

L'analisi meteo-diffusiva: il caso studio della città di Torino

Meteo-diffusive analysis: a case study of Turin

Serena Poncino, Stefano Bande, Massimo Muraro

Area previsione e monitoraggio ambientale, ARPA Piemonte

Corrispondenza: Serena Poncino, e-mail: s.poncino@arpa.piemonte.it

Riassunto

Lo strato limite planetario (*planetary boundary layer*, PBL) svolge un importante ruolo nella regolazione dei processi di dispersione degli inquinanti. Nell'ambito del Progetto EpiAir (Inquinamento atmosferico e salute: sorveglianza epidemiologica e interventi di prevenzione) è stata effettuata un'analisi preliminare finalizzata a descrivere i principali parametri meteodiffusivi, utilizzando come caso studio la città di Torino. L'analisi meteodiffusiva descrive, attraverso parametri di sintesi, le principali caratteristiche della turbolenza del PBL

al fine di individuare le situazioni sfavorevoli (o favorevoli) alla dispersione degli inquinanti.

La conoscenza delle caratteristiche meteo-diffusive di una città è un valido supporto all'individuazione e alla programmazione di interventi di prevenzione mirati.

(*Epidemiol Prev* 2009; 33(6) suppl 1: 27-33)

Parole chiave: analisi meteo-diffusiva, altezza dello strato di rimescolamento, concentrazione giornaliera di PM10, classe di stabilità atmosferica, strato limite planetario, dispersione degli inquinanti

Abstract

The Planetary Boundary Layer (PBL) affects the pollutant dispersion process.

Within the EpiAir Project (Air pollution and health: epidemiological surveillance and prevention) we performed a preliminary analysis to identify adverse (or opportune) situation

for pollutant dispersion. Knowledge of the meteo-diffusive peculiarity of a city is an efficient support in identifying and planning preventive actions.

(*Epidemiol Prev* 2009; 33(6) suppl 1: 27-33)

Keywords: meteo-diffusive analysis, mixing height, daily PM10 concentration, Pasquill stability class, Planetary Boundary Layer, pollutant dispersion.

Introduzione

Lo stato di inquinamento di un'area è fortemente determinato dalle sorgenti emissive, dalle caratteristiche morfologiche della zona e anche dalle caratteristiche dello strato atmosferico che costituisce il limite inferiore della troposfera. Tale strato, denominato strato limite planetario (*planetary boundary layer*, PBL), può essere definito come quella parte di troposfera che viene direttamente influenzata dalla presenza della superficie terrestre e che risponde alle forzanti superficiali con un tempo di scala di circa un'ora o meno.¹ Le forzanti superficiali possono essere sia di tipo radiativo, come conseguenza dell'apporto energetico solare, sia di tipo meccanico, a causa dell'attrito fra aria e suolo, e spesso sono presenti entrambe contemporaneamente. A causa di queste forzanti si sviluppano dei moti turbolenti che coinvolgono tutto il PBL e dai quali dipendono le proprietà dispersive dello stesso.

Gli agenti inquinanti emessi dalle sorgenti presenti sulla terra vengono intrappolati nel PBL e dispersi verticalmente al suo interno per azione della turbolenza (meccanica e convettiva). Dopo un tempo sufficientemente lungo si raggiunge uno stato in cui le sostanze emesse sono completamente rimescolate e diluite in concentrazione uniforme. L'altezza del PBL non è

costante nel tempo: tanto minore è l'altezza dello strato di rimescolamento tanto più, a parità di emissioni, la concentrazione degli inquinanti in atmosfera sarà maggiore.¹

Obiettivo di questo lavoro, svolto nell'ambito del Progetto EpiAir, è evidenziare l'importanza dell'analisi meteo-diffusiva come supporto alla corretta valutazione dell'efficacia degli interventi di prevenzione.

Metodi

L'analisi meteo-diffusiva è stata condotta per la città di Torino, valutando l'altezza dello strato di rimescolamento, le classi di stabilità atmosferica e l'intensità del vento. I dati utilizzati sono relativi alle stazioni della rete di rilevamento meteoidrografica e di qualità dell'aria gestite dall'Agenzia regionale per la protezione ambientale del Piemonte, site in via della Consolata a Torino. Le analisi si sono limitate agli anni 2004 e 2005, in cui la copertura di dati è ottimale, e al 2007, anno in cui il Piemonte è stato caratterizzato da condizioni meteorologiche particolari che possono aver fortemente influenzato le concentrazioni degli inquinanti,² seppur non incluso nel periodo di studio del Progetto (2001-2005).

L'altezza dello strato di rimescolamento e le classi di stabilità atmosferica sono state calcolate con l'ausilio di un processore meteorologico diagnostico denominato CALIM sviluppato dall'Agenzia regionale per la protezione ambientale della Lombardia³ che, a partire da misure meteorologiche convenzionali (pressione atmosferica, velocità e direzione del vento, temperatura e umidità relativa dell'aria) ricostruisce i principali parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica sulla base di relazioni derivate dal bilancio energetico superficiale e dalla teoria di similarità di Monin-Obukhov.⁴ L'altezza di rimescolamento, detta anche altezza del PBL, è stata inoltre confrontata con la concentrazione giornaliera di PM10 misurata attraverso un campionatore gravimetrico.

