

MONITORAGGIO DELLA QUALITA' DELL'ARIA, STUDIO DELLA TURBOLENZA ATMOSFERICA E SIMULAZIONE DI DISPERSIONE DI INQUINANTI NEL CENTRO STORICO DI BOLOGNA

V. Poluzzi*, S. Ricciardelli*, F. Ferrari*, M. Ridolfi*, S. Ruiba*, P.P. Franceschi*, A. Nerozzi*,
I. Ricciardelli*, P. Rinaldi**, M. Ascanelli**, M. Nardino***, T. Georgiadis***, G.
Brusasca****, A. Piersanti****, G. Tinarelli****, R. Mazzetti*****, C. Rondinini*****.
(*Arpa Sezione Provinciale di Bologna, **Arpa Sezione Provinciale di Ferrara, ***CNR Bologna,
****ARIANET S.r.l., *****Unità Ambiente Comune di Bologna)

1 Premessa

Nel periodo dal 14/11/2003 al 04/12/2003 si è svolta una campagna di monitoraggio per valutare la qualità dell'aria nel centro storico di Bologna con campionamenti eseguiti in Via Farini, Via Rizzoli e in 2 punti di Via D'Azeglio (Galleria dei Notai e Piazza dei Celestini) all'interno dell'isola pedonale, come evidenziato in fig. 1.

Sono stati effettuati campionamenti per la determinazione di diversi inquinanti atmosferici quali: materiale particolato espresso come PTS, PM10 e PM2,5, Benzene, Idrocarburi Policiclici Aromatici, Ossidi di Azoto, Monossido di Carbonio, Biossido di Zolfo e Ozono. I risultati ottenuti per quest'ultimo inquinante non vengono qui discussi in quanto poco significativi visto il periodo autunnale/invernale della campagna di misura.

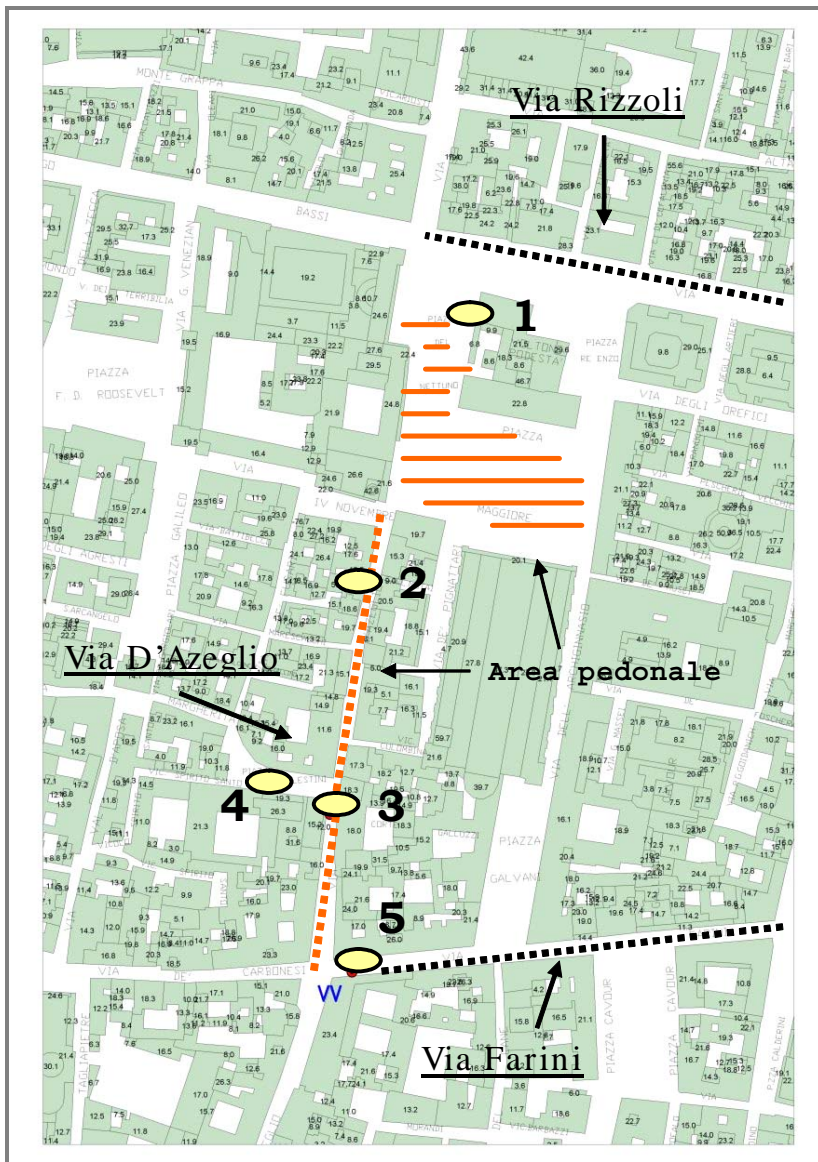
Nello stesso periodo è stato effettuato dal CNR di Bologna uno studio della turbolenza superficiale e, più in particolare, dei parametri di stabilità atmosferica.

A tal scopo sono stati utilizzati, durante la campagna di misura, un anemometro sonico e un analizzatore di gas all'infrarosso che hanno campionato, ad alta frequenza, le componenti del vettore vento, la temperatura dell'aria, l'umidità specifica e la concentrazione di anidride carbonica. Al fine di studiare l'impatto del traffico veicolare sulle concentrazioni, il Comune di Bologna ha misurato i flussi di veicoli in transito in via Ugo Bassi (conteggi mediante tubi pneumatici) e Arpa Emilia-Romagna ha rilevato i transiti in via Farini (mediante un sistema di videoripresa e conteggio automatico posto sul mezzo mobile di campionamento della qualità dell'aria).

A supporto delle misurazioni sperimentali, ARIANET S.r.l., in collaborazione con l'Unità Ambiente del Comune di Bologna, ha realizzato un'applicazione di modellistica numerica di microscala per il calcolo della dispersione degli inquinanti in atmosfera nella zona, tenendo conto delle emissioni del traffico veicolare nelle strade adiacenti e simulando l'effetto della complessa conformazione dell'edificato urbano sulla dispersione.

L'obiettivo di tale indagine è stata la valutazione delle concentrazioni di alcune sostanze inquinanti in un'area pedonale del centro storico di Bologna contornata da strade all'interno della ZTL (Zona a Traffico Limitato); con l'aiuto dei parametri di turbolenza e micrometeorologici si è poi effettuata un'applicazione di tipo modellistico al fine di simulare i comportamenti di alcuni degli inquinanti monitorati.

Figura 1 – Collocazione dei punti di monitoraggio dei parametri di qualità dell'aria e dell'anemometro sonico



Punti di campionamento:

- 1) **Via Rizzoli** (ZTL) :
 - laboratorio mobile – misure orarie di PTS-PM10, NOx, CO, SO₂
 - campionatore passivo giornaliero di benzene
- 2) **Via D'Azeglio-Celestini** (pedonale):
 - misura giornaliera di PM10
 - campionatore passivo giornaliero di benzene
- 3) **Via D'Azeglio-Galleria Notai** (pedonale):
 - misura giornaliera di PM10
 - campionatore passivo di benzene giornaliero
- 4) **Piazza dei Celestini** (pedonale):
 - campionatore passivo giornaliero di benzene
- 5) **Via Farini** (ZTL):
 - laboratorio mobile – misure orarie di PTS-PM10-PM2,5, benzene, NOx, CO, O₃, composti carbonilici
 - campionatore passivo giornaliero di benzene

VV = Anemometro sonico

2 Analisi della qualità dell'aria

2.1 Frazione del Materiale Particolato PM2,5

Il valore medio di PM2,5 misurato in Via Farini risulta di 62 µg/m³ che rappresenta circa il 63% del corrispondente valore di PM10 rilevato nello stesso punto.

