

Stima della personal exposure per tutti: il metodo implementato nel progetto H2020 PULSE

Vittorio Casella¹ [0000-0003-2086-7931], Marica Franzini¹ [0000-0002-3921-5178]
Dario Perregrini¹ [0000-0001-8455-4892], Marica Teresa Rocca¹ [0000-0003-3031-5874],
Riccardo Bellazzi¹ [0000-0002-6974-9808], Cristiana Larizza¹ [0000-0002-5055-8665]

¹ Università degli Studi di Pavia, (vittorio.casella, marica.franzini, dario.perregrini, maricateresa.rocca, riccardo.bellazzi, cristiana.larizza)@unipv.it

Abstract. In epidemiologia, con il termine esposizione viene inteso il processo di misura e stima dell'intensità del rischio che un essere umano ha nell'essere esposto ad un dato agente ambientale come può essere ad esempio l'inquinamento atmosferico. Nell'ambito del progetto H2020 PULSE è stato sviluppato un innovativo meccanismo per la valutazione dinamica della personal exposure, o esposizione individuale, in caso di inquinamento atmosferico. L'articolo illustra le componenti tecnologiche e scientifiche del metodo implementato documentando la procedura con alcuni esempi.

Keywords: Personal exposure, smart city, esposomica, smartphone

1 Introduzione

In epidemiologia, con il termine esposizione viene inteso il processo di misura e stima dell'intensità del rischio che un essere umano ha nell'essere esposto ad un dato agente ambientale come può essere ad esempio l'inquinamento atmosferico. Tale valutazione viene spesso condotta utilizzando valori di inquinamento medi annuali e applicandoli a tutti i cittadini che abitano in una determinata area.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità monitora la qualità dell'aria a livello globale pubblicando le mappe dell'inquinamento medio annuale. Ad esempio, per la città di Pavia, è riportato un livello medio di PM10 di 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per l'anno 2015. I valori disponibili non sono quindi aggiornati e vengono forniti unicamente in formato aggregato a livello di città. Tuttavia, parti diverse di una stessa città possono mostrare significative differenze così come le variazioni stagionali legate alle attività (si pensi ad esempio al riscaldamento invernale). Anche le abitudini personali di ogni cittadino possono influenzare l'esposizione personale [1] e l'utilizzo di tali mappe aggregate non sembra essere utile a tale scopo.

In epidemiologia c'è infatti un sempre crescente interesse alla valutazione dell'esposizione personale dei singoli individui. Le domande a cui si cerca di dare una risposta sono del tipo: le persone che vivono in parti diverse della città potrebbero avere un'esposizione diversa agli inquinanti? Quanto le abitudini personali influenzano l'esposizione? Alcune sperimentazioni sono già state condotte in questo campo [2, 3] dotando piccoli gruppi di volontari di dispositivi dedicati. Tuttavia, tali implementazioni consentono di monitorare solo un numero limitato di persone, a causa dei dispositivi utilizzati, per periodi limitati di tempo. Inoltre, la maggior parte dei dispositivi personali disponibili può eseguire solo un monitoraggio integrale [3] ossia possono quantificare la quantità totale di inquinamento che l'utente ha inalato nell'arco di tempo considerato. Non possono supportare l'utente nel capire dove, quando e quale quantità di inquinamento ha ingerito. In sintesi, un numero limitato di persone può eseguire, per un tempo limitato, un monitoraggio integrale.

Sarebbe invece raccomandabile che tutti i cittadini potessero effettuare la valutazione dell'esposizione personale in modo continuo e dinamico, avendo quindi la capacità di distinguere il contributo dato dalle singole attività in relazione al momento e al luogo in cui esse vengono effettuate. In questo modo i cittadini potrebbero organizzare la loro vita al fine di ridurre al minimo l'esposizione agli inquinanti.

La personal exposure dovrebbe quindi basarsi su un'architettura avente le seguenti caratteristiche:

- ∞ Essere aperta: tutti i cittadini dovrebbero poter accedere al suo calcolo senza necessitare alcun dispositivo speciale;
- ∞ Essere dinamica: avere la capacità di valutare l'inquinamento istantaneo inalato;
- ∞ Essere aggiornabile a costo zero per l'utente: nel caso in cui si rendessero disponibili metodologie più avanzate per il monitoraggio della qualità dell'aria, gli utenti non dovrebbero essere gravati di nessun costo aggiuntivo.