Risultati

Essendo legata alla radiazione solare, l'altezza del PBL presenta sia un marcato ciclo diurno, sia un marcato ciclo stagionale, con valori minimi invernali (e quindi più critici per l'accumulo degli inquinanti) e valori massimi estivi (e quindi favorevoli alla dispersione).

Lo strato rimescolato inizia a svilupparsi all'alba, quando il suolo si riscalda per effetto dell'irraggiamento solare, cresce nel corso della mattina, raggiunge la sua massima altezza nel pomeriggio e decade rapidamente al tramonto, quando viene meno la forzante energetica principale, quella del sole.

A titolo di esempio, in **figura 1** sono rappresentati i valori orari medi dell'altezza del PBL dei mesi di giugno e dicembre 2004; si evidenziano chiaramente il ciclo diurno e il diverso andamento dell'altezza di rimescolamento nel mese estivo e in quello invernale, dovuti al diverso irraggiamento solare.

Sono stati analizzati i valori massimi giornalieri dell'altezza dello strato rimescolato; i *box plot* delle distribuzioni mensili (**figura 2**) evidenziano la ciclicità stagionale del PBL.

Anche la concentrazione giornaliera di PM10 presenta un andamento con ciclicità stagionale, come mostrato dai *box plot* su base mensile di **figura 3**. Dal confronto dei *box plot* mensili dell'altezza massima giornaliera dello strato di rimescolamento (**figura 2**) e della concentrazione giornaliera di PM10 (**figura 3**) è evidente una connessione tra le due variabili. Nei mesi estivi, all'aumentare dell'altezza del PBL si osserva una diminuzione della concentrazione di PM10 che invece aumenta nei mesi invernali, quando lo strato rimescolato è più basso. A livello qualitativo, si può inoltre osservare in **figura 2** come l'altezza dello strato di rimescolamento del mese di ottobre nel 2007 sia più elevata che nello stesso mese degli anni 2004 e 2005. Al contempo, in **figura 3** la concentrazione di PM10 misurata nel mese di ottobre 2007 è inferiore a quanto misurato nello stesso mese del 2004 e del 2005. Occorre comunque ricordare, con riferimento ai dati riportati nelle tabelle e relativi al mese di settembre, che la sola altezza dello strato di rimescolamento non è in grado di spiegare completamente i livelli di concentrazione del PM10, essendo lo stato di inquinamento di un'area influenzato da

molteplici fattori, sia emissivi sia meteorologici, con fenomeni che agiscono da abbattitori degli inquinanti in atmosfera, per esempio attraverso le precipitazioni per «dilavamento» o il vento per «dispersione».

La connessione tra la stabilità del PBL e la concentrazione di inquinanti trova conferme nel confronto tra la serie storica della concentrazione giornaliera di PM10 e del massimo giornaliero dell'altezza di rimescolamento (**figura 4**) in cui si può osservare una frequente corrispondenza tra i picchi della concentrazione di particolato e i minimi delle altezze massime del PBL. La classe di stabilità atmosferica è un parametro ideato con l'intento di rappresentare in modo sintetico lo stato turbolento del PBL raggruppando le possibili configurazioni meteorologiche che influenzano la dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Tradizionalmente, secondo la classificazione di Pasquill-Gifford-Turner⁵ (classi PGT) sono previste tre categorie (denominate A, B e C) che rappresentano le situazioni convettive, favorevoli alla dispersione degli inquinanti, una categoria che rappresenta tutte quelle situazioni prossime all'adiabaticità (denominata D) e due categorie stabili, relative