2.2 Frazione del Materiale Particolato PM10

Nella Tabella 1 sono riportati i valori medi giornalieri delle concentrazioni di PM10 rilevati nelle quattro postazioni di prelievo: emerge come il valore medio di tutto il periodo di monitoraggio sia notevolmente superiore in Via Farini (99 µg/m³) rispetto agli altri tre punti nei quali le concentrazioni rilevate sono praticamente equivalenti.

Tabella 1 - Materiale Particolato PM10, tempo di mediazione 24 ore

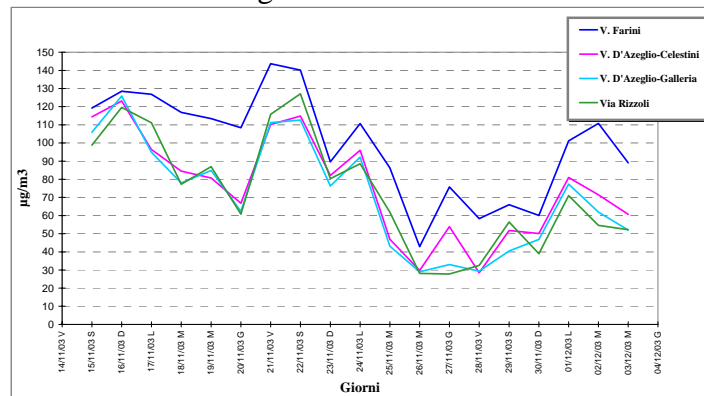
Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	% di valori > 50 µg/m ³	% di valori > 60 µg/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/2003	19	43	144	99	94,7	89,5
Via D'Azeglio-Celestini	14/11-04/12/2003	19	28	123	76	84,2	68,4
Via D'Azeglio-Galleria	14/11-04/12/2003	19	29	126	71	68,4	63,2
Via Rizzoli	14/11-04/12/2003	19	28	127	73	78,9	63,2

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

I valori di PM10 rappresentano rispettivamente il 69 % e l'82 % di PTS di via Farini e di via Rizzoli.

Il Grafico 1 riporta le concentrazioni giornaliere di PM10 nei quattro punti di prelievo durante il periodo di monitoraggio e mostra come l'andamento di tali concentrazioni nelle varie giornate sia assolutamente coincidente in tutte le zone monitorate.

Grafico 1 - PM10: valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.3 Particolato Totale Sospeso (PTS)

Le concentrazioni giornaliere di PTS sono state misurate nei due Laboratori Mobili, in Via Farini ed in via Rizzoli. I risultati sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2 - Particolato Totale Sospeso, tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Valore 95° percentile	Numero di valori > 300 µg/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	
Via Farini	14/11-04/12/2003	19	59	206	144	189	0
Via Rizzoli	14/11-04/12/2003	14	42	145	89	142	0

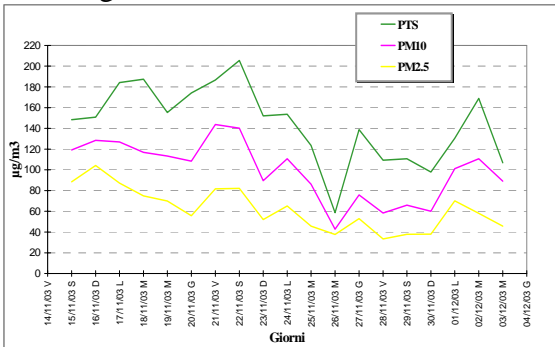
Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

I valori medi registrati sono inferiori al valore limite di 150 µg/m³ da valutare, comunque, sulla media dei valori giornalieri di un intero anno.

Il Grafico 2 evidenzia la notevole correlazione tra i valori giornalieri di concentrazione di PTS, PM10 e PM2,5 rilevati in Via Farini.

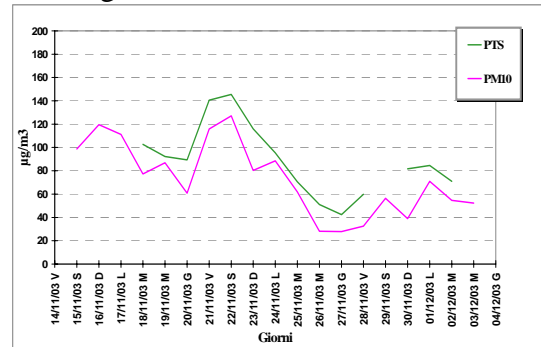
Nel Grafico 3 si nota la correlazione tra i dati giornalieri di PTS e PM10 misurati in Via Rizzoli.

Grafico 2 – PTS, PM10, PM2,5 valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 3 – PTS e PM10 valori medi giornalieri rilevati in via Rizzoli



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.4 Benzo(a)pirene

Le concentrazioni degli IPA dispersi in aria sono stati determinati nei campioni prelevati per la misura del PM10 e PM2,5 in Via Farini, nei campioni di PM10 prelevati nelle due postazioni di Via D’Azeglio e nei campioni di PTS prelevati in Via Rizzoli.

Nella Tabella 3 sono riportati le concentrazioni medie, minime e massime di benzo(a)pirene rilevate in ogni postazione di prelievo nel periodo di indagine.

Tabella 3 – Benzo(a)pirene, Tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori >1 ng/m ³	% di valori >1 ng/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
Via Farini (PM2,5)	14/11-04/12/03	19	0,88	2,98	1,95	17	89,5
Via Farini (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,84	3,14	1,96	18	94,7
V. D’Azeglio-Celestini (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,13	0,59	0,26	0	0
V. D’Azeglio-Galleria (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,26	1,75	0,72	4	21,1
Via Rizzoli (PTS)	14/11-04/12/03	19	0,64	3,80	1,85	16	84,2

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

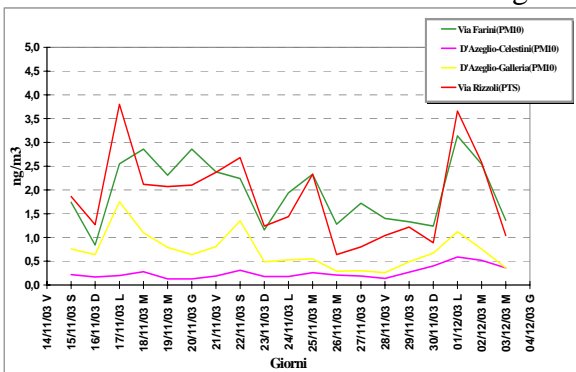
Si rileva innanzitutto come i valori delle concentrazioni medie del benzo(a)pirene sono coincidenti nei campioni di PM10 e di PM2,5 prelevati nella postazione di Via Farini ad indicare come tutti gli IPA siano nel particolato con granulometria inferiore al PM2,5. Questo è ulteriormente confermato nel Grafico 5 che dimostra come anche i valori giornalieri di benzo(a)pirene trovati nei campioni di PM10 e PM2,5 siano sempre molto simili.

E’ rilevante notare come mentre i valori di benzo(a)pirene di Via Farini e Via Rizzoli sono molto simili, quelli delle due postazioni di Via D’Azeglio (area pedonale) risultano notevolmente inferiori.

In particolare, il benzo(a)pirene di Via D’Azeglio-Celestini risulta molto basso anche rispetto a quanto rilevato in Via D’Azeglio-Notai. Tale andamento risulta in contrasto con quello degli altri parametri rilevati nelle due postazioni, i quali hanno, al contrario, fornito valori di concentrazione molto simili.

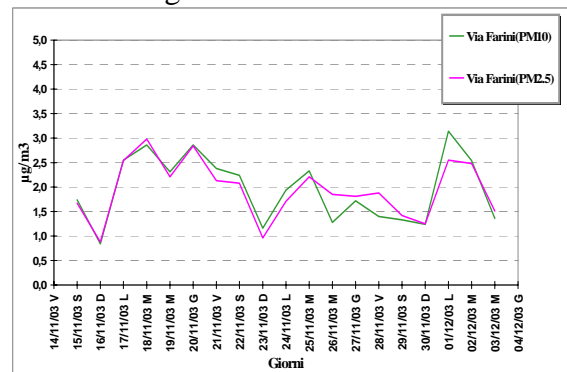
La notevole diversità nelle concentrazioni medie di benzo(a)pirene relativa al periodo di indagine in questi due punti è d’altra parte costantemente presente in tutti i valori di concentrazione determinati nei 19 singoli campioni giornalieri come si evince dal Grafico 4 dove si evidenzia pure la notevole corrispondenza nell’andamento delle concentrazioni giornaliere tra le varie postazioni.

