

MISURARE L'INQUINAMENTO PER PROTEGGERE LE PERSONE VULNERABILI NELL'AMBIENTE ESTERNO

MONITORING POLLUTION TO PROTECT VULNERABLE PEOPLE IN OUTDOOR ENVIRONMENT

Luca Rampini

*Dottorando nel Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito; Politecnico di Milano; via Ponzio 31, 20133 Milano, Italia. Ingegnere civile. E-mail: luca.rampini@polimi.it
Ph.D. candidate in the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering; Politecnico di Milano, Civil Engineer. E-mail: luca.rampini@polimi.it*

Ania Khodabakhshian

*Dottorando nel Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito; Politecnico di Milano; via Ponzio 31, 20133 Milano, Italia. Construction Manager, E-mail: ania.khodabakhshian@polimi.it
Ph.D. candidate in the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering; Politecnico di Milano, Construction Manager. E-mail: ania.khodabakhshian@polimi.it*

Tiziana Poli

*Professore Ordinario di Architettura Tecnica nel Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito; Politecnico di Milano; via Ponzio 31, 20133 Milano, Italia. Dottore di Ricerca in Ingegneria Edile, Architetto. E-mail: tiziana.poli@polimi.it
Full Professor in Architectural Engineering in the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering; Politecnico di Milano, Ph.D. in building Engineering, Architect. E-mail: tiziana.poli@polimi.it*

Fulvio Re Cecconi

*Professore Associato di Produzione Edilizia nel Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito; Politecnico di Milano; via Ponzio 31, 20133 Milano, Italia. Dottore di Ricerca in Ingegneria Edile, Ingegnere civile. E-mail: fulvio.rececconi@polimi.it
Associate Professor in Building Production in the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering; Politecnico di Milano, Ph.D. in Building Engineering, Civil Engineer. E-mail: fulvio.rececconi@polimi.it*

Abstract

Slow Onset Disasters (SLODs), especially air pollution, have a severe negative effect on residents' lives, especially the vulnerable groups. Therefore, constant measurement of air quality factors and Particular Matters (PMs) can help take precautionary actions and mitigate the disease risks. PMs are conventionally measured by stationary monitors, which are not homogeneously distributed. Therefore, this research aims to propose a personal portable PM measuring device installed in multiple urban locations to record real-time data on PM concentration and monitor the air quality measures efficiently. The area near the department of Architecture, Built environment and Construction Engineering of Politecnico di Milano was selected as a case study.

Keywords

Slow Onset Disasters (SLODs), Particular Matters (PM), Portable Device, GPS sensor, Arduino

Introduzione e background

I disastri ad insorgenza lenta (SLODs) sono eventi a bassa intensità, continui e ad alta frequenza e si riferiscono a processi di degrado ambientale come la siccità, la desertificazione, l'aumento della salinizzazione, l'innalzamento del livello del mare o lo scioglimento del permafrost (Grenier, Lynn, e Zurynski 2009; Staupe-Delgado 2020). Le isole di calore, il fenomeno per cui le aree urbane sperimentano temperature dell'aria e della superficie più elevate rispetto ai dintorni rurali (Oke, 1982), e l'inquinamento atmosferico, causato da fattori come la costruzione e il consumo energetico degli edifici, i trasporti, i rifiuti (Rampini e Re Cecconi, 2020) rappresentano i casi più critici di SLODs, soprattutto nelle megalopoli e negli ambienti urbani densi (Farhadi, Faizi e Sanaieian, 2019).

L'inquinamento atmosferico è il rischio ambientale più significativo per la salute nell'Unione Europea (UE), come riportato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, causando circa 400.000 morti premature (Niemenmaa, 2018). Nel 2016, 374.000 e 14.600 morti premature non accidentali sono state attribuite all'inquinamento atmosferico (PM_{2,5} e O₃, rispettivamente) nei paesi dell'UE (Agenzia europea dell'ambiente, 2018). Pertanto, il monitoraggio della PM in tempo reale nelle aree urbane può giovare alla salute pubblica rilevando le aree inquinate e permettendo di organizzare azioni preventive per la salvaguardia della salute delle persone vulnerabili.

I cambiamenti climatici, come gli eventi di acqua fognaria e l'inquinamento atmosferico, hanno conseguenze gravi e a lungo termine per la salute pubblica come colpi di caldo, soffocamento, la BPCO e il cancro ai polmoni (LC), gli ictus, le malattie cardiache ischemiche (IHD) e la salute mentale, e potrebbero portare a migrazioni su larga scala e conflitti civili (Frumkin et al. 2008; Luber e McGeehin 2008; Lelieveld et al. 2015). Inoltre, l'esposizione al calore aumenta il rischio di malattie respiratorie (Michelozzi et al., 2005), ospedalizzazione e morte (Basu, 2009).