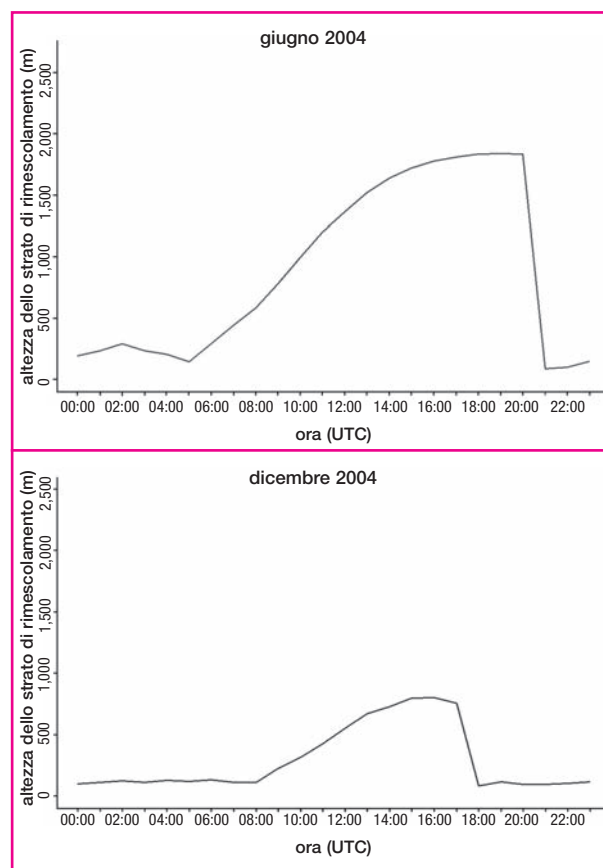


Figura 1. Ciclo diurno medio mensile dell'altezza dello strato di rimescolamento (Torino Consolata: giugno 2004 e dicembre 2004).

Figure 1. Daily cycle of mixing height (Turin Consolata: June 2004 and December 2004).

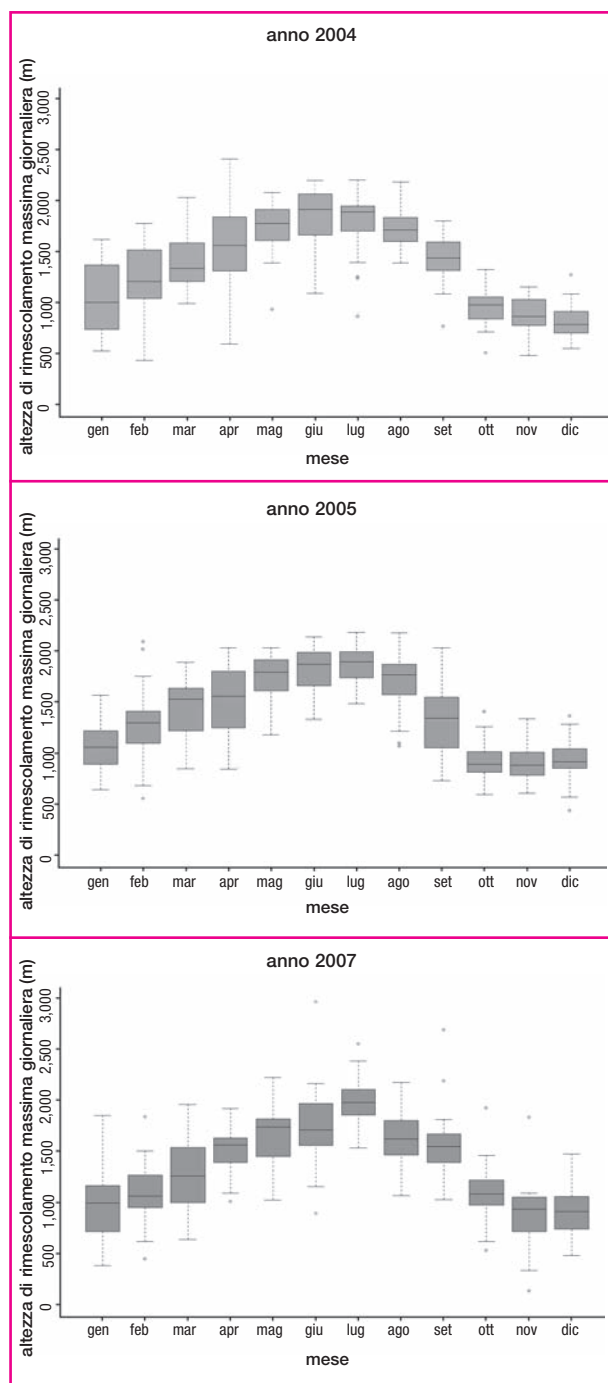


Figura 2. Box plot mensili dei dati giornalieri dell'altezza massima dello strato di rimescolamento (Torino Consolata: 2004-2005-2007).

Figure 2. Monthly boxplot of daily maximum mixing height (Turin Consolata: 2004-2005-2007).

