

# QUALITÀ DELL'ARIA E SENSORI SMART, QUALE AFFIDABILITÀ

NELL'ULTIMO DECENNIO SONO COMPARI SUL MERCATO STRUMENTI PER LA MISURAZIONE DI INQUINANTI NELL'ARIA A BASSO COSTO E DI SEMPLICE UTILIZZO, IMPIEGATI SOPRATTUTTO IN PROGETTI DI RICERCA E ATTIVITÀ DI CITIZEN SCIENCE. TUTTAVIA I RISULTATI DEVONO ESSERE OPPORTUNAMENTE CONFRONTATI E TARATI RISPETTO A STRUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO.

**I**l monitoraggio della qualità dell'aria è regolato dalla direttiva europea 2008/50/CE, con le successive modifiche e recepimenti da parte degli Stati membri, che definiscono anche i metodi di misura di riferimento che devono essere utilizzati, basati su norme tecniche internazionali emanate dagli enti di standardizzazione.

Nell'ultimo decennio sono comparsi sul mercato strumenti basati su metodologie alternative che, essendo a costo largamente inferiore a quelli di riferimento, sono stati impiegati in progetti di ricerca e attività di *citizen science* che hanno coinvolto istituti di ricerca, associazioni ambientaliste e cittadini, con ampia produzione di rapporti e di lavori di letteratura scientifica. Questi sensori, chiamati *smart sensor* (Ss) presentano anche ulteriori vantaggi, quali le dimensioni e il peso contenuti, il basso consumo di energia necessaria al funzionamento e l'apparente facilità di uso, che ne ha consentito l'utilizzo anche alle persone non esperte di tali tecnologie né di monitoraggio della qualità dell'aria o delle relative analisi dei dati.

Tuttavia l'uso di tali sensori presenta anche degli svantaggi. Nonostante il dispositivo di rilevazione, cuore dello *smart sensor*, sia il medesimo impiegato da diverse case produttrici, i risultati non sono confrontabili a causa della differenza dei metodi di taratura e degli algoritmi per l'elaborazione del risultato. Questo limite non permette di estendere le *performance* dimostrate tra tipologie di dispositivi di produttori di diverse aziende. Altre limitazioni riportate nella letteratura sono la modifica della risposta strumentale in funzione di variazioni di temperatura e di umidità atmosferica nella camera di rivelazione, scarsa selettività, deriva della misura e effetti dell'invecchiamento del sensore. Anche l'ampia quantità di sensori disponibili si ripercuote sulla qualità delle misurazioni effettuate, richiedendo



una verifica puntuale dell'adeguatezza dello strumento agli obiettivi dello studio della qualità dell'aria che si deve affrontare. Quindi diventa fondamentale la valutazione della *performance* del sensore impiegato, effettuata attraverso il confronto con gli analizzatori di riferimento.

Le tarature eseguite in condizioni controllate di laboratorio producono migliori prestazioni analitiche tra sensori e strumenti di riferimento rispetto a quelli ottenuti in campo dove la composizione atmosferica varia continuamente. La taratura in laboratorio non è sufficiente, il confronto in campo è considerato il metodo più appropriato per confrontare le diverse tipologie di sensori in situazioni reali, tenendo conto che la risposta analitica del sensore può variare da sito a sito. È fondamentale pertanto approntare le misure di taratura e le relative misure di monitoraggio in aree di studio della medesima tipologia.

Le attività svolte da Arpa Emilia-Romagna nell'ambito dell'utilizzo degli *smart sensor* hanno avuto come obiettivo

principale la valutazione della possibilità di utilizzo di tali strumenti per il monitoraggio ad alta risoluzione spaziale e temporale della qualità dell'aria sul territorio.

Tale valutazione è stata fatta confrontando le *performance* di questi strumenti rispetto agli strumenti di riferimento presenti nelle stazioni appartenenti alla Rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria (Rrqa) gestita da Arpa. Nello specifico, per valutare l'accuratezza, la precisione e la stabilità della misura nel tempo, è stata effettuata una serie di campagne di misura durante le quali gli *smart sensor* sono stati posizionati presso una o più stazioni Rrqa e si è cercato di definire le migliori funzioni di taratura basate su questi periodi di interconfronto. Le attività descritte nel seguito sono state svolte nell'ambito dei progetti europei Interreg-Ce Awair e Dynaxibility.