La percentuale di emissioni misura il livello di inquinamento dell'aria (ad esempio, ossidi di zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili non metanici) (Sicard et al., 2021), il particolato (PM) e il livello di O₃. Le particelle hanno dimensioni variabili da circa 2 nm a più di 100 µm e sono generalmente classificate in quattro categorie. Gli impatti sulla salute sono legati sia alle dimensioni che alla composizione (Russell e Brunekreef, 2009). Gli studi precedenti sono stati condotti sulle misurazioni della qualità dell'aria, concentrandosi principalmente sull'inquinamento urbano e sul rischio associato di mortalità/morbilità (Gurjar et al. 2010; Russell e Brunekreef 2009). Modelli regionali e globali a maggiore risoluzione, modelli di chimica atmosferica e circolazione generale, e dati satellitari sono applicati per migliorare le stime delle concentrazioni di PM e O₃ e il loro impatto sulla qualità dell'aria (Lelieveld et al., 2015).

L'analisi dei dati meteorologici regionali e del particolato (PM) è spesso utilizzata per stimare la qualità dell'aria e il tasso di mortalità, richiedendo una grande quantità di dati giornalieri in aree urbane (Organizzazione Mondiale della Sanità, 2014). Studi sulla PM sono stati condotti a Philadelphia e Toronto utilizzando la modellazione sinottica del clima basata su parametri regionali e temporali (Kalkstein et al. 1996; Cheng et al. 2008). L'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 2016 ha documentato il potenziale effetto dell'inquinamento dell'aria sul decadimento delle condizioni di salute e l'aumento della mortalità (Organizzazione Mondiale della Sanità, 2016). Inoltre, Merakli e Kucukyavuz (2020) hanno fornito un quadro matematico basato sui processi decisionali di Markov (MDP) per ridurre al minimo il rischio in un problema di gestione delle operazioni di soccorso umanitario durante gli SLODs (Merakli e Kucukyavuz, 2020). Infine, Cadena, et al. (2021) hanno condotto un'analisi del rischio su mesoscala all'aperto basata su più rischi per studiare gli effetti aggregati degli SLOD a Milano (Cadena et al., 2021).

Questa ricerca propone un dispositivo portatile personale che può misurare in tempo reale i dati del PM. Questo approccio adotta un processo di misurazione simile a quello che i monitor stazionari fanno convenzionalmente, e aiuterebbe a prendere azioni precauzionali per le persone vulnerabili, come gli anziani e i bambini. Questo nuovo approccio cerca di risolvere la limitazione della distribuzione poco diffusa delle stazioni sopramenzionate.

Introduction and background

Slow Onset Disasters (SLODs) relate to environmental degradation processes such as droughts and desertification, increased salinization, rising sea levels or thawing of permafrost, which are low intensity, continuous, and high frequency events (Grenier, Lynn, and Zurynski 2009; Staupel-Delgado 2020). Urban Heat Island, the phenomenon in which urban areas experience higher air and surface temperatures compared to rural surroundings (Oke, 1982), and air pollution, caused by factors such as construction, building operations, transportation, waste (Rampini and Re Cecconi, 2020) are of the most critical crisis of SLODs, especially in megacities and dense urban environments (Farhadi, Faizi and Sanaieian, 2019).

Air pollution is the most significant environmental risk to health in the European Union (EU), as reported by World Health Organization, causing about 400 000 premature deaths (Niemenmaa, 2018). In 2016, 374,000 and 14,600 non-accidental premature deaths were attributed to air pollution (PM_{2.5} and O₃, respectively) in the EU-28 countries (European Environment Agency, 2018). Therefore, real-time PM monitoring in urban areas can benefit public health in detecting polluted areas threatening vulnerable people's health and organizing preventative actions.

Climate change, such as severe weather events and air pollution, has serious and long-term consequences for public health like Heat Stress, Drowning, Vector-borne disease, COPD and lung cancer (LC), strokes, ischaemic heart disease (IHD), and mental health, and could even lead to large-scale migration and civil conflict (Frumkin et al. 2008; Luber and McGeehin 2008; Lelieveld et al. 2015). Moreover, exposure to heat increases the risk of respiratory illness (Michelozzi *et al.*, 2005), hospitalization and death (Basu, 2009).

Air pollution level is measured by the percentage of emissions (e.g., sulfur oxides, nitrogen oxides, non-methane volatile organic compounds) (Sicard *et al.*, 2021), particulate matters (PM), and O₃ level. Particles come in sizes ranging over four orders of magnitude from about 2 nm to larger than 100 µm, and health impacts are tied to both size and composition (Russell and Brunekreef, 2009). Previous studies were conducted on air quality measurements, mainly focusing on urban pollution and its associated Risk of Mortality/Morbidity (Gurjar et al. 2010; Russell and Brunekreef 2009). Enhanced resolution regional and global models, atmospheric chemistry–general circulation models, and satellite data are applied to improve PM and O₃ concentrations' estimates and their impact on air quality (Lelieveld *et al.*, 2015).