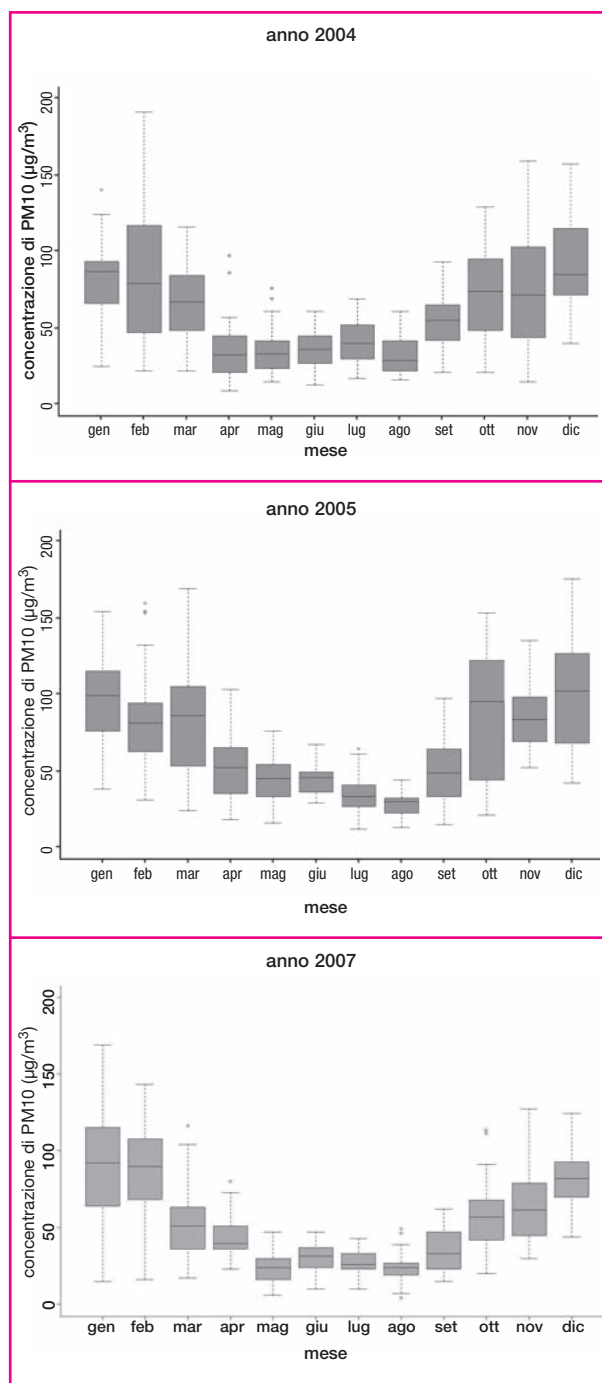


Figura 3. Box plot mensili dei dati giornalieri della concentrazione di PM10 (Torino Consolata: 2004-2005-2007).

Figure 3. Monthly boxplot of daily PM10 concentration (Turin Consolata: 2004-2005-2007).

75° (75th) percentile	2004	2005	2007
Settembre (September)	1590 m	1535 m	1660 m
Ottobre (October)	1055 m	1015 m	1210 m

75° (75th) percentile	2004	2005	2007
Settembre (September)	65 µg/m ³	65 µg/m ³	45 µg/m ³
Ottobre (October)	95 µg/m ³	120 µg/m ³	70 µg/m ³

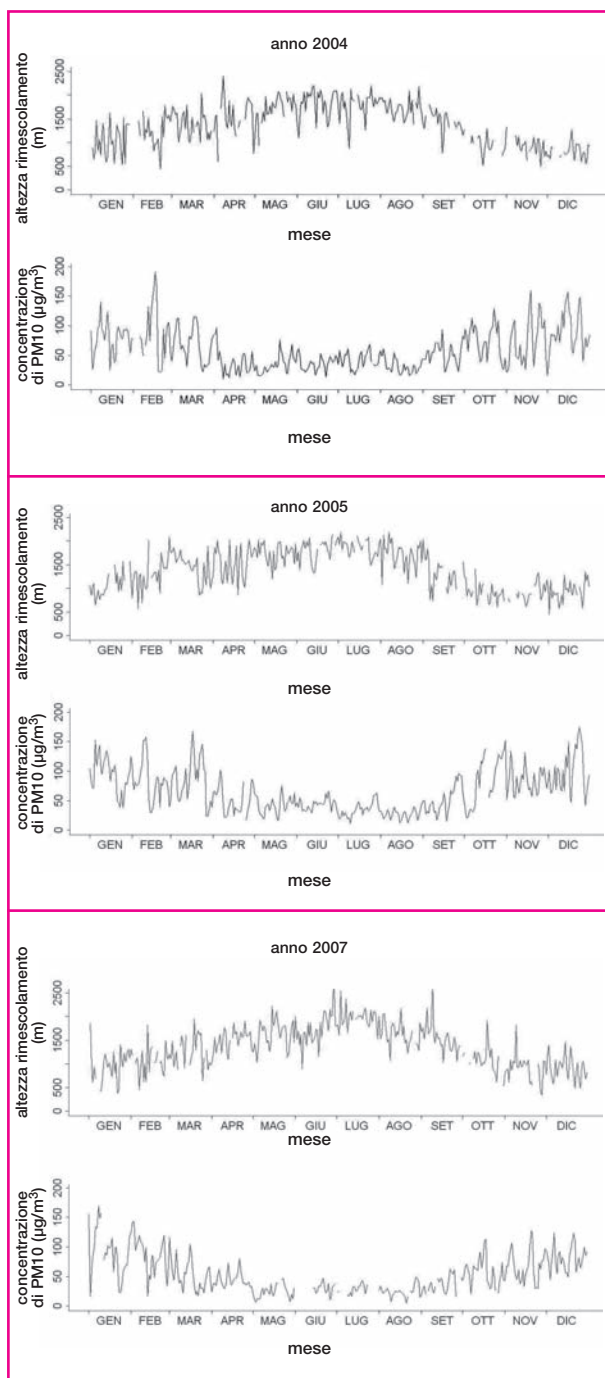


Figura 4. Concentrazione giornaliera di PM10 e altezza di rimescolamento massima giornaliera (Torino Consolata: 2004-2005-2007).