1 Sensore smart: punto 14 - San Romualdo.

## Verifiche in campo della performance degli smart sensor

Le prime analisi di precisione e di accuratezza condotte da Arpa su quattro smart sensor per la misura di ozono - O<sub>3</sub> (tipologia Ss1) e di biossido di azoto - NO<sub>2</sub> (tipologia Ss2) basati sul metodo elettrochimico sono relative al progetto Awair.

Durante questo progetto sono state realizzate alcune campagne di misura nel periodo invernale e nel periodo estivo con l'obiettivo di verificare l'affidabilità di una procedura basata sulla taratura in campo di questi strumenti e sul loro successivo spostamento e utilizzo in altre aree con caratteristiche simili.

Le campagne di misura sono state condotte presso le stazioni Rrqa nelle province di Parma e di Modena. Più precisamente ciascuno smart sensor, Ss1-Ss2, è stato lasciato per due settimane nella provincia di Parma presso le

stazioni di Cittadella (fondo urbano) e Montebello (traffico) nel comune di Parma, Badia (fondo rurale) nel comune di Langhirano e Saragat (fondo suburbano) nel comune di Colorno. I dati raccolti durante questa prima parte di attività sono stati usati per definire le funzioni di taratura di ciascuno smart sensor Ss1-Ss2. L'approccio statistico usato è basato su una regressione lineare ortogonale, considerata più appropriata rispetto alla classica regressione ai minimi quadrati, dato che sia le misure di tali sensori sia quelle delle stazioni di riferimento sono affette da errori.

## Attività nell'ambito del progetto Dynaxibility

Un'altra serie di attività nell'ambito dell'uso di strumenti basati su sensori a basso costo è stata condotta durante il progetto Dynaxibility, che può essere

considerato a tutti gli effetti come una prosecuzione di numerose attività intraprese durante il precedente progetto Awair.

In questo nuovo progetto è stato impiegato un numero maggiore di strumenti (la maggior parte è stata acquisita proprio grazie ai finanziamenti legati a Dynaxibility) in particolare 19 smart sensor di tipologia Ss3-Ss4-Ss5 e 8 smart sensor di tipologia Ss6-Ss7-Ss2. Entrambi i tipi di strumenti sono equipaggiati con sensori Opc (Optical particle counter) per la misura del particolato atmosferico (PM<sub>i</sub>), mentre per la misura di NO<sub>2</sub> sono equipaggiati con lo stesso sensore elettrochimico.

Le campagne di misura sono state condotte presso le stazioni di riferimento della provincia di Parma (Cittadella, Montebello, Saragat e Badia): in particolare sono state effettuate 3 campagne di misura nel periodo invernale che hanno coperto un periodo di circa quattro mesi tra il 2021 e il 2022

Inquinante	Marca	Numero	Periodo 1 (10/12/2021-9/1/2022)		Periodo 2 (29/1/2022-9/2/2022)		Periodo 3 (2/3/2022-21/3/2022)	
			R <sup>2</sup>	Rmse	R <sup>2</sup>	Rmse	R <sup>2</sup>	Rmse
			media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)
PM <sub>10</sub>	Ss6	4	0,887 (0,835;0,936)	3,55	0,794 (0,644;0,962)	4,675	0,896 (0,783;0,935)	2,85
	Ss4	17	0,899 (0,872;0,919)	4,3 (3,8;4,8)	0,726 (0,581;0,797)	7,3 (5,9;8,4)	0,88 (0,847;0,922)	2,9 (2,6;3,1)
	Opc Monitor	1	0,904	4,3	0,974	2,3	0,964	1,8
	Palas	1	0,963	5,2	0,959	3,1	0,972	4
PM <sub>2,5</sub>	Ss7	3	0,904 (0,828;0,971)	2,8 (1,6;3,7)	0,828 (0,741;0,984)	2,6 (1,3;3,5)	0,901 (0,886;0,909)	2 (1,8;2,3)
	Ss3	17	0,894	4,4 (4,4;9)	0,889 (0,808;0,967)	3,9 (1,9;5,1)	0,936 (0,878;0,977)	1,5 (0,9;2)
	Opc Monitor	1	0,892	4,6	0,878	4,2	0,767	2,9
	Palas	1	0,946	3,4	0,985	1,6	0,953	3,9

TAB. 1 DATI GIORNALIERI PM<sub>10</sub> E PM<sub>2,5</sub>

Statistiche descrittive calcolate sui dati giornalieri di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> misurati dai diversi strumenti rispetto allo strumento di riferimento Skypost nei siti di Parma relativamente al progetto Dynaxibility.