Analysis of regional weather data and Particulate Matter (PM) is used and referred for estimating air quality and mortality rate, requiring a large amount of daily data from dense urban areas (World Health Organization, 2014). Similar studies in Philadelphia and Toronto have been conducted using synoptic climate modeling based on Regional and temporal parameters (Kalkstein et al. 1996; Cheng et al. 2008). World Health Organization in 2016 reported on the air pollutants' concentration and predicted their potential effect on the decay of health condition and the increase in mortality (World Health Organization, 2016). Moreover, Merakli and Kucukyavuz (2020) provided a mathematical framework based on Markov Decision Processes (MDPs) to minimize the risk in an inventory management problem for humanitarian relief operations during a slow-onset disaster (Meraklı and Küçükyavuz, 2020). Cadena, et al. (2021) conducted an outdoor meso-scale multi-hazard-based risk analysis to study the aggregated effects of the SLODs in Milan (Cadena *et al.*, 2021).

This research proposed a personal portable device that can measure real-time PM data. This approach exhilarates the measurement process, which stationary monitors conventionally do, and would help take precautionary actions for vulnerable people, such as elderly and children. This novel approach will solve the time-consumption and sparse distribution limitation of conventional methods.

Metodi e strumenti

Lo scopo di questo studio è di proteggere le persone vulnerabili dai rischi derivanti dall'esposizione agli agenti inquinanti presenti nell'aria delle zone urbane. Pertanto, si è reso necessario introdurre un metodo che permettesse di misurare localmente la quantità di agenti inquinanti. La metodologia adottata per questo studio è divisa in tre parti principali: i) introduzione di un portatile ed economico sensore capace di misurare la concentrazione di PM in differenti luoghi, ii) la raccolta di dati sulla qualità dell'aria condotta nell'area vicina al dipartimento di Architettura, Gestione dell'Ambiente Costruito e Ingegneria delle Costruzioni del Politecnico di Milano, iii) elaborazione, visualizzazione, e discussione dei risultati ottenuti utilizzando lo strumento portatile.

Tale strumento è composto da quattro parti principali: la scheda principale, ovvero una Sparkfun RedBoard Turbo, e altre tre componenti. La PM è stata misurata usando il sensore SPS30 della Sensirion AG collegato alla scheda arduino e installato su di una scatola realizzata tramite stampante 3D che ha permesso di migliorare la portabilità e la sicurezza dei componenti (Figura 1). Le misurazioni del sensore si basano sulla diffusione laser e utilizzano una tecnologia innovativa di mitigazione dell'errore per consentire misurazioni di alta precisione. Il sensore può misurare la concentrazione in massa di particelle in un range da 0 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (nella Tabella 1 sono riportate brevemente le specifiche del sensore). La scheda Arduino registra valori di PM ogni 30 secondi. La posizione è riportata dall'antenna ADH-tech GP-735, la quale risulta essere una snella e performante antenna GPS con una precisione orizzontale di 2.5 metri. Il sensore GPS è stato montato su di uno Sparkfun Weather Shield direttamente collegato alla scheda principale. Inoltre, per codificare il flusso di dati NMEA inviati dall'antenna GPS la libreria è stata utilizzata TinyGPS++. Infine, le misurazioni sono state raccolte in una scheda SD connessa alla scheda principale tramite lo SparkFun microSD shield.

Il percorso utilizzato per la raccolta dati coprende scenari urbani differenti allo scopo di comprendere quali parametri possano influenzare la quantità di PM presente nell'atmosfera, in modo eventualmente di migliorarne le predizioni sull'andamento. Pertanto, all'interno del percorso ci sono strade principali molto trafficate, strade secondarie poco trafficate, e alcuni tratti all'interno di parchi. Inoltre, i dati sono stati raccolti in due orari diversi, ovvero alle 9 am e alle 11 am. Le concentrazioni di PM infatti, non dipendono soltanto dalla posizione geografica ma anche dalle attività che vengono svolte in un'area durante uno specifico orario. Per esempio, il traffico delle 9 am potrebbe essere maggiore considerando che molte persone si recano al lavoro intorno a quell'ora, mentre, per quanto riguarda i parchi, la concentrazione di persone dipende fortemente dalle pause concesse all'interno delle lezioni universitarie (essendo il parco frequentato principalmente da studenti). Pertanto, comprendere come cambia la concentrazione di PM durante la giornata aiuterebbe a capire i limiti entro cui i valori possono variare e, conseguentemente, intraprendere azioni per mitigare i rischi derivanti dalle concentrazioni di PM maggiori nelle ore di punta.