2 Il test-site utilizzato

L'Università di Pavia è stata partner di un progetto H2020, recentemente concluso, denominato PULSE (Participatory Urban Living for Sustainable Environments). Il progetto ha visto la collaborazione di sette grandi città - Parigi, Singapore, Birmingham, Barcellona, Pavia, Keelung e New York - per raccogliere informazioni sul sistema sanitario pubblico, creare una rete di sensori ambientali, fissi e mobili, e sviluppare un sistema per la gestione delle politiche di sanità pubblica in ambiente urbano. Le attività erano prevalentemente focalizzate alla valutazione dell'influenza dell'ambiente su due patologie, tipiche degli ambienti urbani: l'asma, solitamente legata all'inquinamento atmosferico, e il diabete di tipo 2, legato allo stile di vita e all'inattività fisica. In questo ambito l'Università di Pavia si è occupata dell'implementazione di un metodo per la valutazione della personal exposure.

Uno dei suoi principali elementi per il calcolo dell'esposizione personale è la disponibilità di una fitta rete di sensori per l'analisi della qualità dell'aria. La città di Pavia ha iniziato a implementare la propria rete nel settembre 2018, rete costituita da sensori a basso costo Purple Air (Figura 1a). Tali dispositivi registrano numerosi parametri

relativi sia alla qualità dell'aria che a fattori ambientali come PM 1.0, PM 2.5, PM 10, temperatura, umidità e pressione. Inoltre, grazie alla presenza di un dispositivo Wi-Fi, forniscono i dati misurati in tempo reale tramite un'interfaccia WebGIS proprietaria (Figura 1b). I sensori sono installati sui balconi di alcuni volontari, appositamente reclutati, e su alcune strutture appartenenti all'Università degli Studi di Pavia o al Comune.

Un esempio di dati acquisiti è mostrato in Figura 2 in cui è riportato il comportamento di PM 1.0, PM 2.5 e PM 10 per un sensore durante la prima settimana del 2019. La separazione tra le curve è ben comprensibile in quanto è, per definizione, $PM\ 10 \geq PM\ 2.5 \geq PM\ 1.0$. Il PM 1.0 quantifica infatti la massa della particella di dimensione $\leq 1\ \mu m$ contenuta in un metro cubo di aria. Il PM 2.5 quantifica la massa di particelle di dimensione $\leq 2,5\ \mu m$, quindi PM 2.5 include anche il PM 1.0. Analogo discorso vale per PM 10.



Fig. 1. Esempio di sensore istallato presso la Facoltà di Ingegneria (a); Mappa della rete di sensori sulla città di Pavia (b).

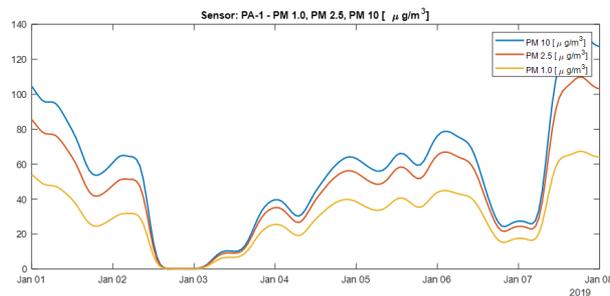


Fig. 2. Valori di PM 1.0, PM 2.5 e PM 10 per un sensore durante la prima settimana del 2019.

La capacità di rilevare sia la qualità dell'aria che le varianti climatiche dà la possibilità di analizzare il fenomeno dell'inquinamento in un approccio combinato valutando le interrelazioni e le connessioni causa-effetto. La Figura 3 riporta, sull'asse y di sinistra, l'umidità e la pressione mentre, sull'asse y di destra, la velocità media oraria del vento e il suo valore massimo. I dati sul vento visualizzati sono raccolti su base oraria. L'immagine mostra chiaramente una connessione tra variabili climatiche (vento nel nostro caso) e inquinamento atmosferico e conferma che, quando il vento si alza ed è forte, l'inquinamento quasi scompare. I dati del vento non sono registrati direttamente dai sensori PurpleAir ma sono stati ottenuti dal repository dell'agenzia ambientale locale (ARPA Lombardia).