Inquinante	Marca	Numero	Periodo 1 (10/12/2021-9/1/2022)		Periodo 2 (29/1/2022-9/2/2022)		Periodo 3 (2/3/2022-21/3/2022)	
			R <sup>2</sup>	Rmse	R <sup>2</sup>	Rmse	R <sup>2</sup>	Rmse
			media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)	media (min;max)
PM <sub>10</sub>	Ss6	1	0,604	10,2	0,597	11,1	0,715	8,3
	Ss4	17	0,839 (0,815;0,854)	6,7 (6,4;7,2)	0,796	7,8	0,712 (0,684;0,761)	8,2 (7,8;8,5)
	Opc Monitor	1	0,969	3	0,881	6	0,857	5,9
PM <sub>2,5</sub>	Ss7	1	0,777	7,3	0,771	8,6	0,837	5,2
	Ss3	17	0,855 (0,836;0,878)	6,2 (5,7;6,6)	0,856	6,7	0,887 (0,868;0,902)	3,9 (3,5;4,6)
	Opc Monitor	1	0,968	2,9	0,82	7,5	0,832	5,1
NO <sub>2</sub>	Ss2	8	0,808 (0,577;0,902)	6,5 (4,3;13)	0,727 (0,524;0,852)	14,4 (8,6;22,9)	0,683 (0,154;0,835)	10,2 (8;16,1)
	Ss5	17	0,688 (0,279;0,826)	4,9 (3,7;7,6)	0,540 (0,147;0,759)	16,7 (9,8;22,8)	0,710 (0,578;0,857)	8 (5,7;9,2)

TAB. 2 DATI ORARI PM<sub>10</sub> PM<sub>2,5</sub> NO<sub>2</sub>

Statistiche descrittive calcolate sui dati orari di PM<sub>10</sub>, di PM<sub>2,5</sub> misurati dai diversi strumenti rispetto al Palas e di NO<sub>2</sub> rispetto allo strumento di riferimento in cabina nei siti di Parma relativamente al progetto Dynaxibility.



(10/12/2021-9/1/2022, 29/1-9/2/2022 e 2-21/3/2022).

La stazione di riferimento della Rrqa Saragat (comune di Colorno) ha avuto un ruolo centrale durante le campagne di misura. Infatti in questo sito, oltre al valore giornaliero della concentrazione di particolato atmosferico ottenuto con la strumentazione automatica ad assorbimento beta Swam, sono disponibili anche i dati gravimetrici giornalieri ottenuti con Skypost della ditta Tecora e i dati orari misurati da strumenti ottici, quali l'Opc Monitor della ditta Fai e il Palas della ditta Fidas. Questa varietà di strumenti nello stesso sito permette un'ampia comparazione tra i dati ottenuti con i diversi strumenti di riferimento primario (gravimetrici per PM<sub>x</sub> - Skypost - e chemiluminescenza per NO<sub>2</sub>) o secondario.

Per quanto riguarda il dato giornaliero di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> il riferimento è stato considerato il dato gravimetrico Skypost, rispetto al quale è stata fatta l'analisi statistica descrittiva relativa agli *smart sensor* mostrata nella *tabella 1*. Il confronto del Palas, strumento certificato sul dato giornaliero, rispetto allo Skypost raggiunge i risultati migliori per entrambe le dimensioni di particolato atmosferico in tutte e tre le campagne. Anche lo strumento Opc Monitor mostra correlazioni molto simili, mentre gli *smart sensor* di tipo Ss6-Ss7 e Ss3-Ss4 mostrano valori di correlazioni generalmente inferiori rispetto ai dati di riferimento soprattutto nella seconda campagna.