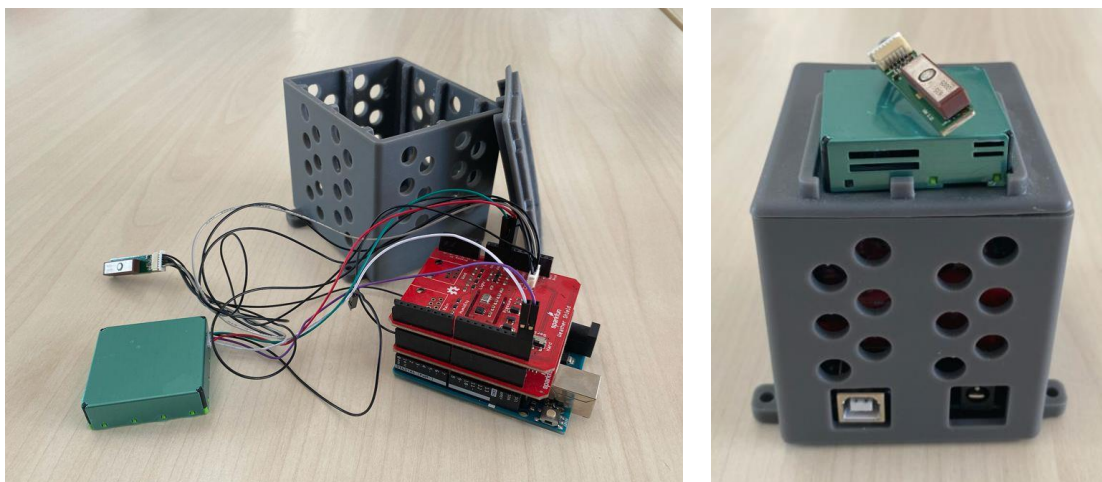


Figura 1. Il sensore di particolato costruito su piastra Arduino Uno
Figure 1. Particulate matter sensor based on an Arduino Uno board

Methods and tools

This study aims to protect vulnerable people from the hazards imposed by air pollution in urban areas. Therefore, it was essential to introduce a research approach that permitted the measurement of pollutants locally. The methodology adopted in this study is divided into three main steps: i) the introduction of a portable, low-cost sensor able to measure PM concentrations in different locations; ii) the collection of data about air quality conducted in the area near the department of Architecture, Built environment and Construction Engineering of Politecnico di Milano; iii) elaboration, visualization, and discussion of the results obtained with the portable device.

The adopted device comprised four main parts: the main board, i.e., the Sparkfun RedBoard Turbo, and three other components. PM was measured using the SPS30 sensor from Sensirion AG connected to an Arduino board and installed in a custom-made 3D printed box (Figure 1). Its measurement principle is based on laser scattering and uses innovative contamination-resistance technology to enable high precision measurements. The PM sensor has been equipped with a customized 3D printed case to protect the assembly and make it easily transportable across the city. The sensor can measure mass concentration in a range from 0 to 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and its main specifications are briefly summarized in Table 1. The Arduino board collects PM values every 30 seconds. The location is provided by ADH-tech GP-735, a slim, ultra-high performance GPS smart antenna with a 2.5 meters horizontal precision. The GPS sensor was mounted on a Sparkfun Weather Shield directly pinned to the main board. Moreover, the source code used the TinyGPS++ library to parse the NMEA data streams provided by the GPS module. Finally, the data collected were stored in an SD card, connected to the main board by the SparkFun microSD shield. All the components were placed in a tailored 3D printed box, which helped increase the device's portability.

The route selected for data collection included different urban and environmental scenarios to understand what parameters may influence any changes in the measurement of PM parameters. Indeed, the considered path involved principal streets with high cars and pedestrians, secondary streets with meager traffic, and some stretches inside parks. This variance in situations might help understand what proxy data may influence PM trends in cities, making predictions easier. Moreover, the data were collected at two different time frames, i.e., 9 am and 11 am. Indeed, the scenario where the measures are taken depends strongly not only on the geographical position but also on time. Indeed, areas can register a different PM concentration by looking at the activities performed during the day. For instance, the traffic observed at 9 am might be more extensive since more people get to work at that time than 11 am; whereas, inside the park, the concentration of people, especially students, may depend more on breaks or recreational activities. Consequently, understand the behavior of PM concentration during the day might help both defining the range of variability and handling solutions to mitigate the most significant concentration in rush hours.

Tabella 1. Riassunto delle specifiche del sensore Sensirion SPS30
Table 1. Overview of the Sensirion SPS30 specifications.

Parameter	Conditions	Values	Units
Mass concentration size range	PM1.0	0.1 to 1.0	μm
	PM2.5	0.3 to 2.5	μm
	PM4	0.3 to 4.0	μm
	PM10	0.3 to 10.0	μm
Mass concentration precision for PM1 and PM2.5	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	% m.v.
Mass concentration precision For PM4 and PM10	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 25	% m.v.

Risultati

Gli istogrammi in Figura 2 rappresentano la distribuzione dei dati raccolti per questa ricerca. Tale distribuzione è simile per ciascuna delle dimensioni considerate, specialmente per quelle maggiori, ovvero da 2.5 a 10 μm . Pertanto, considerando le soglie di misurazione del sensore riportate in Tabella 1, ciò significa che la maggior parte della PM ha dimensione da 0.1 a 2.5 μm . Inoltre, tutte le distribuzioni sono principalmente nella parte sinistra o destra del grafico. Questo significa che le concentrazioni di PM variano repentinamente quando il percorso passa da un'area trafficata ad una più tranquilla, senza che nel frattempo si raccolgano valori intermedi di PM.