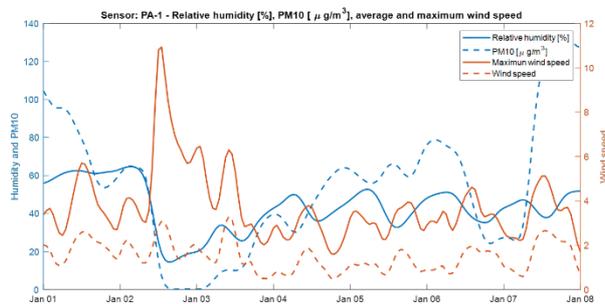


Fig. 3. Valori di umidità relativa e PM 10 in blu, velocità media e massima del vento media e massima, in rosso. I valori si riferiscono ai dati registrati da un sensore durante la prima settimana del 2019.

3 Metodologia

L'implementazione del calcolo della personal exposure prevede la creazione di alcuni layer tecnologici: (1) un metodo per la modellizzazione continua della qualità dell'aria, (2) un metodo per il tracciamento dello spostamento delle persone ed infine (3) un modello di respirazione che permetta di determinare la qualità di inquinante inalata in funzione del luogo in cui ci si trova e dell'ora considerata.

3.1 Generazione delle mappe di inquinamento dell'aria

L'accurata costruzione di mappe dense e dinamiche dell'inquinamento dell'aria è di fondamentale importanza per la corretta determinazione della personal exposure. Nel presente contesto il termine densa esprime la necessità di disporre di un modello continuo della distribuzione spaziale delle variabili considerate, come PM 2.5 o PM 10, mentre con il termine dinamica si intende la necessità di conoscere la concentrazione di inquinante ad ogni istante.

L'inquinamento atmosferico presenta variabilità diverse a seconda che si analizzi l'andamento temporale e spaziale del fenomeno. Se da un lato la concentrazione di inquinante varia significativamente nell'arco di una stessa giornata, dell'altro presenta

limitati scostamenti tra zone limitrofe di una stessa città, considerando soprattutto la scala di Pavia.

A supporto di quanto affermato vengono mostrati in Figura 4 gli andamenti del PM 10 per tre sensori della rete, prossimi tra loro. La Figura 4a mostra i valori di concentrazioni registrati per i primi 20 giorni del mese di gennaio 2020 in cui si nota come l'inquinante presenti delle variabilità sia temporali, più accentuate, che spaziali, più contenute. La Figura 4b mostra l'andamento all'interno di una singola giornata. In entrambi i casi è evidente come la corretta costruzione di una mappa densa e dinamica sia di primaria importanza per valutare l'esposizione di una persona all'inquinamento atmosferico.

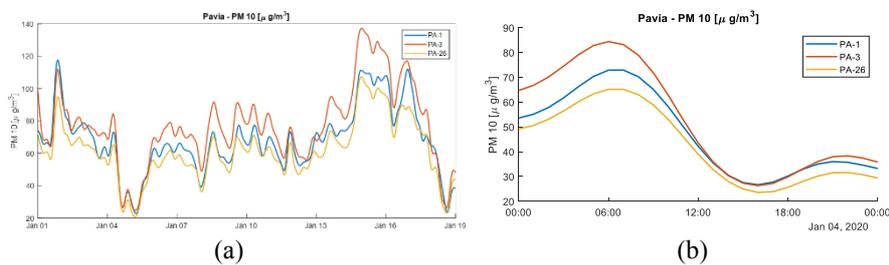


Fig. 4. Valori di PM10 registrati per i primi 20 giorni del mese di gennaio 2020 da tre sensori prossimi tra loro (a); valori di PM10 registrati dagli stessi sensori per la giornata del 4 gennaio 2020 (b).

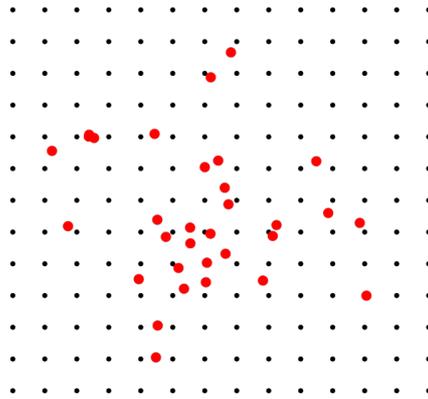


Fig. 5. Modello di interpolazione adottato; i punti rossi rappresentano le misure puntuali in corrispondenza dei sensori PurpleAir mentre i punti neri le posizioni in cui il fenomeno è stato stimato