Un'analoga analisi è stata condotta per i dati orari di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> misurati dall'Opc Monitor e dagli *smart sensor* Ss6-Ss7 e Ss3-Ss4 rispetto al Palas (*tabella 2*).

Per il PM<sub>10</sub> lo strumento Opc Monitor ha mostrato i valori più elevati del coefficiente R<sup>2</sup> e valori inferiori di Rm<sub>se</sub>, mentre sia gli *smart sensor* Ss4 che quelli di tipo Ss6 hanno mostrato correlazioni sensibilmente inferiori e Rm<sub>se</sub> più elevati rispetto al Palas. Anche per il PM<sub>2,5</sub> lo strumento Opc Monitor mostra una buona correlazione, anche se in modo meno evidente rispetto al PM<sub>10</sub>. In ogni caso le *performance* degli *smart sensor* Ss3 rispetto a quelli di tipo Ss7 sono nel complesso più vicine a quelle ottenute dall'Opc Monitor, soprattutto in termini di R<sup>2</sup>.

Nella terza campagna tutte e tre le tipologie di strumenti hanno mostrato affidabilità completamente confrontabili. Il dato relativo alle misure orarie di NO<sub>2</sub> presso le varie centraline Rrqa di



FOTO: C. MACCONE - ARPAE

2

riferimento ha permesso un confronto tra gli *smart sensor* Ss2 e Ss5: i valori del coefficiente di determinazione nei tre periodi delle campagne di misura è generalmente inferiore a quello che si ottiene per i PM e gli errori quadratici medi sono generalmente più elevati. Il confronto relativo tra le due tipologie di strumenti mostra valori di R<sup>2</sup> decisamente superiori per gli *smart sensor* Ss2 nelle prime due campagne e valori leggermente superiori per gli *smart sensor* Ss5 nel terzo periodo. Particolarmente soddisfacenti sono stati i risultati ottenuti dagli *smart sensor* Ss2 nei siti urbani, mentre le differenze maggiori rispetto agli strumenti di riferimento sono state riscontrate a Colorno e ancora di più nel fondo remoto di Badia.

## La stabilità delle calibrazioni nel tempo e nello spazio

Un aspetto essenziale legato alla possibilità di utilizzare effettivamente gli *smart sensor* per monitorare la qualità dell'aria dipende in larga misura dalla stabilità delle funzioni di taratura nel tempo: per questa ragione, parte delle attività realizzate nelle campagne di

misura durante i progetti Awair e Dynaxibility hanno avuto proprio questo focus.

Durante il progetto Awair è stata realizzata una campagna di misura prolungata (periodo 1/3-15/5/2019) per verificare la stabilità nel tempo delle tarature presso la centralina Rrqa di Parco Ferrari (fondo urbano della provincia di Modena). Gli andamenti dei valori di R<sup>2</sup> e del Rm<sub>se</sub> hanno messo in evidenza nel tempo una leggera tendenza alla diminuzione della correlazione con le centraline di riferimento: in ogni caso, nei limiti del periodo tardo-invernale e primaverile in cui è stata fatta questa campagna, i parametri di taratura sono risultati ragionevolmente stabili nel tempo su scale temporali fino a 45 giorni. Per quanto riguarda invece le campagne di misura effettuate durante il progetto Dynaxibility, la valutazione della stabilità nel tempo della taratura è stata basata sul confronto di uno *smart sensor* Ss3-Ss4-Ss5 lasciato presso la centralina di Colorno e quattro *smart sensor* di tipo Ss6-Ss7-Ss2 presso le stazioni Rrqa

2 Sensore smart: punto 8 - Polynt Porto.

3 Sensore smart: punto 7 - Bunge Teodora Porto.

di Cittadella, Montebello, Colorno e Badia per un periodo di oltre tre mesi (10/12/2021-21/3/2022).

