. Environ., **96**, 275 - 283.

- Raposo, G., & Stoorvogel, W., 2013. *Extracellular vesicles: exosomes, microvesicles, and friends*. J. Cell. Biol., **200** (4), 373 - 383.
- Rivera, M., Basagana, X., Aguilera, I., Agis, D., Bouso, L., Foraster, M., Medina-Ramon, M., Pey, J., Kunzli, N., Hoek, G., 2012. *Spatial distribution of ultrafine particles in urban settings: a land use regression model*. Atmos. Environ., **54**, 657 - 666.
- Rodosthenous, R.S., Coull, B.A., Lu, Q., et al., 2016. *Ambient particulate matter and microRNAs in extracellular vesicles: a pilot study of older individuals*. Part Fibre Toxicol., **13** (1), 13.
- Schwartz, J., & Marcus, A., 1990. *Mortality and air pollution in London: a time series analysis*. Am. J. Epidemiol., **131** (1), 185 - 194.
- Silibello, C., Calori, G., Brusasca, G., et al., 2008. *Modelling of PM<sub>10</sub> concentrations over Milano urban area using two aerosol modules*. Environ. Modell. Softw., **23** (3), 333 - 343.
- Song, C., Qu, Z., Blumm, N., Barabási, A.L., 2010. *Limits of predictability in human mobility*. Science, **327** (5968), 1018 - 1021.
- Spinazzè, A., Fanti, G., Borghi, F., et al., 2017. *Field comparison of instruments for exposure assessment of airborne ultrafine particles and particulate matter*. Atmos. Environ., **154**, 274 - 284.
- Spinazzè, A., Cattaneo, A., Garramone, G., Cavallo, D.M., 2013. *Temporal variation of size-fractionated particulate matter and carbon monoxide in selected microenvironments of the Milan urban area*. J. Occup. Environ. Hyg., **10**, 652 - 662.
- Stafoggia, M., Samoli, E., Alessandrini, E., et al., 2013. *Short-term associations between fine and coarse particulate matter and hospitalizations in Southern Europe: results from the MED-PARTICLES Project*. Environ. Health Perspect., **121**, 1026 - 1033.
- Steinle, S., Reis, S., Sabel, C.E., 2013. *Quantifying human exposure to air pollution-moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment*. Sci. Tot. Environ., **443**, 184 - 193.
- Suárez, L., Mesías, S., Iglesias, V., Silva, C., Cáceres, D.D., Ruiz-Rudolph, P., 2014. *Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile*. Environ. Sci. Process. Impact, **16** (6), 1309 - 1317.
- Tchepel, O., Dias, D., 2011. *Quantification of health benefits related with reduction of atmospheric PM<sub>10</sub> levels: implementation of population mobility approach*. Int. J. Environ. Health Res., **21** (3), 189 - 200.
- Van den Bossche, J., De Baets, B., Verwaeren, J., Botteldooren, D., Theunis, J., 2018. *Development and evaluation of land use regression models for black carbon based on bicycle and pedestrian measurements in the urban environment*. Environ. Modell. Softw., **99**, 58 - 69.
- Zhu, Y., Fung, D.C., Kennedy, N., Hinds, W.C., Eiguren-Fernandez, A., 2008. *Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a Mobile exposure system on Los Angeles freeways*. J. Air Waste Manage. Assoc., **58**, 424 - 434.
- Zwack, L.M., Paciorek, C.J., Spengler, J.D., Levy, J.I., 2011. *Characterizing local traffic contributions to particulate air pollution in street Canyons using Mobile monitoring techniques*. Atmos. Environ., **45**, 2507 - 2514.