La costruzione della mappa è stata costruita partendo dalle osservazioni puntuali fatte dalla rete di sensori a basso costo. È stato adottato un modello di interpolazione basato sul kernel gaussiano al fine di costruire dei modelli raster con risoluzione spaziale di 100 m e temporale di 1 ora. In Figura 5 è mostrata lo schema di base dove in rosso sono riportate le posizioni dei sensori PurpleAir e in nero i punti in cui il modello

viene stimato. Tuttavia, è importante sottolineare come la metodologia adottata permetta poi di valutare l'inquinamento in ogni posizione ed in ogni istante.

L'interpolazione con kernel gaussiano [4] è infatti basata su una media ponderata: i valori incogniti di inquinamento z , localizzati alle coordinate (x, y, z, t) , rappresentanti un punto appartenente ad uno spazio 4D (tre coordinate spaziali e un riferimento temporale) vengono calcolati come:

$$z = \frac{\sum_j^m \sum_{i=1}^n z_{ij} w_i^s w_j^t}{\sum_j^m \sum_{i=1}^n w_i^s w_j^t} \quad (1)$$

dove z_{ij} sono i valori di inquinamento registrati dal i -esimo sensore alla j -esima epoca. Per il calcolo vengono infatti prese in considerazione un certo numero di epoche, intese come istanti in cui il sensore effettua una misurazione, intorno al tempo t selezionato: nel nostro caso l'intervallo temporale utilizzato ha una semi-ampiezza di 2 ore. m è quindi il numero di epoche considerato e n il numero di sensori (i punti rossi di Figura 5). Nella formula (1) il peso è espresso come prodotto tra i fattori w_i^s e w_j^t , legati rispettivamente allo spazio ed al tempo; tali fattori vengono determinati tramite:

$$w_i^s = e^{-\frac{(ds)_i^2}{2\sigma_s^2}} \quad (2) \quad w_j^t = e^{-\frac{(dt)_j^2}{2\sigma_t^2}} \quad (3)$$

in cui ds è la distanza spaziale tra il punto di stima e il i -esimo sensore mentre il parametro σ_s controllo la velocità di decadimento del peso; dt è l'intervallo temporale tra l'istante di interpolazione t e la j -esima epoca di misura mentre σ_t è l'analogo parametro di controllo. Un esempio di come si passi da misure puntuali a continue è mostrato in Figura 6.

3.2 Tracciamento degli utenti

I sensori GPS/GNSS all'interno degli smartphone permettono di registrare le traiettorie percorse dagli utenti tramite App dedicate. PulseAir, una App sviluppata all'interno del progetto PULSE, ha questa funzionalità ed è quindi stata utilizzata per determinare la posizione degli utenti ad intervalli regolari, nel nostro caso 1 secondo. L'App, durante la registrazione, memorizza i dati in formato tabellare (data, ora e posizione 3d), come verrà mostrato in Sezione 4, rendendoli quindi utilizzabili per la valutazione della personal exposure.

3.3 Calcolo della personal exposure

Una volta memorizzate le traiettorie degli utenti occorre elaborarle al fine di valutare la personal exposure. Viene anzitutto determinata la velocità istantanea di spostamento come rapporto tra la variazione spaziale e temporale tra due misure successive; vengono applicati idonei algoritmi di smoothing al fine di limitare l'influenza del rumore presente nelle osservazioni causato dall'utilizzo della soluzione navigazionale. Ad ogni

punto della traiettoria viene quindi associato l'inquinamento locale attraverso una interpolazione nello spazio e nel tempo sfruttando le mappe generate.

Per determinare l'esposizione personale deve quindi essere stabilito un collegamento tra l'inquinamento locale, l'attività motoria che si sta svolgendo e un modello respiratorio che identifica il volume inspirato [5, 6]. In PULSE è stato deciso di adottare un modello di respirazione semplificato, mostrato in Tabella 1 [7], che considera solo quattro stati: fermo, camminata, corsa e alla guida di un veicolo. Per ognuno di essi è nota l'attività respiratoria in termini di numero di respiri al minuto e volume medio inalato.

Sfruttando la conoscenza della velocità e la classificazione basata su tale parametro (prima colonna di Tabella 1) è possibile attribuire ad ogni punto della traiettoria uno di questi stati. Sfruttando l'informazione di tempo registrata è possibile anche determinare il volume inalato ad ogni istante e conseguentemente la quantità di inquinante assunta.