Lo *smart sensor* Ss6-Ss7 mostra una buona stabilità delle *performance* fino a oltre un mese per il PM, ma nel periodo successivo compare un *bias* rispetto al valore di riferimento, in particolare una sovrastima. Un comportamento simile si ricava dall'andamento nel tempo della differenza tra il dato orario di NO<sub>2</sub> del riferimento e lo *smart sensor* Ss2: per questo inquinante, però, nell'ultima fase del periodo di interconfronto lo strumento non mostra *bias*, ma variazioni casuali senza un andamento definito di deriva o intensità della misura. La misura di NO<sub>2</sub> degli *smart sensor* di tipo Ss2, posizionati presso le quattro stazioni di riferimento, mostra un degrado nel tempo della prestazione per tutti gli strumenti e un aumento progressivo del *bias*. Dal punto di vista della stabilità delle calibrazioni nello spazio le campagne Dynaxibility non sono state caratterizzate dalla pianificazione rigorosa definita per le attività durante il progetto Awair. Sulla base di alcune analisi esplorative comunque è emersa una buona correlazione per i dati orari di NO<sub>2</sub> misurati dagli *smart sensor* Ss2, calibrati a Montebello (centralina da traffico), e spostati circa un mese dopo a Cittadella (stazione di fondo urbano), pur in presenza di un *bias* piuttosto rilevante, che sembra difficile poter addebitare soltanto al progressivo peggioramento nel tempo della *performance*, ma anche a un funzionamento non ottimale. Un'analoga analisi condotta per gli *smart sensor* di tipo Ss5 (tutti calibrati a Colorno, cinque dei quali ricollocati a Montebello e undici a Cittadella) ha messo in evidenza una procedura di taratura meno efficace, con bassi valori di R<sup>2</sup> e valori relativamente alti di Rmse, che si ripercuote negativamente sulle prestazioni nei siti in cui gli *smart sensor* sono stati ricollocati.

## La rete di sensori a Parma durante il progetto Dynaxibility

La disponibilità di un numero rilevante di *smart sensor* ha reso possibile l'implementazione di una rete della qualità dell'aria usando questa tipologia di strumenti. Questa attività ha rappresentato un esperimento pilota nell'area di Parma per testare un possibile utilizzo e avere indicazioni degli andamenti della qualità dell'aria a scala urbana e suburbana. Due campagne di misura sono state



FOTO: C. MACCONE - ARPAE

3

e eseguite rispettivamente nei periodi 12-26/1/2022 e 12-27/2/2022; ciascuna campagna è stata preceduta e seguita da un periodo di interconfronto durante il quale gli strumenti sono stati posizionati presso una stazione Rrqa nella provincia di Parma. Questi periodi sono stati utilizzati per effettuare la taratura degli *smart sensor*, mantenendo la corrispondenza della tipologia del sito sia durante i periodi di interconfronto che durante la campagna di misura vera e propria.

I valori medi della concentrazione di NO<sub>2</sub> nei due periodi dedicati alle campagne di misura hanno mostrato una rilevante variabilità spaziale, con valori compresi nel range 25-70 µg/m<sup>3</sup>, e gradienti pronunciati all'interno dell'area urbana, anche fra siti distanti solo qualche decina di metri. I siti di traffico sono generalmente quelli in cui si sono riscontrate le concentrazioni medie più alte, come era prevedibile, essendo il traffico la forzante principale di questo inquinante, mentre nei siti rurali le concentrazioni sono state mediamente inferiori. Una generale lieve sovrastima

del valore medio dei due periodi di campagna rispetto alle stazioni Rrqa è presente sia per i siti di traffico che per quelli nelle zone verdi dell'area urbana. La variabilità spaziale del PM<sub>10</sub> è decisamente meno pronunciata, con concentrazioni medie comprese tra 39 e 55 µg/m<sup>3</sup> nella prima campagna di misura e tra 35 e 42 µg/m<sup>3</sup> nella seconda. Inoltre le concentrazioni associate agli *smart sensor* posizionati nelle strade più trafficate rispetto ai siti nelle aree residenziali e nelle aree verdi sono solo leggermente più alte. Infine è presente un'ottima corrispondenza del valore medio degli *smart sensor* rispetto a quello delle stazioni di riferimento.

**Stefano Marchesi, Silvia Ferrari,  
Stefano Zauli**

Arpae Emilia-Romagna

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Zauli Sajani S., Marchesi S. et al., "Assessment of air quality sensor system performance after relocation", *Atmospheric Pollution Research*, 12 (2021), 282-291.