La Figura 3 mostra la distribuzione geografica dei dati raccolti durante il tragitto. Per completare il percorso è necessaria più di un'ora, pertanto 111 registrazioni dei livelli di PM, per ciascuna dimensione, sono stati raccolti ad ogni tragitto. I cerchi rappresentano la somma dei quattro valori di PM, raccolti ogni 30 secondi, in cui la porzione rossa rappresenta la quantità di PM 1.0, l'arancione la PM 2.5, la verde la PM 4.0, e la blu la PM 10.0. Tale visualizzazione rende evidenti le differenze di PM tra le due finestre di tempo considerate: i cerchi più grandi sono stati misurati durante il percorso delle 9 am, mentre i più piccoli sono stati raccolti alle 11 am.

Infine, Figura 4 mostra la media geografica delle rilevazioni, ottenuta sommando i dati raccolti alle 9 am e alle 11 am dividendoli per il numero di misurazioni raccolte per ciascuna porzione del percorso. Questa visualizzazione aiuta ad identificare le differenti concentrazioni di PM tra le strade principali, solitamente con un valore più alto di PM, e le strade secondarie non affollate.

Discussioni e conclusione

Persone con problemi cardiovascolari e respiratori possono mostrare gravi sintomi in caso di prolungata esposizione ad alti livelli di PM. Le stazioni fisse possono misurare accuratamente i livelli di PM solo in determinate posizioni. Tali stazioni infatti, possono avvisare le fasce deboli della popolazione in caso di alta concentrazione di agenti inquinanti soltanto in zone limitrofe.

Pertanto, questo studio introduce uno strumento in grado di misurare i valori di PM localmente, a basso costo e portatile. I dati raccolti dal device mostrano un'interessante variazione dei livelli di PM causata principalmente da due fattori: i) la posizione, e ii) il tempo. Non sorprende che le strade più grandi e maggiormente trafficate presentino un valore di PM maggiore rispetto a quello misurato nei parchi e nelle strade secondarie. Tuttavia, l'influenza del fattore tempo nella concentrazione di PM è significativa tanto che persino le strade principali presentano un accettabile valore di PM alle 11 am, dovuto alla minore presenza di traffico.

Conseguentemente, a causa della evidente variabilità dei dati raccolti, risulta necessaria l'introduzione di un device personale che possa monitorare in tempo reale i valori di PM influenzati dalla combinazione dei fattori tempo e posizione. Difatti, ricreare la diffusione di PM partendo dai soli dati forniti dalle stazioni fisse non è possibile.

La soluzione proposta in questo studio necessita tuttavia di essere più accessibile se si vuole influenzare il comportamento delle persone vulnerabili e mitigare i rischi derivanti da una lunga esposizione agli agenti inquinanti. Infatti, il device introdotto non permette di leggere i dati in tempo reale direttamente tramite un'interfaccia grafica, poichè tali dati sono salvati direttamente sulla scheda SD. Pertanto, futuri sviluppi potranno includere l'introduzione di una interfaccia user-friendly, probabilmente nella forma di un'applicazione mobile, allo scopo di avvisare le fasce più deboli della popolazione in caso di condizioni pericolose, permettendogli di agire di conseguenza. Questo ulteriore passo permetterebbe agli utenti non esperti in materia di essere consapevoli dei rischi derivanti dall'inquinamento dell'aria senza che sia richiesta una conoscenza apposita sul tema.

Results

The histograms in Figure 2 represent the collection of data for this research. The distribution of PM is similar for every dimension of particulate considered, especially for the biggest, i.e., from 2.5 to 10 μm . Therefore, looking at the boundary values reported in Table 1, it means that a vast part of the particulate matter has a size from 0.1 to 2.5 μm . Moreover, all the distributions have the same patterns, having almost all the histograms' measurements in the left and right parts. This means that the PM concentration change suddenly when the path switches from a busy area to a quieter one since there are few intermediary values of PM between the two extremes.

Figure 3 shows the geographical distribution of data along the considered path. A single route took more than an hour to be completed; therefore, a total of 111 records were collected for each PM limit. The circles reported in Figure 3 represent the sum of the four PM measurements, taken every 30 seconds (the red portion is PM 1.0, orange is PM 2.5, green is PM 4.0, and blue is PM 10.0). The visualization clearly shows the different PM concentrations between the two time-frames analyzed: the most extensive circles pertain to the measures taken at 9 am, whereas the smallest one is taken at 11 am.

Finally, Figure 4 show the geographic average of the measurements, i.e., the sum of the data collected at 9 am and 11 am divided by the number of measurements taken for each geographic portion of the path. This visualization helps identify the different PM concentrations between principal roads with a higher PM level – and uncrowded secondary streets.

Discussions and conclusion

People with cardiovascular and respiratory diseases suffer in case of high PM concentrations. Stationary monitors can accurately measure PM levels only in fixed locations; therefore, they can warn vulnerable sections of the population in case of high pollutant concentrations only in the surrounding areas.

Therefore, this study introduced a low-cost, portable device that can measure PM locally. The data collected with the device showed an interesting variation of PM levels that can be traced back to two principal factors: i) position and ii) time. Unsurprisingly, busy main roads presented a level of PM bigger than parks or secondary streets. However, the time has a significant influence on PM levels, and even principal streets presented an acceptable PM level at 11 am, due to less traffic.