Tabella 1. Il modello respiratorio adottato

Velocità [km/h]	Status	# respiri al minuto	Volume d'aria al respiro [litri]
< 2	Fermo	15	0.6
2 - 6	Camminata	28	1.8
6 - 15	Corsa	40	2.5
> 15	Alla guida	15	0.8

4 I risultati

Nel presente paragrafo verranno mostrati i risultati ottenuti per la costruzione della mappa di qualità dell'aria sulla città di Pavia e per il calcolo della personal exposure.

4.1 La mappa di qualità dell'aria

A titolo di esempio viene mostrata la mappa di qualità dell'aria generata per il 4 gennaio 2020. La Figura 6a mostra i valori di PM10 registrati dai sensori alle ore 10 del mattino; la scala dei colori, proporzionale alle concentrazioni misurate, è espressa in $\mu\text{g per m}^3$.

La mappa continua è stata quindi ottenuta grazie all'interpolazione a kernel gaussiano sui valori puntuali di partenza (Figura 6b). È importante sottolineare che la mappa generata per le ore 10 del mattino non fa unicamente riferimento alle osservazioni registrate in quel momento ma anche a quelle memorizzate in un opportuno intervallo temporale, opportunamente pesate (Sezione 3.1). Mappe analoghe vengono prodotte con cadenza oraria sia per i parametri di inquinamento, PM 1.0, PM 2.5 e PM 10, sia per quelli climatici, temperatura, umidità e pressione.

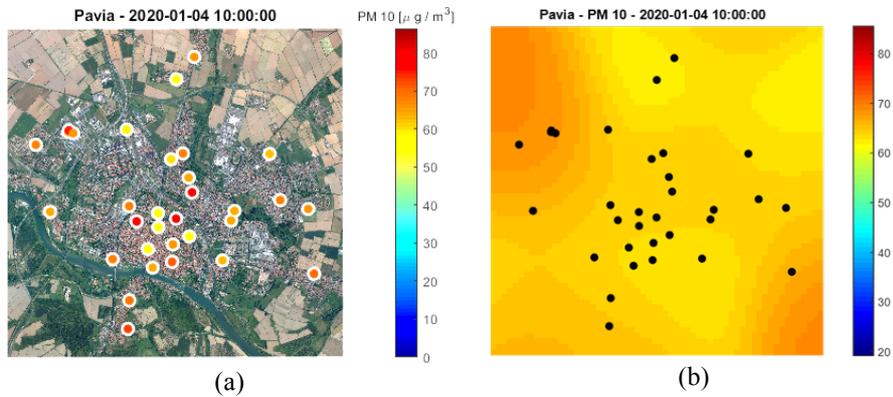


Fig. 6. Valori di PM10 registrati dai sensori della rete riferiti al 4 gennaio 2020, alle ore 10 del mattino (a); mappa continua ottenuta per interpolazione (b).

4.2 Calcolo della personal exposure

Diversi volontari sono stati monitorati durante i loro spostamenti a partire dal dicembre 2019; in questa prima fase sperimentale più di 300 traiettorie sono state registrate e processate. Per illustrare la metodologia adottata, il percorso acquisito da un utente nel gennaio 2020 verrà utilizzato come esempio. Per motivi di leggibilità è mostrato unicamente un estratto della traiettoria registrata (Figura 7a) relativa ad uno spostamento effettuato durante la giornata.

Dopo che l'utente ha registrato il percorso, i dati vengono scaricati e memorizzati in formato tabellare (Figura 7b); ogni linea contiene il riferimento temporale e spaziale (in coordinate cartografiche UTM-WGS84) del tragitto percorso con frequenza di un'osservazione al secondo.