Grafico 4 - Benzo(a)pirene, andamento dei valori medi rilevati nel centro di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 5 - Benzo(a)pirene, andamento dei valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.5 Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)

Nella Tabella 4 sono riportate le concentrazioni medie, minime e massime di alcuni IPA rilevate nel periodo di indagine nelle varie postazioni di prelievo. Tali valori sono formati dalla somma delle concentrazioni di sette IPA, quali:

benzo(a)antracene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene, benzo(J)fluorantene, benzo(a)pirene, dibenzo(a,h)antracene e indeno(1,2,3-cd)pirene.

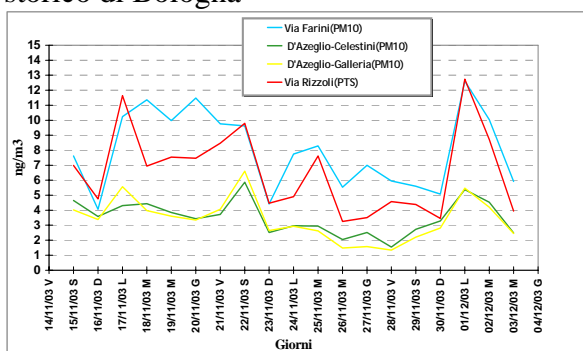
Dalla Tabella 4 e dal successivo Grafico 7 si evidenzia come anche le concentrazioni di IPA, al pari di quella del solo benzo(a)pirene, sono coincidenti nei campioni di PM10 e di PM2,5: il valore medio più elevato si è riscontrato in Via Farini, quello di Via Rizzoli è leggermente inferiore e i due di Via D'Azeglio sono notevolmente più bassi come evidenziato nel grafico 6. E' importante inoltre sottolineare che non si evidenzia più la differenziazione rilevata nel caso del benzo(a)pirene.

Tabella 4 - Idrocarburi Policiclici Aromatici, tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Via Farini (PM2,5)	14/11-04/12/03	19	3,88	11,63	8,02
Via Farini (PM10)	14/11-04/12/03	19	4,06	12,61	8,02
V. D'Azeglio-Celestini (PM10)	14/11-04/12/03	19	1,00	5,86	3,36
V. D'Azeglio-Galleria (PM10)	14/11-04/12/03	19	1,34	6,60	3,38
Via Rizzoli (PTS)	14/11-04/12/03	19	3,25	12,74	6,59

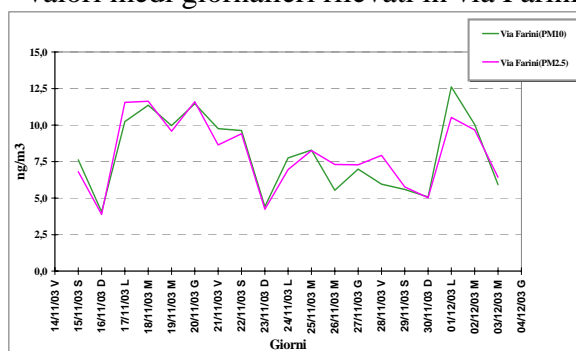
Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 6 - Andamento degli IPA nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 7 - Idrocarburi Policiclici Aromatici, valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.6 Benzene

Nella Tabella 5 sono riportati i valori medi, minimi e massimi di benzene misurati nei 19 giorni di indagine nelle varie postazioni di campionamento e le percentuali di giornate in cui è stato superato il valore di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valore limite annuale per la protezione della salute umana in vigore fino al 2005, ed il valore di $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ che costituirà tale limite dal 2010, come previsto dal Decreto n° 60 del 2 Aprile 2002.

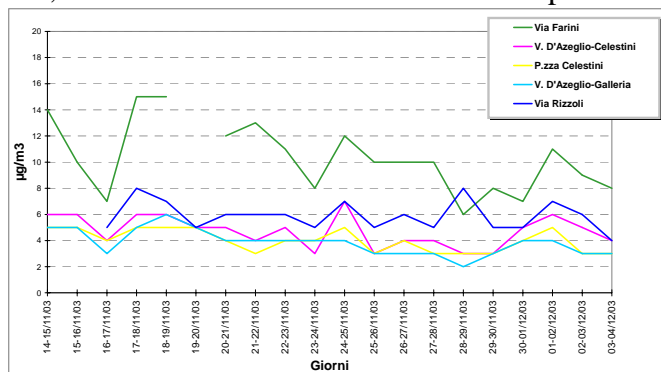
Tabella 5 - Benzene, tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	% di valori > $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	% di valori > $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
			$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		
Via Farini (G.C.)	14/11-04/12/03	19	7	16	11	100,0	57,9
Via Farini (Passivi)	14/11-04/12/03	19	6	15	10	100,0	42,1
V. D'Azeglio-Celestini (Pass.)	14/11-04/12/03	20	3	7	5	30,0	0,0
Piazza Celestini (Passivi)	14/11-04/12/03	20	3	5	4	0,0	0,0
V. D'Azeglio-Galleria (Pass.)	14/11-04/12/03	20	2	6	4	5,0	0,0
Via Rizzoli (Passivi)	14/11-04/12/03	19	4	8	6	57,9	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Si evidenzia come la concentrazione media del periodo indagato misurata in Via Farini sia anche in questo caso la più elevata, circa la metà quella di Via Rizzoli e appena inferiori a quest'ultima quelle rilevate nelle tre postazioni ubicate nell'isola pedonale, Via D'Azeglio-Celestini, Via D'Azeglio-Notai e Piazza dei Celestini.

Grafico 8 - Benzene, valori medi di 24 ore rilevati con campionatori passivi a Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.7 Monossido di Carbonio (CO)

Si può notare, dalle tabelle 6 ed 7, come i valori di CO siano sempre notevolmente superiori in Via Farini rispetto a Via Rizzoli, considerando sia i valori medi di 1 ora che di 8 ore.

Tabella 6 - Monossido di Carbonio, tempo di mediazione 1ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 40 mg/m ³	% di valori > 40 mg/m ³
			mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/03	477	0,6	5,9	2,4	0	0,0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	471	0,0	3,2	0,8	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

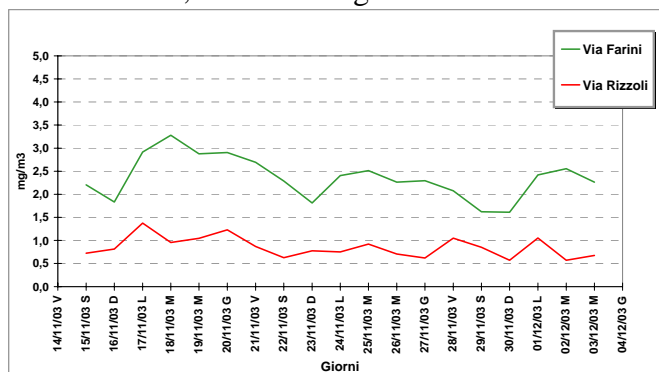
Tabella 7 - Monossido di Carbonio, tempo di mediazione 8 ore (media mobile)

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 10 mg/m ³	Numero di valori > 14 mg/m ³
			mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/03	472	0,9	4,5	2,4	0	0,0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	472	0,2	2,0	0,8	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Dal Grafico 9 sembra non emergere, in Via Rizzoli, la diminuzione domenicale dei valori di CO, al contrario di quanto riscontrato in Via Farini. Tale situazione può derivare sia dalla diversa tipologia delle due postazioni di rilievo sia dalle caratteristiche del gas CO. Il campionatore di Via Rizzoli, infatti, è stato posizionato in una zona molto aperta che permette la dispersione del CO, gas che peraltro ha la caratteristica di diffondersi velocemente e quindi di essere presente quasi come “fondo” nelle zone prossime all’emissione.