Consequently, due to the high variability of registered data, it is evident how necessary is a personal device that can monitor real-time PM levels caused by a combination of time and position factors, since it is not possible to recreate PM diffusion from fixed stations data only.

The solution proposed in this study may be more accessible to help modify vulnerable people's behavior and mitigate risks derived from long-exposure to air pollutants. Indeed, the introduced device does not allow to read the data directly in real-time but only store them on an SD card. Therefore, future developments will include developing a user-friendly interface, probably in the form of a mobile application, which might alert vulnerable people when dangerous conditions occur and make them act accordingly. This further step will help non-expert users be aware of air pollution risks without a thematic knowledge of pollutant threshold levels.

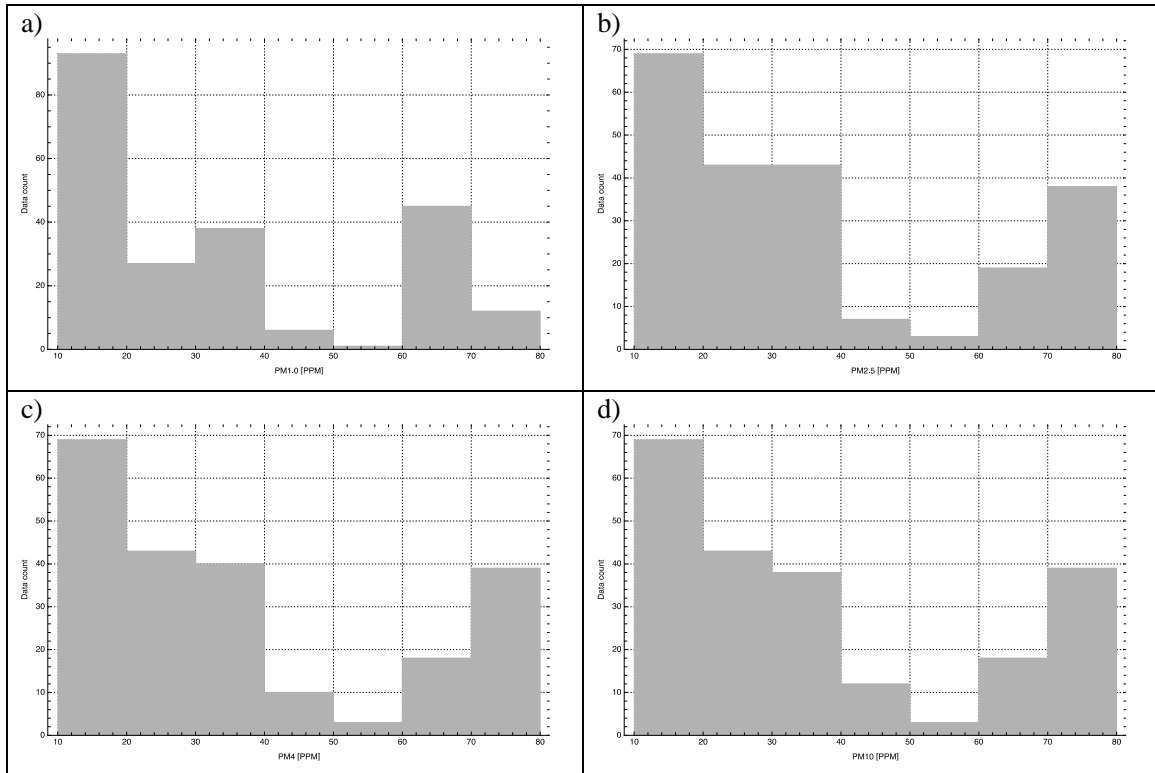


Figura 2: Istogramma dei dati di PM misurati: a) PM1.0; b) PM2.5; c) PM4.0; d) PM10
 Figure 2: Histogram of the collected particulate matter data: a) PM1.0; b) PM2.5; c) PM4.0; d) PM10