Figure 4. Daily PM10 concentration and daily maximum mixing height (Turin Consolata: 2004-2005-2007).

esclusivamente a situazioni notturne (categorie E e F). La categoria A rappresenta situazioni molto convettive, con velocità del vento bassa e forte insolazione. La categoria B è una situazione che si presenta quando o la radiazione solare è relativamente poco elevata o la velocità del vento (e quindi la

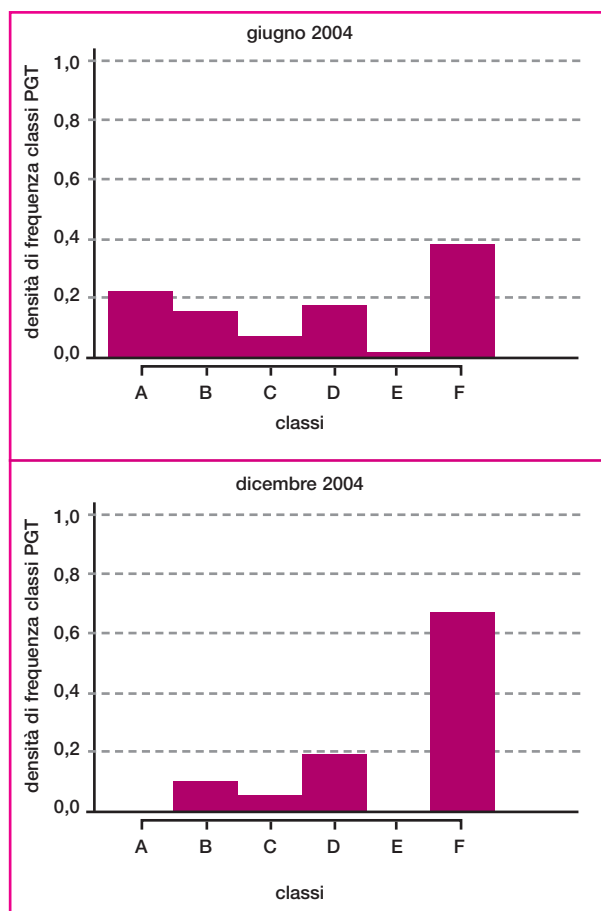


Figura 5. Distribuzioni di densità di frequenza delle occorrenze orarie delle classi di stabilità, calcolate su base mensile (Torino Consolata: giugno 2004 e dicembre 2004).

Figure 5. Monthly density frequency distribution of hourly Pasquill stability class (Turin Consolata: June 2004 and December 2004).

turbolenza di origine meccanica) è alta. La categoria C ha luogo quando la velocità del vento è elevata e la radiazione solare è ridotta; la D rappresenta situazioni diurne o notturne con cielo coperto e vento; infine, la categoria E è relativa a situazioni notturne con vento abbastanza elevato e cielo poco nuvoloso, mentre la categoria F corrisponde a situazioni con cielo stellato e velocità del vento bassa.⁵

Come rilevato in precedenza per l'altezza dello strato rimescolato, ci sono differenze tra i mesi invernali e quelli estivi. Dalle analisi effettuate è risultata un'elevata omogeneità tra i due anni analizzati, 2004 e 2005.

In figura 5 sono riportate le distribuzioni di frequenza mensili delle classi di stabilità (orarie), calcolate a partire dai dati meteorologici per i mesi di giugno e dicembre 2004. La classe di stabilità A, corrispondente a situazioni di elevata convezione, non è presente nei mesi invernali, caratterizzati da minore irraggiamento solare, mentre la classe F è più frequente. In figura 6 è rappresentata la moda delle distribuzioni delle occorrenze orarie delle classi di stabilità, calcolate su base

mensile. Poiché alle ore notturne è sempre associata una classe stabile, di tipo E o F, in questo grafico si sono considerati i soli dati diurni considerando le occorrenze orarie misurate dalle ore 06:00 UTC alle ore 18:00 UTC (con tramonto e alba quindi compresi).

Il grafico relativo all'anno 2005 (dato non mostrato) risulta identico a quello relativo al 2004. Anche in questo caso, da una semplice analisi qualitativa si osserva una ciclicità stagionale con una maggiore instabilità nei mesi estivi (con moda in classe A) e una maggiore stabilità nei mesi invernali. Il grafico relativo all'anno 2007 risulta molto diverso da quelli ottenuti per gli anni 2004 e 2005. La moda del mese di maggio appartiene alla classe D, corrispondente a tutte quelle situazioni (stabili o convettive) prossime all'adiabaticità, mentre i mesi di settembre e ottobre sono stati nettamente più instabili rispetto agli altri anni, favorendo, come già visto, i fenomeni di dispersione.