Grafico 9 - Monossido di Carbonio, valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.8 Biossido d’Azoto (NO₂)

I dati relativi all’NO₂ misurati nelle postazioni dei Laboratori Mobili di Via Farini e Via Rizzoli sono riportati nella Tabella 8: anche per questo inquinante i valori di Via Farini sono superiori pur in misura non rilevante.

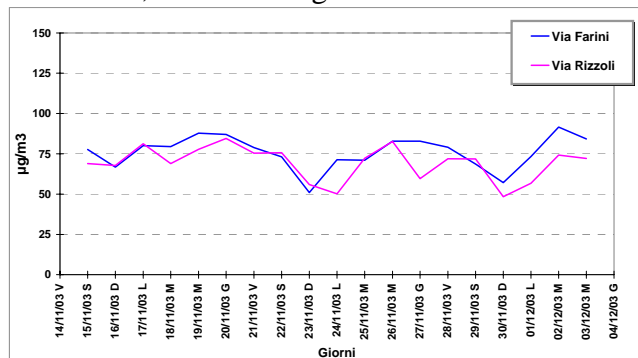
Tabella 8 - Biossido di Azoto, tempo di mediazione 1ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Valore 98° percentile μg/m ³	N. di valori > 200 μg/m ³
			μg/m ³	μg/m ³	μg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/03	474	24	157	76	127	0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	464	13	132	69	117	0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Non vi è stato alcun superamento dei valori calcolati come 98° percentile delle concentrazioni medie di un'ora rispetto al valore limite di 200 µg/m³.

Grafico 10 - Biossido di Azoto, valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 10 evidenzia come i valori medi giornalieri di NO₂ rilevati durante l'intera campagna nelle due postazioni nelle quali è stato monitorato mostrano un andamento simile tra loro con concentrazioni inferiori nelle varie domeniche rispetto ai giorni feriali.

2.9 Biossido di Zolfo (SO₂)

I valori rilevati di SO₂ dal Laboratorio Mobile ubicato in Via Rizzoli sono riportati in Tabella 9.

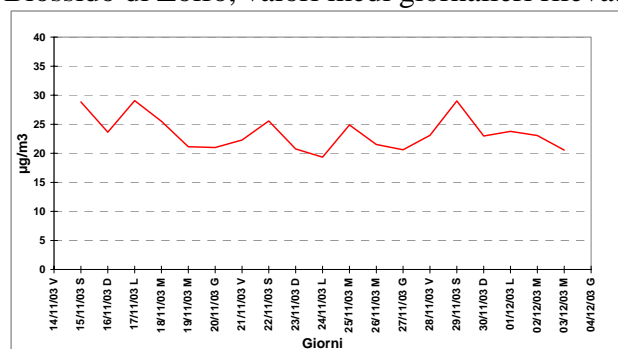
Tabella 9 - Biossido di zolfo, tempo di mediazione 1 ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 350 µg/m ³	% di valori > 350 µg/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	479	15	47	24	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 11 riporta i valori medi giornalieri di SO₂: si nota come nell'arco del periodo di indagine ci sono state fluttuazioni limitate.

Grafico 11 - Biossido di Zolfo, valori medi giornalieri rilevati in via Rizzoli



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.10 Dati dei flussi di traffico

IL Laboratorio Mobile dell'Arpa di Bologna posizionato in Via Farini ha potuto valutare il flusso di traffico, in termini di numero totale di veicoli transitati, attraverso il sistema ad elaborazione di immagine di cui è dotato.

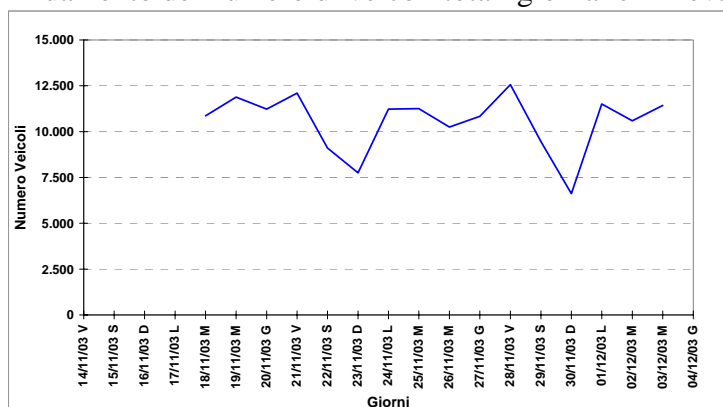
In Tabella 10 sono riportati i valori minimo, massimo e medio delle medie orarie e giornaliere.

Tabella 10 - Valori orari e giornalieri dei flussi di traffico

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Veicoli totali orari			Veicoli totali giornalieri		
		Minimo	Massimo	Medio	Minimo	Massimo	Medio
Via Farini	17/11-04/12/03	21	910	438	6613	12564	10539

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 12 - Andamento del numero di veicoli totali giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 12 riporta il numero di veicoli transitati in ogni giornata di indagine.

Pur con particolari condizioni (frequenti code, transito su corsie affiancate e soste selvagge) che ingannano, seppur limitatamente, il conteggio dei veicoli, si può riconoscere che nei giorni feriali si superano regolarmente gli 11.000 veicoli in transito con valori leggermente superiori al venerdì mentre nei fine settimana il flusso di traffico diminuisce sensibilmente con circa 9.000 transiti al sabato e 7.000 alla domenica.

Dall'analisi dei dati emerge inoltre una dipendenza tra i flussi di traffico e le concentrazioni rilevate di benzene ed IPA; tale correlazione non risulta così evidente per il materiale particolato.

3 Studio della turbolenza atmosferica

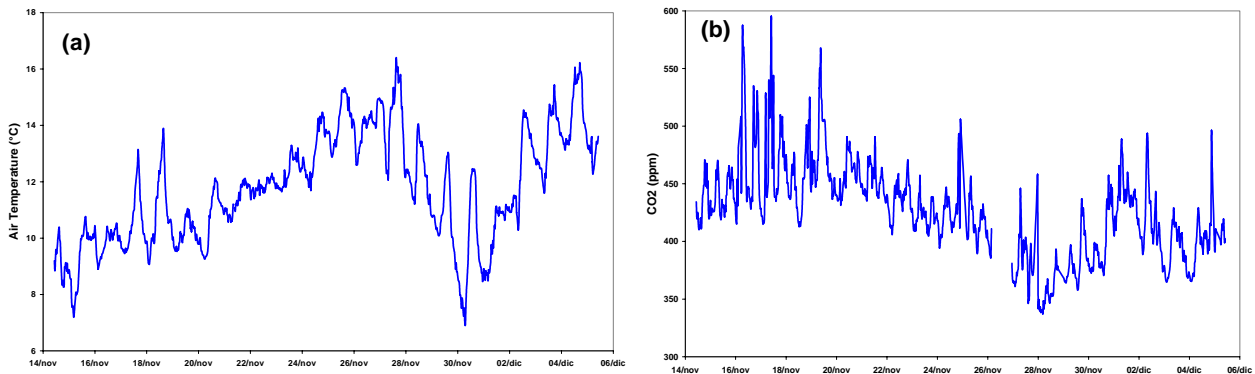
3.1 Risultati

Attraverso le immagini dei satelliti sia MODIS che AVHRR sono state investigate le condizioni meteorologiche durante la campagna di misura. In particolare, sono state monitorate le condizioni di copertura del cielo al fine di correlare i valori di concentrazione di CO₂ alle condizioni del cielo e ad eventi precipitativi.

Durante la campagna di misure le condizioni sono state quasi sempre di cielo coperto, a parte alcuni giorni di cielo sereno ed è stato registrato un evento di pioggia il 28 novembre.