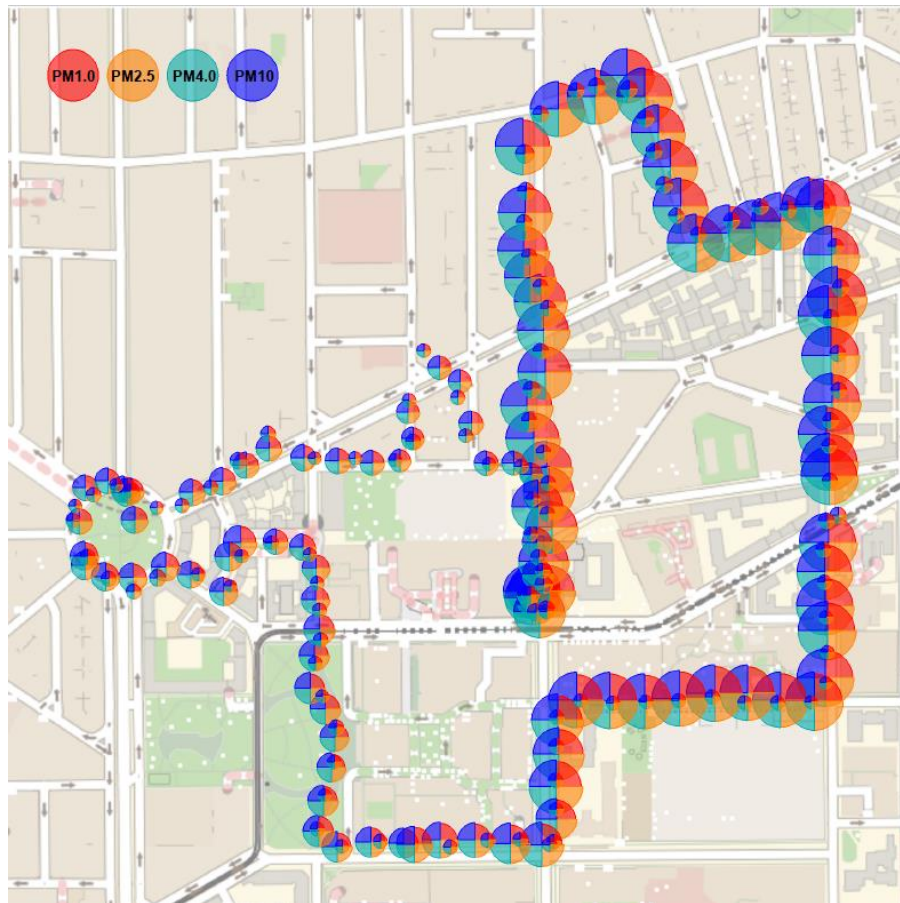


Figura 3: Distribuzione geografica dei dati
 Figure 3: Geographical distribution of data