Il vento influisce in modo rilevante sulle dinamiche di dispersione in atmosfera: venti intensi favoriscono il rimescolamento nell'aria delle sostanze emesse dalla sorgente costituendo, insieme alle precipitazioni, uno dei principali feno-

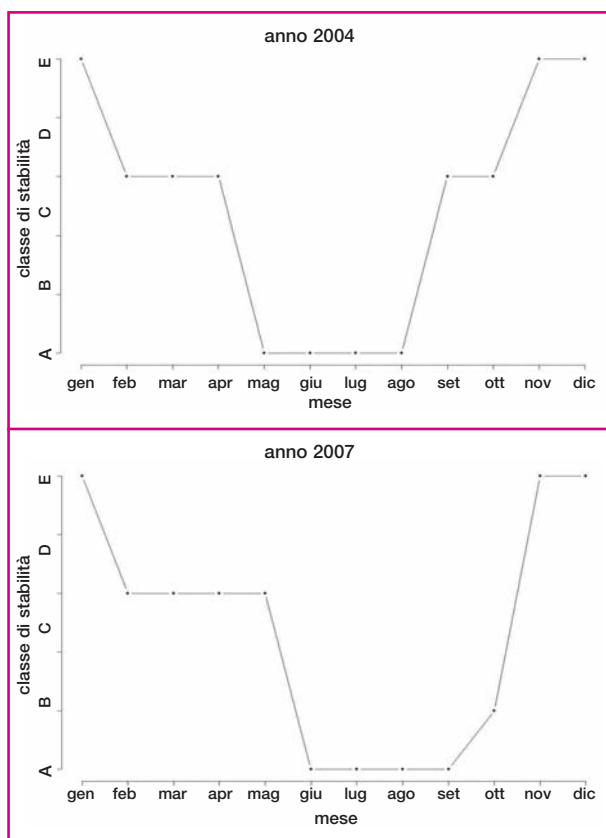


Figura 6. Moda delle distribuzioni delle occorrenze orarie diurne (06:00 UTC÷18:00 UTC) delle classi di stabilità, calcolate su base mensile (Torino Consolata: 2004-2007).

Figure 6. Monthly Pasquill stability class distribution mode (Turin Consolata: 2004-2007).

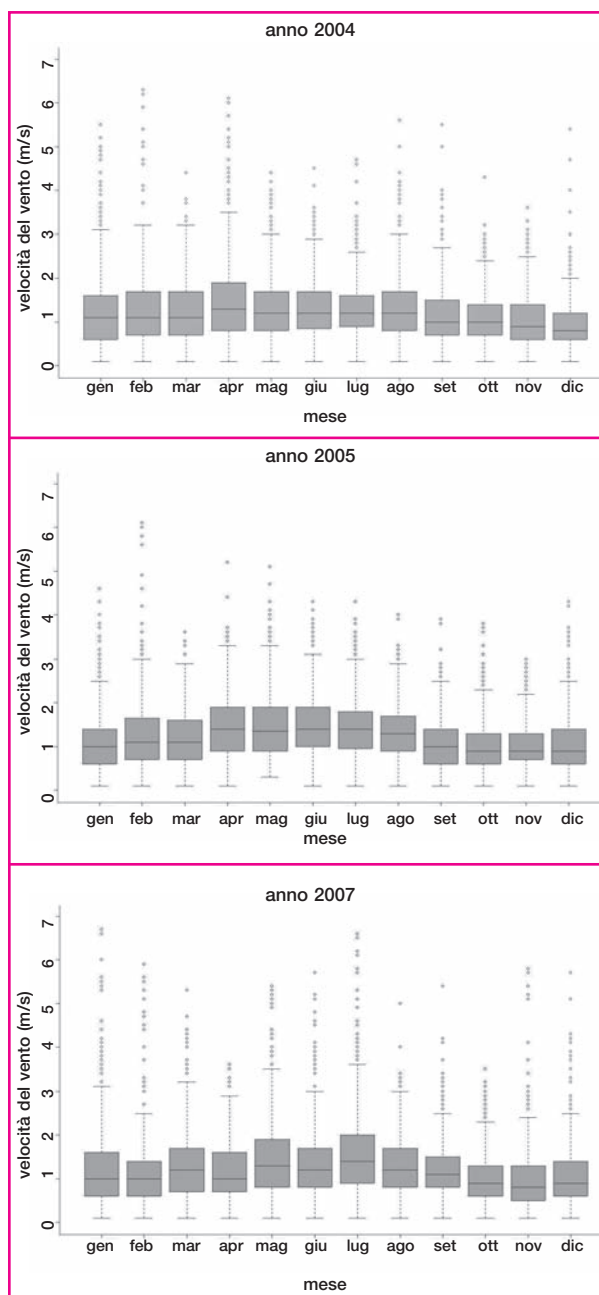


Figura 7. Box plot mensili dell'intensità oraria della velocità del vento (Torino Consolata: 2004-2005-2007).