In Figura 2 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'aria (Figura 2-a) e della concentrazione di CO₂ (Figura 2-b).

Figura 2- Andamento della temperatura dell'aria (a) e della concentrazione di anidride carbonica (b)

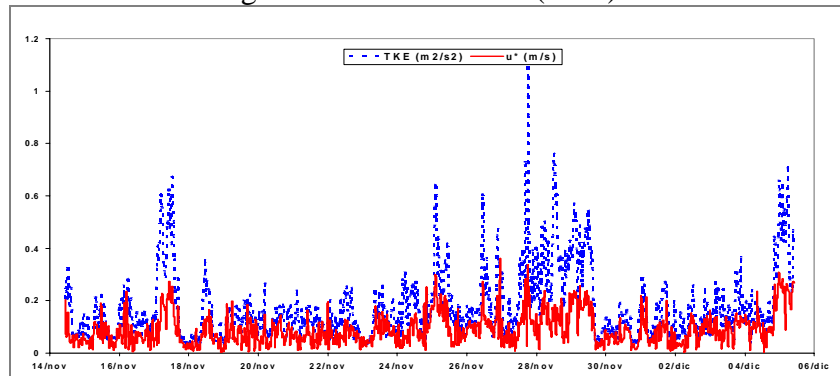


Fonte dati: CNR Bologna

Si può notare come queste due variabili scalari siano fortemente anti-correlate e come il periodo di misura può essere diviso in “pre” e “post” evento precipitativo. Durante il primo periodo si ha un trend di crescita della temperatura dell'aria e una decrescita della concentrazione di CO₂. Dopo l'evento precipitativo (il 26 Novembre) si è registrata una diminuzione della temperatura dell'aria e un conseguente incremento della CO₂ (350 ppm = zone non inquinate).

Mettendo in relazione il trend della concentrazione di CO₂ con la turbolenza atmosferica (Figura 3) si è visto che il 28 e 29 Novembre si è avuta una forte turbolenza atmosferica che ha causato l'abbassamento della CO₂ portandola ai valori minimi registrati. Questo incremento nella turbolenza atmosferica, dovuto probabilmente a condizioni di cielo sereno che hanno favorito sia l'incremento della temperatura dell'aria, ma anche l'intensità dei moti convettivi, ha creato un consistente rimescolamento delle masse d'aria favorendo quindi lo scambio d'aria tra superficie e atmosfera portando alla superficie l'aria “più pulita” dell'atmosfera sovrastante.

Figura 3 - Andamento dell'energia cinetica turbolenta (TKE) e della velocità di frizione (u*)



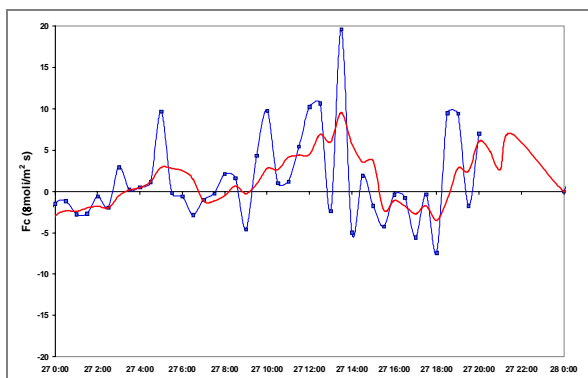
Fonte dati: CNR Bologna

L'andamento del flusso di anidride carbonica è riportato in Figura 4: se è positivo si ha immissione di CO₂ dalla superficie verso l'atmosfera (sorgente di CO₂) e viceversa i valori negativi indicano un assorbimento da parte della superficie di CO₂ (pozzo di CO₂).

L'alternanza dei valori indica il carattere turbolento del fenomeno, che è quindi fortemente dipendente delle condizioni locali che si sviluppano nel canopy urbano.

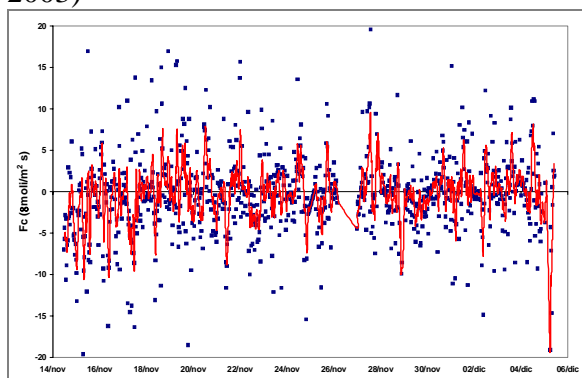
Se si considera un giorno feriale (giovedì 27 Novembre) possiamo notare come l'immissione di CO₂ in atmosfera sia fortemente legato alle ore del giorno in cui il traffico risulta più intenso (Figura 5).

Figura 4 - Andamento del flusso di CO₂ durante tutto il periodo di misura



Fonte dati: CNR Bologna

Figura 5 - Andamento del flusso di CO₂ durante un giorno feriale (Giovedì 27 Novembre 2003)



Fonte dati: CNR Bologna

Si hanno valori negativi del flusso durante le prime ore del mattino e nel pomeriggio dalle 15 alle 18; durante le ore di maggior traffico i valori diventano positivi e si alzano notevolmente, soprattutto nell'orario intorno alle 12 dove l'attività solare massima favorisce la formazione dei moti convettivi incrementando il rimescolamento nello strato superficiale.

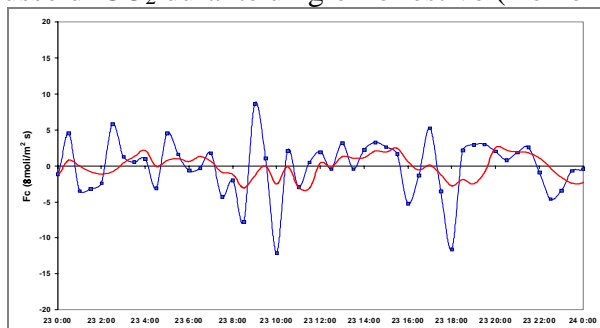
Se consideriamo un giorno festivo (domenica 23 Novembre, Figura 6) possiamo notare i valori minori del flusso di CO₂ che, durante la giornata, si mantiene sostanzialmente intorno allo zero, a indicare una fortissima dipendenza dalle condizioni di traffico cittadino.

Il vento si distribuisce in direzione Nord-Sud a causa dell'incanalamento delle masse d'aria lungo la direzione della strada dovuto principalmente alla presenza dei palazzi. L'intensità del vento è relativamente bassa eccetto per l'evento già citato di incremento della turbolenza atmosferica a seguito dell'evento precipitativi.

L'intensità e la direzione del vettore vento sono riportati in Figura 7.

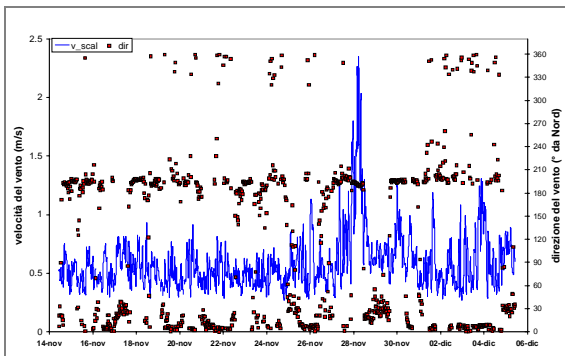
Infine i flussi di calore latente e sensibile sono riportati in Figura 8. Il flusso di calore latente è durante tutto il periodo di misura circa nullo, a causa della mancanza di superficie che traspira e che quindi distribuisca vapore in atmosfera. D'altro canto il flusso di calore sensibile è sempre positivo a differenza di quello che accade in un sito rurale dove si ha una forte dipendenza dall'evoluzione della radiazione giornaliera. Questo è dovuto alla così detta "isola di calore" della città che fa sì che l'area urbana abbia una temperatura maggiore della periferia circostante dovuta alla presenza massiccia di aree asfaltate e cementate.