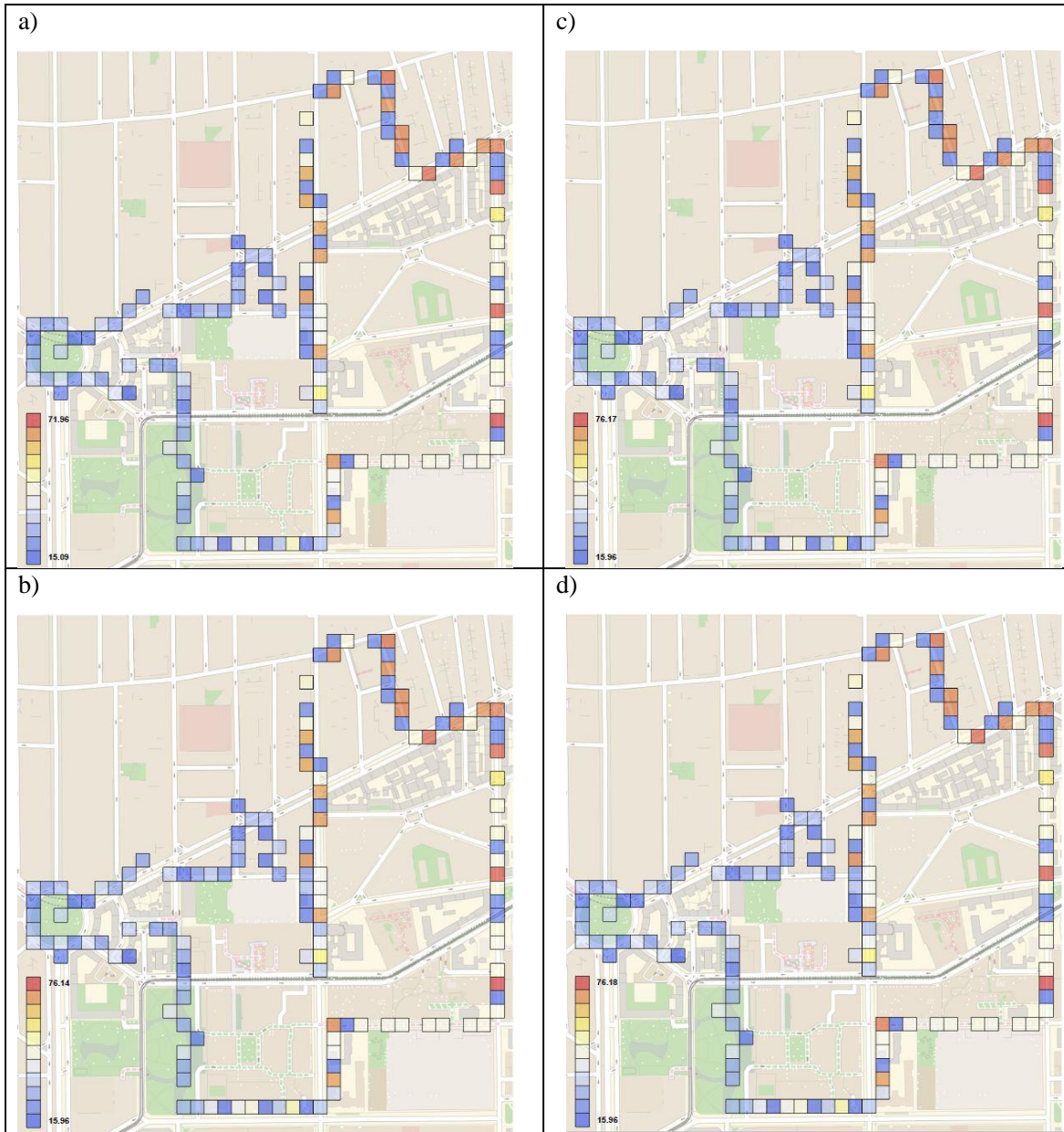


Figura 4: media geografica di a) PM1.0, b) PM2.5, c) PM4.4 and d) PM10 rilevati
 Figure 4: Geographic average of a) PM1.0, b) PM2.5, c) PM4.4 and d) PM10 detected

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Basu, R. (2009) 'High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008', 13. doi: 10.1186/1476-069X-8-40.
- Cadena, J. D. B. et al. (2021) 'A new approach to assess the built environment risk under the conjunct effect of critical slow onset disasters: A case study in Milan, Italy', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3), pp. 1–14. doi: 10.3390/app11031186.
- Cheng, C. S. et al. (2008) 'Differential and combined impacts of extreme temperatures and air pollution on human mortality in south-central Canada. Part II: Future estimates', *Air Quality, Atmosphere and Health*, 1(4), pp. 223–235. doi: 10.1007/s11869-009-0026-2.
- European Environment Agency (2018) *Global and European temperature*, Computer Aided Chemical Engineering. doi: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50001-8.
- Farhadi, H., Faizi, M. and Sanaieian, H. (2019) 'Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings', *Sustainable Cities and Society*. Elsevier, 46(June 2018), p. 101448. doi: 10.1016/j.scs.2019.101448.
- Frumkin, H. et al. (2008) 'Climate change: The public health response', *American Journal of Public Health*, 98(3), pp. 435–445. doi: 10.2105/AJPH.2007.119362.
- Grenier, D., Lynn, R. and Zurynski, Y. (2009) 'Public health impacts of the International Network of Paediatric Surveillance Units', *Paediatrics and Child Health*, 14(8), pp. 499–500. doi: 10.1093/pch/14.8.499.
- Gurjar, B. R. et al. (2010) 'Human health risks in megacities due to air pollution', *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 44(36), pp. 4606–4613. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.08.011.
- Kalkstein, L. S. et al. (1996) 'The Philadelphia hot weather-health watch/warning system: Development and application, summer 1995', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(7), pp. 1519–1528. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<1519:TPHWHW>2.0.CO;2.
- Lelieveld, J. et al. (2015) 'The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale', *Nature*, 525(7569), pp. 367–371. doi: 10.1038/nature15371.
- Luber, G. and McGeehin, M. (2008) 'Climate Change and Extreme Heat Events', *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), pp. 429–435. doi: 10.1016/j.amepre.2008.08.021.
- Meraklı, M. and Küçükyavuz, S. (2020) 'Risk aversion to parameter uncertainty in Markov decision processes with an application to slow-onset disaster relief', *IISE Transactions*. Taylor & Francis, 52(8), pp. 811–831. doi: 10.1080/24725854.2019.1674464.
- Michelozzi, P. et al. (2005) 'The impact of the summer 2003 heat waves on mortality in four Italian cities.', *Euro surveillance: bulletin européen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin*. doi: 10.2807/esm.10.07.00556-en.
- Niemenmaa, V. et al. (2018) *Air pollution: Our health still insufficiently protected*, Public Health Reports.
- Oke, T. R. (1982) 'The energetic basis of the urban heat island (Symons Memorial Lecture, 20 May 1980).', *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1–24.
- Rampini, L. and Re Cecconi, F. (2020) 'Monitoring Outdoor Air Quality Using Personal Device to Protect Vulnerable People', in *SENSORDEVICES2020*, pp. 103–108. Available at: https://www.researchgate.net/publication/346104300_Monitoring_Outdoor_Air_Quality_Using_Personal_Device_to_Protect_Vulnerable_People.
- Russell, A. G. and Brunekreef, B. (2009) 'A focus on particulate matter and health', *Environmental Science and Technology*, 43(13), pp. 4620–4625. doi: 10.1021/es9005459.
- Sicard, P. et al. (2021) 'Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades', *Environmental Sciences Europe*. Springer Berlin Heidelberg, 33(1). doi: 10.1186/s12302-020-00450-2.
- Staupe-Delgado, R. (2020) 'Can Community Resettlement be Considered a Resilient Move? Insights from a Slow-Onset Disaster in the Colombian Andes', *Journal of Development Studies*. Routledge, 56(5), pp. 1017–1029. doi: 10.1080/00220388.2019.1626836.
- World Health Organization (2014) 'Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s'.
- World Health Organization (2016) *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*. Geneva, Switzerland.