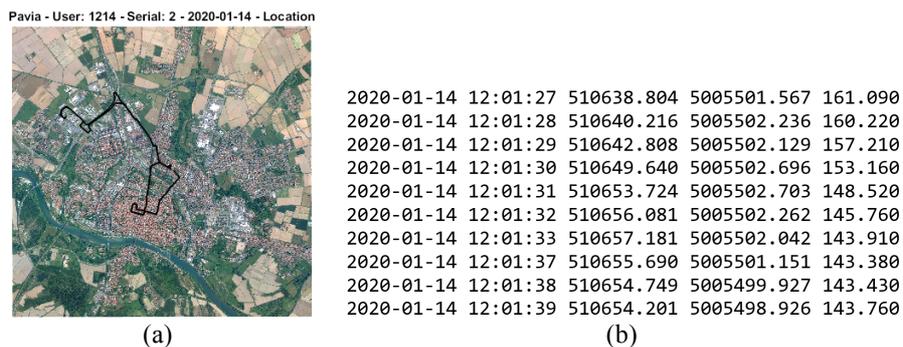


Fig. 7. Esempio di traiettoria registra da un utente il 4 gennaio 2020 (a); estratto dei dati registrati (b).

Essendo i punti localizzati nello spazio e nel tempo è possibile calcolare la velocità di spostamento aggiornando la tabella come mostrato in Figura 8a in cui le ultime tre

colonne riportano rispettivamente la velocità in m/s (rosso), l'intervallo temporale in secondi (blu) e lo spazio percorso in metri (verde). Questo passaggio richiede qualche cautela poiché le misurazioni non sono sempre regolari ed è pertanto necessario regolarizzarne la differenziazione. Partendo da questi dati è inoltre possibile, ad esempio, riprodurre il percorso effettuato colorando i punti in base alle velocità istantanea (Figura 8b). L'osservazione dell'immagine mostra come una parte del percorso sia stata effettuata in automobile (colori dall'azzurro chiaro al rosso) mentre un'altra parte a piedi (dal blu scuro a quello chiaro). È altresì possibile colorare la traiettoria in base al valore locale ed istantaneo dell'inquinante considerato, ad esempio il PM 10 (Figura 9a).

L'ultima fase della procedura richiede la stima della quantità di inquinante inalata utilizzando il metodo esposto nel paragrafo precedenti. In Figura 9b sono riportati, come colonne aggiuntive, la concentrazione di PM 10 in $\mu\text{g per m}^3$ (rosso) e l'esposizione personale istantanea in μg (blu). La Figura 10a mostra nuovamente la traiettoria percorsa colorando i punti in base all'esposizione; da notare come tale valore sia inferiore durante lo spostamento in auto e maggiore in fase di camminata.

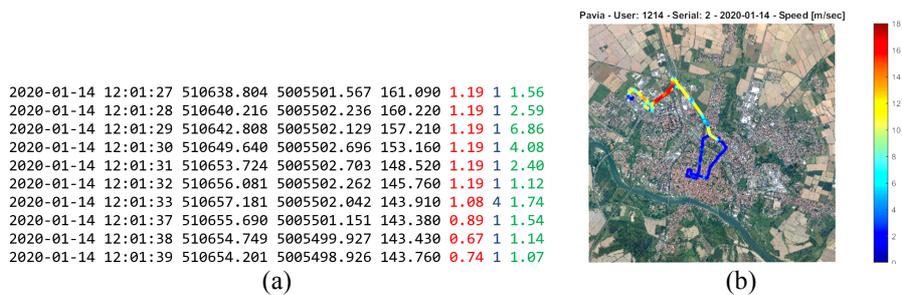


Fig. 8. Estratto dei dati registrati con le tre colonne aggiuntive per velocità, intervallo temporale e spostamento compiuto (a); traiettoria percorsa colorate in relazione alle velocità istantanea (b).

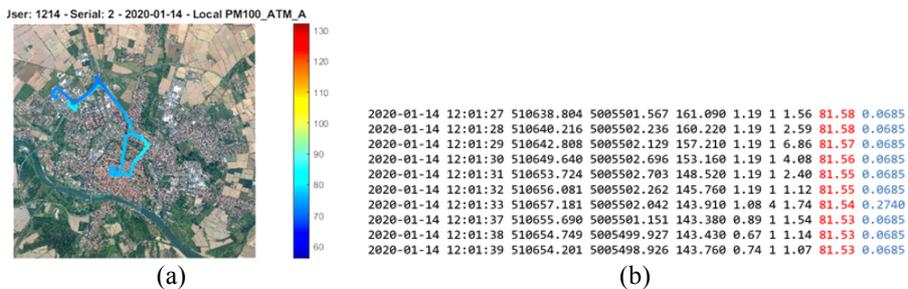


Fig. 9. Traiettoria percorsa colorate in relazione alla concentrazione di PM10 (a); estratto dei dati registrati con le colonne aggiuntive sulla concentrazione di inquinante e sulla quantità inalata (b).