Figure 7. Box plot mensili dell'intensità oraria della velocità del vento (Torino Consolata: 2004-2005-2007).

meni di abbattimento delle concentrazioni (si pensi per esempio ai venti di caduta tipici delle regioni alpine), mentre venti molto deboli (la «calma di vento» tipica della pianura padana), spesso associati a perduranti condizioni anticicloniche, favoriscono l'accumulo degli inquinanti. L'interazione del campo di vento con la superficie terrestre (rilievi e rugosità del terreno), inoltre, genera turbolenza di origine mec-

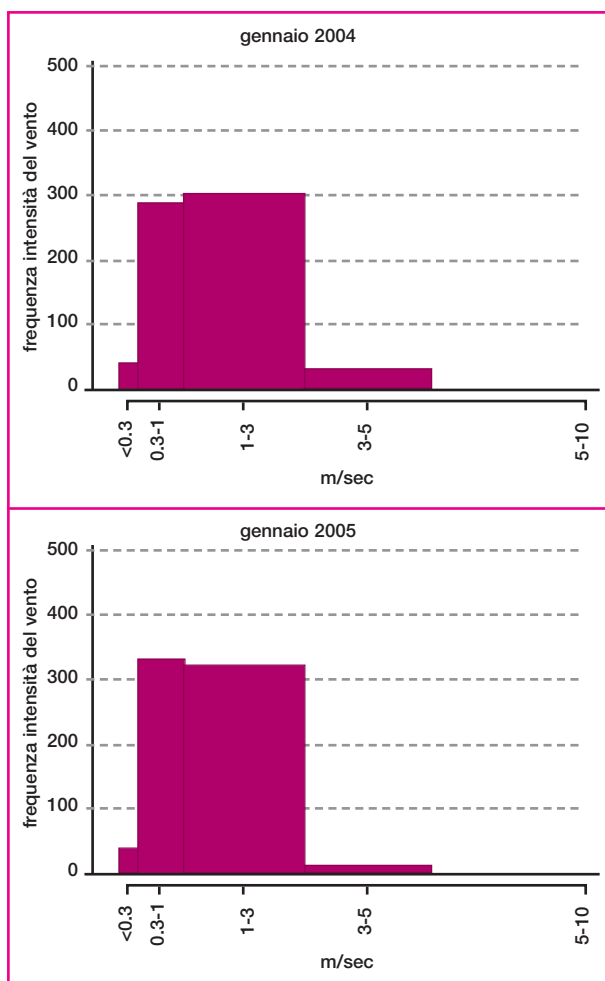


Figura 8. Distribuzione di frequenza mensile dell'intensità del vento (Torino Consolata: gennaio 2004-2005).

Figure 8. Frequency distribution of wind speed (Turin Consolata: January 2004-2005).

canica, mentre l'esistenza di complessità e disomogeneità del terreno e la presenza di ampie aree urbanizzate induce lo sviluppo di dinamiche locali (brezze di monte-valle, terra-mare o l'isola di calore urbana) che si sovrappongono alla struttura generale della circolazione atmosferica influenzando in modo significativo la dispersione.²

In figura 7 le distribuzioni mensili dell'intensità oraria della velocità del vento sono state rappresentate tramite *box plot*. Le maggiori criticità per quanto riguarda la dispersione degli inquinanti atmosferici si hanno nei mesi invernali: durante il mese di gennaio 2004 gli episodi di vento compreso tra 3 e 5 m/s sono stati più frequenti rispetto al 2005, con qualche evento con intensità compresa tra 5 e 10 m/s (figura 8).

La maggiore ventilazione ha favorito la dispersione del particolato, come mostrato dai *box plot* mensili della concentrazione di PM10 (figura 3) in cui la distribuzione del mese di gennaio 2004 è caratterizzata dal 1° e 3° quartile infe-

riori rispetto allo stesso mese del 2005. Nel corso del 2007 si sono verificati diversi episodi ventosi, specie in alcuni mesi dell'anno. Le condizioni di generale stabilità dell'ultimo trimestre del 2007 sono state attenuate da frequenti episodi di vento intenso che in alcune occasioni ha raggiunto intensità comprese tra 5 e 10 m/s e che ha favorito la dispersione degli inquinanti.

Discussione

Il lavoro svolto mostra come sia possibile stimare sinteticamente, a partire da un *set* di grandezze comunemente misurate da una stazione meteorologica, lo stato di turbolenza dello strato superficiale del PBL nei pressi del sito di misura.

L'indagine esplorativa effettuata ha mostrato una connessione tra le caratteristiche meteo-diffusive dell'atmosfera e i livelli di concentrazione di PM10 rilevati in uno stesso sito di misura. L'analisi, seppure di carattere descrittivo, ha evidenziato le differenze fra i tre anni oggetto di studio e anzitutto tra i primi due anni, 2004 e 2005, e il 2007, caratterizzato rispetto ai precedenti da particolari condizioni meteorologiche. Lo sviluppo di tali approcci analitici potrebbe rivelarsi un valido supporto per la definizione e la programmazione di interventi di prevenzione mirati, nonché per una corretta valutazione della loro efficacia.