Figura 6 - Andamento del flusso di CO₂ durante un giorno festivo (Domenica 23 Novembre 2003)



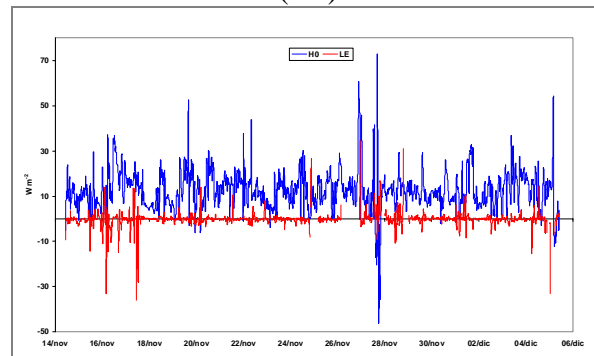
Fonte dati: CNR Bologna

Figura 7 - Andamento della velocità e della direzione del vettore vento



Fonte dati: CNR Bologna

Figura 8 - Andamento del flusso calore sensibile (H0) e del flusso di calore latente (LE)



Fonte dati: CNR Bologna

4 Valutazione della dispersione di inquinanti

4.1 Modelli utilizzati

L'applicazione modellistica si è svolta in due fasi:

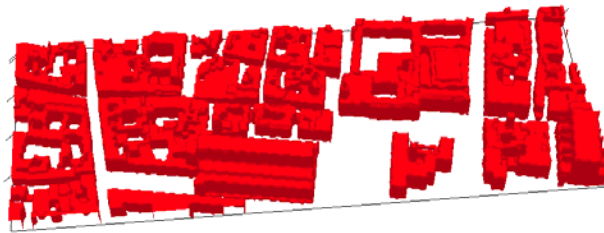
- ricostruzione delle emissioni veicolari, tramite il software di Arianet TREFIC (*TR*afic *E*mission *I*mproved *C*alculation), in uso presso il Comune di Bologna, che implementa la metodologia ufficiale europea CORINAIR/COPERT III con alcune integrazioni ed aggiornamenti, in particolare relative all'emissione di PM10, calcolate con l'utilizzo dei fattori di emissione IIASA, che tengono conto anche delle emissioni "non esauste" (usura di freni e pneumatici, abrasione dell'asfalto);
- simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti a microscala tenendo in considerazione l'effetto degli edifici; a partire dall'orografia tridimensionale del tessuto urbano di Bologna (disponibile presso il settore tecnico del Comune), è stato utilizzato il modello di Arianet MSS (Micro-Swift-Spray) che è costituito da una componente meteorologica in grado di ricostruire in modalità diagnostica un campo tridimensionale di flusso medio non divergente intorno ad ostacoli a partire da un campo iniziale interpolato da misure, accoppiato ad un codice Lagrangiano a particelle, opportunamente modificato per tenere conto della presenza degli ostacoli, per riprodurre la diffusione degli inquinanti emessi dal traffico veicolare.

4.2 Dati in ingresso e caratteristiche della simulazione

La simulazione di dispersione ha riguardato un periodo di 24 ore, ossia la giornata di venerdì 21 novembre. La data è stata scelta perché in quel giorno la concentrazione media giornaliera di PM10 in via Farini, ossia la postazione di misura "più inquinata", raggiunge il valore massimo nei 21 giorni della campagna di monitoraggio, pari a $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il dominio della simulazione è un parallelepipedo dalle dimensioni orizzontali di $220 \times 600 \text{ m}^2$ e verticale di 1000 m ; la figura visualizza la struttura tridimensionale degli edifici compresi nel dominio, lungo una prospettiva est-ovest.

Figura 9 – Rappresentazione tridimensionale del dominio di simulazione



Fonte dati: Comune di Bologna

Gli inquinanti riprodotti nella simulazione sono NO_x, PM10 e benzene, ossia le specie che più frequentemente raggiungono concentrazioni vicine o superiori ai limiti normativi giornalieri e annuali.

4.3 Calcolo delle emissioni

Le emissioni del traffico stradale nella zona di studio sono da attribuire essenzialmente ai due sistemi viari costituiti entrambi da tre strade: via Indipendenza – via Ugo Bassi – Via Rizzoli a nord, via D’Azeglio (parte aperta al traffico) – via Farini – via Carbonesi a sud. Tali strade sono arterie centrali della città, essenziali per lo svolgimento del traffico nel centro storico, in particolare la cosiddetta “T” (così nominata per comodità nel prosieguo della relazione) a nord, che include un tratto urbano della via Emilia. Pertanto per queste strade sono disponibili dati sperimentali o modellistici di flussi di traffico. Per ognuna di esse il modello richiede l’indicazione della lunghezza, quindi del flusso veicolare e della velocità media di percorrenza, specificati per motocicli, autovetture, veicoli commerciali leggeri e pesanti.

I dati suddetti di flusso complessivo sono riportati nella tabella 11.

Tabella 11 – Flussi veicolari complessivi utilizzati in TREFIC

Strada	Flusso (veicoli/giorno)	Fonte del dato
Indipendenza	16349	misure sperimentali 2001
Ugo Bassi	29302	misure sperimentali 2004
Rizzoli	25658	misure sperimentali 2001
Farini	18768	modello di traffico
D’Azeglio	3754	stima empirica
Carbonesi	18768	modello di traffico

Fonte dati: Comune di Bologna, Arpa Emilia-Romagna

Le velocità medie sugli archi stradali sono state ipotizzate in base all’esperienza maturata in precedenti simulazioni analoghe. Per migliorare la rappresentazione, sono state differenziate le velocità nei tratti lontani dai 2 incroci (più alte) da quelle nei tratti afferenti agli incroci.

I valori sono riportati in Tabella 12.

Tabella 12 – Velocità medie di percorrenza utilizzate in TREFIC

Velocità (km/h)	2 ruote	auto	commerciali leggeri	commerciali pesanti
Archi adiacenti all’incrocio	35	30	30	20
Archi non adiacenti all’incrocio	40	35	35	20

Fonte dati: Comune di Bologna

I dati relativi alla composizione qualitativa del parco veicolare circolante, in termini di categorie COPERT, provengono dalle statistiche ACI sui veicoli iscritti al Pubblico Registro Automobilistico nel Comune di Bologna al 31/12/2002 e sono stati rielaborati dall'Unità Ambiente del Comune di Bologna, integrandoli con conteggi specifici sulla flotta dei mezzi pubblici.

La zona in esame ha un impianto urbanistico medievale e presenta diverse limitazioni al traffico, caratteristiche che implicano la necessità di una ricostruzione particolareggiata dello split modale dei veicoli, possibile attraverso i dati dei conteggi di traffico sopra citati, che mostrano una ripartizione riportata in tabella 13. E' possibile notare la rilevanza del contributo dei mezzi a due ruote e degli autobus, in particolare nelle tre strade della "T".

In termini di emissione, ciò comporta una consistente contributo di benzene, da parte soprattutto di ciclomotori e motocicli a 2 tempi, e di polveri, dalla combustione del gasolio da parte degli autobus e dall'effetto di risospensione, quest'ultimo difficilmente quantificabile e quindi non considerato nel calcolo.