Il toolbox sviluppato permette infine di effettuare una statistica finale sulla traiettoria analizzata (Figura 10b): la lunghezza totale del tratto percorso è di circa 12 km in un tempo di 1 ora e 15 minuti; sono state effettuate quasi 2900 registrazioni e l'ammontare totale di PM10 inalato è di 227 μg .

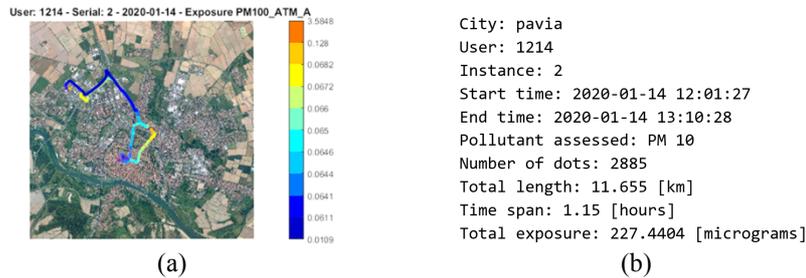


Fig. 10. Traiettoria percorsa colorate in relazione alla personal exposure (a); statistica descrittiva della traiettoria esaminata (b);

5 Conclusioni

Il contributo illustra l'implementazione condotta nell'ambito del progetto H2020 PULSE per la valutazione della personal exposure.

I dati acquisiti dalla rete di monitoraggio evidenziano che l'inquinamento atmosferico ha una notevole variabilità spaziale, anche alla scala di una città media come Pavia, oltre a una forte variabilità temporale con significative variazioni intra-giornaliere. Per eseguire una valutazione dettagliata dell'esposizione personale all'inquinamento atmosferico sono quindi necessari modelli 4D (spazio e tempo) dettagliati di qualità dell'aria. La disponibilità di dati in tempo reale permetterebbe inoltre di creare un servizio in grado di avvisare immediatamente le persone dell'inquinamento a cui sono esposti.

L'implementazione della personal exposure adottata è indipendente dal sistema di rilevamento che fornisce i dati. A Pavia abbiamo adottato una rete di sensori a basso costo, ma questo non è obbligatorio. Approcci alternativi si basano su dati satellitari (alcune missioni specifiche dell'UE sono già operative e altre sono pianificate) e su modelli di diffusione fisica. In futuro, i modelli integrati diventeranno probabilmente il gold standard.

I vantaggi della conoscenza dell'esposizione personale per i cittadini e l'ambiente sono molteplici come cambiamenti comportamentali e adozione di stili di mobilità più sostenibili.

Acknowledgement. Il presente lavoro è stato co-finanziato dal programma H2020 sotto la convenzione GA-727816. Gli autori vogliono ringraziare il Comune di Pavia, ARPA Lombardia e tutto il partenariato di PULSE per la cooperazione al presente studio.

Riferimenti bibliografici

1. Monn, C.: Exposure assessment of air pollutants: A review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone, (2001)
2. Steinle, S., Reis, S., Sabel, C.E.: Quantifying human exposure to air pollution-Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment,

- (2013)
3. Sanchez, M., Milà, C., Sreekanth, V., Balakrishnan, K., Sambandam, S., Nieuwenhuijsen, M., Kinra, S., Marshall, J.D., Tonne, C.: Personal exposure to particulate matter in peri-urban India: predictors and association with ambient concentration at residence. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 30, 596–605 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41370-019-0150-5>
 4. Wilson, A.G., Nickisch, H.: Kernel interpolation for scalable structured Gaussian processes (KISS-GP). In: 32nd International Conference on Machine Learning, ICML 2015. pp. 1775–1784. PMLR (2015)
 5. Zhou, J., You, Y., Bai, Z., Hu, Y., Zhang, J., Zhang, N.: Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China. *Sci. Total Environ.* 409, 452–459 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.022>
 6. Adams, C., Riggs, P., Volckens, J.: Development of a method for personal, spatiotemporal exposure assessment. *J. Environ. Monit.* 11, 1331–1339 (2009). <https://doi.org/10.1039/b903841h>
 7. Breathe: Your lungs and exercise. *Breathe.* 12, 97–100 (2016). <https://doi.org/10.1183/20734735.elf121>

#AsitaAcademy2021