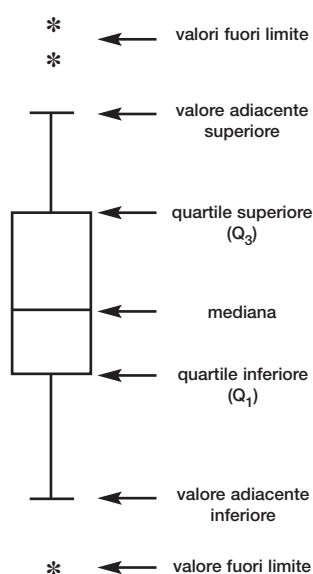
Gli interventi di prevenzione possono essere resi più efficaci attraverso l'utilizzo di informazioni prognostiche derivate da modelli meteorologici. A parità di emissioni, infatti, è soltanto la meteorologia a determinare i livelli di inquinamento a cui è esposta la popolazione. In particolare, la meteorologia agisce da abbattitore degli inquinanti in atmosfera, per «dilavamento» attraverso le precipitazioni, tra cui la forma più efficace è la neve, e per dispersione, in condizioni di vento o di elevata turbolenza. Configurazioni meteorologiche invernali caratterizzate dalla presenza di anticicloni o promontori di alta pressione determinano condizioni di stabilità atmosferica riducendo le capacità di dispersione. Tali configurazioni, a causa delle caratteristiche di stazionarietà, spesso determinano il perdurare delle condizioni di stabilità, favorendo valori crescenti di concentrazione degli inquinanti in aria. Conoscere l'influenza delle condizioni meteo-diffusive di un sito sullo stato di inquinamento dell'aria permetterebbe di conoscere la reale entità della riduzione dell'inquinamento dovuta all'applicazione di provvedimenti preventivi. Pertanto, questo tipo di approccio permetterebbe una conoscenza preliminare e sintetica delle condizioni meteo-diffusive localizzate, attraverso tecniche di applicazione rapida ed estendibile a lunghi periodi. Inoltre, può costituire un utile strumento per la valutazione delle concentrazioni di inquinanti e in particolare per valutare a posteriori la reale efficacia degli interventi di contenimento, onde permettere ai soggetti preposti di orientare e programmare meglio gli stessi.

Conflitti di interesse: nessuno.

Bibliografia

1. Stull RB. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht 1988.
2. Logisci N, Nicoletta M, Paesano G et al. *Relazione tecnica preliminare sulla qualità dell'aria nella regione Piemonte nell'inverno 2006-2007*. ARPA Piemonte, Torino 2007. [http://www.arpa.piemonte.it/upload/dl/](http://www.arpa.piemonte.it/upload/dl/Pubblicazioni/valutazione_preliminare_inverno2006-07.pdf)
3. Lussana C. CALIM v2.1 - Documentazione scientifica, 29 marzo 2005.
4. Sozzi R. *La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria*. APAT CTN-ACE, 2003.
5. Pasquill F, Smith FR. *Atmospheric diffusion* (3° edition). John Wiley & Sons Inc., New York 1983.

COME SI LEGGE UN BOX PLOT



Il *box plot* è un metodo grafico e compatto per rappresentare una distribuzione statistica. La distribuzione viene descritta tramite un rettangolo i cui estremi corrispondono al **primo e terzo quartile (Q_1 e Q_3)** della distribuzione.

La linea interna al rettangolo rappresenta la **mediana**. La distanza tra il terzo e il primo quartile è una misura della dispersione della distribuzione.

Le distanze tra ciascun quartile e la mediana forniscono informazioni relativamente alla **forma** della distribuzione: se una distanza è diversa dall'altra allora la distribuzione è asimmetrica. Le due righe (detti anche baffi) che si allungano dai bordi della scatola individuano i valori esterni alla scatola e i loro estremi (denominati, rispettivamente, **valore adiacente superiore e inferiore**) corrispondono ai valori distanti 1,5 volte la distanza interquartile a partire rispettivamente dal terzo e dal primo quartile ($Q_3+1,5r$ e $Q_1-1,5r$, dove $r = Q_3-Q_1$).

I valori esterni a questi limiti sono segnalati individualmente nel *box plot* per meglio evidenziarne la presenza e la posizione. Questi valori, detti *outlier*, sono estremi rispetto alla maggior parte dei valori osservati e pertanto è necessario identificarli per poterne analizzare le caratteristiche e le eventuali cause che li hanno determinati. Essi forniscono informazioni ulteriori sulla dispersione e sulla forma della distribuzione.

Quando i **valori adiacenti, superiore e inferiore** coincidono con gli estremi della distribuzione non comparirà alcun valore fuori limite.

(Da: William S. Cleveland, *Visualizing data*. At & T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1993).