Tabella 13 - Composizione percentuale del parco circolante per le 4 macrocategorie COPERT

frazione (%)	2 ruote	auto	commerciali leggeri	commerciali pesanti
Indipendenza	40	40	7	13
Ugo Bassi	40	44	7	9
Rizzoli	49	34	6	11
Farini	33	55	7	5
D'Azeglio	33	55	7	5
Carbonesi	33	55	7	5

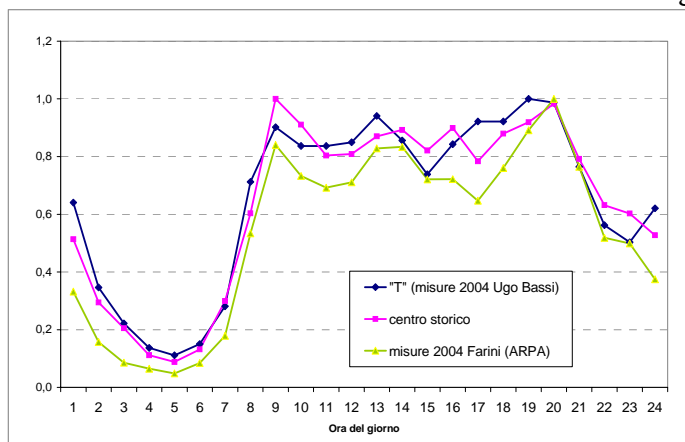
Fonte dati: ACI, Comune di Bologna

L'andamento orario dei flussi di traffico nell'arco della giornata è stato riprodotto utilizzando i dati sperimentali del 2004 forniti dall'Unità Ambiente del Comune di Bologna.

La figura riporta tali dati (curve blu e viola) a confronto con le misure effettuate da Arpa in via Farini (curva gialla). Le curve sono molto simili, a parte qualche differenza quantitativa.

Le strade della "T" sono sorgenti fra loro confrontabili e sensibilmente più impattanti di via Farini e via Carbonesi, interessate da un traffico totale simile a quello di via Indipendenza ma con una presenza minore di ciclomotori e autobus. Le emissioni di via D'Azeglio sono molto minori rispetto alle altre strade considerate.

Grafico 13 – Curve di modulazione oraria del traffico durante la giornata



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, Comune di Bologna

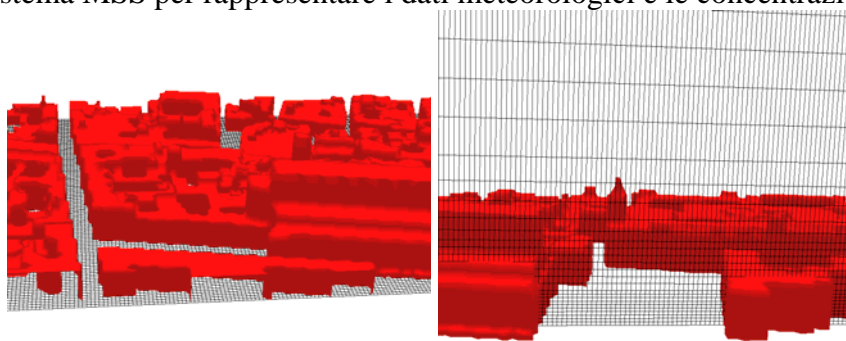
4.4 Meteorologia

La situazione meteorologica sinottica del 21 novembre 2003 vede l'Italia coperta dalle nubi, che tuttavia non hanno portato precipitazioni a Bologna. La stazione meteorologica di Bologna - Borgo Panigale ha misurato in quel giorno alti livelli di umidità giornaliera (90%) e una temperatura di 9°C, in linea con le medie climatologiche del periodo. Si è trattato quindi di una situazione tipica del bacino padano nella stagione autunno-invernale, con vento debole e limitato irraggiamento solare, condizioni che favoriscono l'accumulo di inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera.

La ricostruzione tridimensionale dei campi di vento e turbolenza, effettuata dal modulo SWIFT, si è basata sui dati locali di direzione e velocità del vento misurati dall'anemometro sonico del CNR a circa 5 metri di altezza e sui profili verticali di vento calcolati dal codice meteorologico diagnostico CALMET, in uso presso ARPA Emilia-Romagna.

All'interno del dominio, la griglia di calcolo delle concentrazioni ha una risoluzione fissa di 2 m nelle due direzioni orizzontali, mentre in verticale il grigliato è più fitto (1.5 m) vicino al suolo, per diradare con l'aumentare della quota. Nel complesso la risoluzione della griglia di calcolo al suolo è molto elevata, al fine di potere seguire l'evoluzione della concentrazione all'interno del canyon di via D'Azeglio, che nei punti più stretti è largo circa 5 metri.

Figura 10 - Visualizzazione del grigliato orizzontale (sinistra) e verticale (destra) utilizzato dal sistema MSS per rappresentare i dati meteorologici e le concentrazioni



Fonte dati: Comune di Bologna; elaborazione: ARIANET S.r.l.

Il codice MicroSpray utilizza lo stesso grigliato di celle per rappresentare i valori di concentrazione di inquinante. Le simulazioni meteorologiche realizzate con il modello MicroSwift forniscono campi 3D a cadenza oraria. Il modello MicroSpray interpola i dati meteorologici sulla posizione spazio-temporale di ogni particella. MicroSpray produce campi di concentrazione per le specie simulate a cadenza oraria, mediando i valori istantanei ottenuti campionando le posizioni delle particelle ad intervalli temporali regolari.

La ricostruzione dei campi tridimensionali di vento e turbolenza nel dominio di simulazione dà buoni risultati per quanto riguarda la velocità del vento, dato che SWIFT utilizza il dato anemometrico come condizione al contorno. Invece i parametri della turbolenza locale, ossia le varianze delle componenti orizzontale e verticale della velocità del vento (rispettivamente σ_v e σ_w), risultano sovrastimati dal modello, se messi a confronto con i rilievi anemometrici a causa del posizionamento dello strumento di misura, chiuso su 2 dei 6 lati di provenienza del vento dalla parete del palazzo e dal pavimento del balcone su cui è posto.

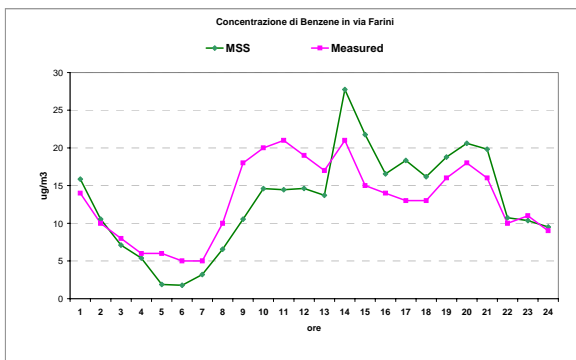
4.5 Risultati

I risultati della simulazione di dispersione sono diversi a seconda del tipo di inquinante e del punto di valutazione della differenza fra concentrazione misurata e simulata.

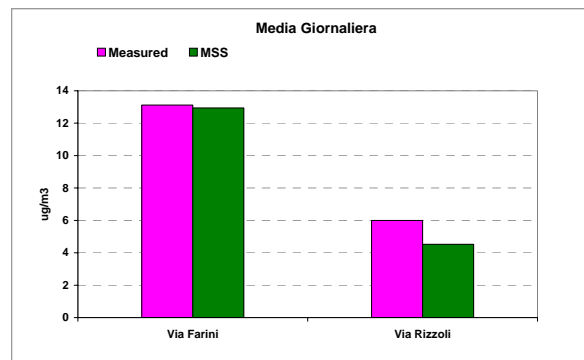
I Grafici 14 e 15 presentano il confronto fra misure e simulazione per il benzene nei punti di campionamento a bordo strada trafficata, cioè via Farini e via Rizzoli. SPRAY riproduce con efficacia l'andamento orario in via Farini dove il rimescolamento dell'atmosfera è ostacolato dalla conformazione degli edifici (canyon urbano); in questo punto è ancora migliore la corrispondenza con il valore di concentrazione media giornaliera. In via Rizzoli, dove il volume di rimescolamento è maggiore, la corrispondenza della media giornaliera è comunque soddisfacente.

Questo fenomeno è rappresentato efficacemente dal modulo di dispersione a microscala, che si rivela adatto a seguire situazioni complesse come la diffusione degli inquinanti in ambiente edificato, caratterizzato da zone di ricircolo e di accumulo degli inquinanti scarsamente influenzate dal vento prevalente.

Grafici 14 e 15 – Benzene in via Rizzoli e via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

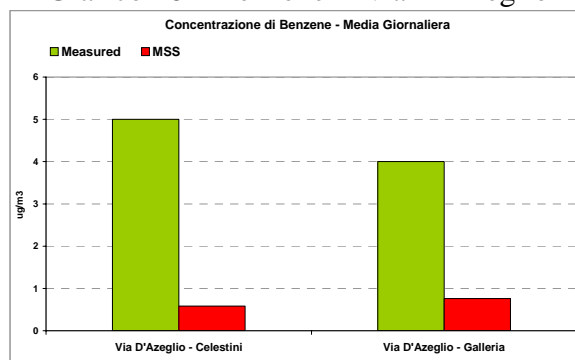


Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Spostandosi verso i 2 punti di campionamento nella zona pedonale di via D'Azeglio, il modello non riesce a riprodurre le concentrazioni reali (Grafico 16). Ciò è probabilmente dovuto alla mancanza di alcune sorgenti emissive nella rappresentazione modellistica, quali il parcheggio dei motocicli all'ingresso di via D'Azeglio pedonale e il parcheggio di piazza dei Celestini.

Inoltre è verosimilmente sottostimata l'intensità del vento misurato, cosicché nella simulazione il benzene emesso dal traffico in via Farini non riesce ad arrivare nelle postazioni di rilevamento di via D'Azeglio.

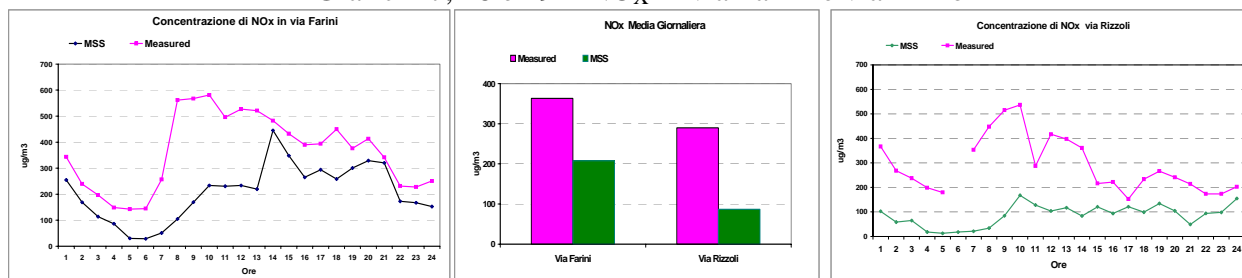
Grafico 16 – Benzene in via D'Azeglio



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

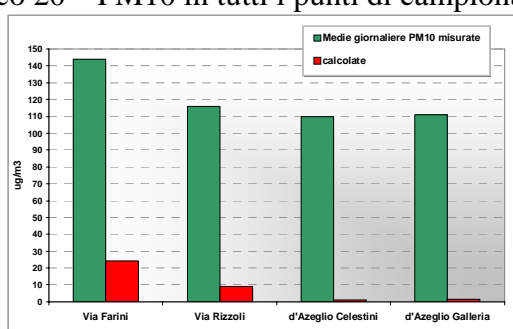
Passando ad esaminare gli NO_x nelle postazioni a bordo strada (le sole per cui sono disponibili le misure), l'andamento orario simulato resta aderente qualitativamente a quello reale, ma l'entità dei valori di concentrazione è sottostimata (Grafici 17, 18 e 19). Ciò è dovuto alla mancanza nella simulazione delle emissioni da sorgenti diverse dal traffico veicolare, in particolare la combustione negli impianti di riscaldamento. Inoltre, nella simulazione non si tiene conto dell'ingresso di aria già inquinata da NO_x emessi all'esterno della zona.

Grafici 17, 18 e 19 – NO_x in via Farini e via Rizzoli



Infine, osservando i valori di PM₁₀, si riscontra una notevole sottostima rispetto ai valori reali, più evidente nei punti nella zona pedonale. Il grafico 20 riporta i valori della concentrazione media giornaliera.

Grafico 20 – PM₁₀ in tutti i punti di campionamento



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Il fenomeno è di interpretazione complessa. Come per gli ossidi di azoto, non sono state considerate le sorgenti emissive diverse dal traffico e soprattutto la concentrazione di fondo (sorgenti naturali e antropogeniche) che nell'area della Pianura Padana raggiunge valori medi annuali di 20-25 µg/m³ per un effetto di scarsa circolazione negli strati bassi dell'atmosfera che impedisce la dispersione degli inquinanti emessi.

Nella simulazione è stato trascurato un altro importante effetto, ossia la produzione di particolato secondario in atmosfera, generato dalle trasformazioni chimiche a carico di specie gassose come ossidi di azoto, solfati e ammonio.

L'effetto delle trasformazioni chimiche è descrivibile modellisticamente, ma allo stato attuale della disponibilità di potenza di calcolo non è possibile accoppiare un modello lagrangiano "inerte" come MicroSPRAY con un meccanismo chimico.

Tuttavia, riguardo al PM₁₀, vale la pena sottolineare come l'effetto del solo traffico veicolare nella strada dove viene effettuata la misura porti a una concentrazione media giornaliera pari a 25 µg/m³ in via Farini e 10 µg/m³ in via Rizzoli; tali valori spiegano le differenze riscontrate tra ciascuna delle concentrazioni misurate nelle 4 stazioni considerate (Grafico 20) e il valor medio delle stesse, il quale può essere ritenuto il valore di fondo urbano dell'area di studio per il giorno venerdì 21 novembre 2003.

5 CONCLUSIONI

L'indagine ha dimostrato come l'area pedonale analizzata sia sottoposta a valori di particolato non molto diversi rispetto da quelli rilevati nelle strade della ZTL immediatamente limitrofe. Probabilmente la superficie dell'area pedonale relativamente piccola, nonché la scarsa possibilità di diffusione degli inquinanti dovuti alla geometria delle strade, genera una quasi-stazionarietà delle concentrazioni. I dati, relativamente più alti in Via Farini rispetto a via Rizzoli, sono imputabili alla

minore larghezza della strada e alla presenza dei portici che impediscono ulteriormente il ricambio delle masse d'aria; tale andamento risulta evidente anche per il benzene, il quale mostra valori sensibilmente alti in via Farini, ma non particolari differenze tra via Rizzoli e le postazioni dell'area pedonale.

Nello stesso tempo le concentrazioni degli IPA, pur se la loro ricerca avviene negli stessi campioni utilizzati per la determinazione gravimetrica del particolato, dimostrano al contrario un notevole decremento allontanandosi dai punti in cui è concentrato il passaggio degli automezzi.

E' quindi possibile ritenere che gli IPA presenti nel particolato vicino alla zona della sua emissione, possano trasformarsi chimicamente durante la migrazione di tale materiale solido nelle zone adiacenti: in tale zone sembra quindi essere presente un particolato che contiene percentualmente meno IPA rispetto a quelle vicine al punto di formazione degli stessi IPA. Si conferma comunque che tali inquinanti afferiscono alla parte più fine del particolato.

Per quanto riguarda gli aspetti modellistici, la suite TREFIC + Micro-Swift-Spray ricostruisce efficacemente la circolazione a microscala in una zona dall'orografia complessa come quella del centro di Bologna e riproduce correttamente le concentrazioni di benzene misurato in punti adiacenti a strade trafficate, quali le postazioni di misura di via Farini e via Rizzoli. Meno efficace è la rappresentazione della diffusione del benzene nella zona pedonale di via D'Azeglio, probabilmente a causa della mancanza di alcune sorgenti di emissione e dell'anemologia introdotta nelle simulazioni.

Nel confronto con le concentrazioni misurate, gli ossidi di azoto e le polveri risultano sottostimati dal modello. Le cause sono la mancanza nelle simulazioni del contributo emissivo dei riscaldamenti e della concentrazione di fondo urbano (molto inquinato e omogeneo su vasta area). Per il PM10 in aggiunta è importante il contributo delle reazioni chimiche in atmosfera, che formano particolato secondario a partire da altri inquinanti: tale effetto non è stato trattato nella modellizzazione.