

**Variazione dell'altezza dello strato di
rimiscolamento in relazione ai processi di
dispersione di particolato atmosferico**

C. Busillo, F. Calastrini, F. Guarnieri

16 Luglio 2014

Indice

Introduzione	4
1 Valutazione delle stime di Hmix attraverso il confronto con le misure di radon, PM10 e PM2.5	6
1.1 Lo strato di rimescolamento	6
1.2 Esalazione di radon dal terreno, formazione di aerosol radioattivo, accumulo in aria	6
1.3 Campionatori e strumenti di misura	7
1.4 Area di studio e periodo	8
1.5 Il sistema di modelli meteorologici	10
1.6 Confronto stime-misure nel periodo settembre 2005-giugno 2006	12
1.6.1 Misure di concentrazione di radon: esclusione dei giorni di pioggia	12
1.6.2 Hmix e radon: andamento del "giorno medio" e serie temporali	12
1.6.3 Correlazioni tra Hmix, radon e parametri meteo	15
1.6.4 Radon e HMIX	16
1.6.5 Radon, HMIX, vento	17
1.6.6 Radon, Hmix, Radiazione globale	18
1.6.7 Radon, Hmix, Temperatura	18
1.6.8 Radon, Hmix, umidità	19
1.6.9 Radon, Hmix, pressione	20
1.6.10 Radon, Hmix, PM10, PM2.5	20
1.7 Confronto stime Hmix e misure di radon e PM2.5 nel 2010	23
1.8 Sintesi dei risultati ottenuti nel confronto stime-misure	26
2. Gli indicatori meteorologici per la previsione dei livelli critici di concentrazione di PM10	28
2.1 Le stazioni di monitoraggio PM10	28
2.2 Misure di PM10 nell'anno 2010	29
2.3 Stime di Hmix, vento e temperatura nel bacino FI-PO-PT	33
2.3.1 Temperatura	33
2.3.2 Velocità del vento	34

2.3.3 Hmix	36
2.4 Determinazione degli indicatori	40
2.4.1 Individuazione dei periodi critici	41
2.4.2 Gli indicatori meteorologici stimati da modello	42
Conclusioni	47
Ringraziamenti	49
Bibliografia	50

Introduzione

Per lo studio dell'andamento della concentrazione di inquinanti atmosferici è fondamentale conoscere le condizioni meteorologiche favorevoli all'accumulo in aria delle sostanze emesse: in particolare un parametro critico è l'altezza dello strato di rimescolamento, di seguito indicato come Hmix (mixing layer height). Infatti, a parità di emissione, quote diverse di Hmix possono determinare concentrazioni più o meno elevate degli inquinanti atmosferici nello strato più vicino al suolo.

I principali metodi di stima di Hmix si basano su misure profilometriche di temperatura, di velocità del vento, di umidità o di concentrazione di aerosol, ottenute da radiosondaggi o da sistemi di remote sensing (lidar, sodar, radar, etc.). Questi metodi, pur avendo il vantaggio di utilizzare misure di parametri fisici, presentano comunque limiti di applicabilità, sia legati alle specifiche dei sensori, sia ai costi di installazione/gestione delle stazioni di misura (4, 13, 15).

Esistono poi altri metodi empirici per la stima indiretta di Hmix, basati sulla misura della concentrazione di gas traccianti come il radon (5, 6). Numerosi studi provano infatti il legame tra Hmix e concentrazione di radon; infatti le esalazioni di questo gas possono variare molto da un territorio all'altro, ma in un'area ristretta le variazioni di concentrazione dipendono solo dai parametri meteorologici ed in particolare da Hmix (1, 7, 14, 16).

In alternativa, Hmix può essere stimato da modelli numerici; esistono molti tipologie di modelli, da semplici algoritmi che utilizzano misure profilometriche a catene di modelli meteorologici ad alta risoluzione. L'evidente vantaggio di questo approccio consiste nel fatto che tramite l'uso di modelli meteorologici è possibile effettuare una previsione delle condizioni predisponenti all'accumulo delle sostanze inquinanti, ma anche dello stesso Hmix. In ogni caso, l'uso di modelli matematici prevede un confronto stime-misure per la validazione.

Tuttavia, il confronto fra i risultati ottenuti con diversi approcci è tutt'altro che banale, dovendo mettere in conto le diverse specifiche e i differenti ambiti di applicabilità dei vari metodi.

In questo studio le potenzialità dell'approccio modellistico vengono valutate attraverso il confronto con misure di radon, di PM10 e di PM2.5. Il lavoro si sviluppa in due parti.

Nella prima parte le stime di Hmix ottenute da una catena di modelli meteorologici ad alta risoluzione sono confrontate con i valori di concentrazione di radon e le misure

di concentrazione di PM10 e PM2.5, effettuati nell'ambito di campagne di misura dall'Università di Firenze. Inoltre viene valutata l'influenza dei principali parametri meteo misurati a terra (VV, T, P, Rg, Ur, pioggia).

Nella seconda parte del lavoro la catena di modelli ad alta risoluzione viene applicata al bacino Firenze Prato Pistoia per l'intero anno 2010 e, attraverso il confronto con le misure di PM10 effettuate dalle stazioni della rete di monitoraggio gestita da ARPAT, vengono individuati degli indicatori per la valutazione delle condizioni critiche per la dispersione degli inquinanti. Lo scopo è quello di valutare la possibilità di effettuare previsioni delle condizioni meteorologiche favorevoli all'accumulo degli inquinanti sulla base delle stime di Hmix e degli indicatori individuati.

1 Valutazione delle stime di Hmix attraverso il confronto con le misure di radon, PM10 e PM2.5

1.1 Lo strato di rimescolamento

Lo strato di rimescolamento (mixing layer) è definito come quella porzione di atmosfera più vicina al suolo in cui le sostanze emesse vengono disperse per effetto della turbolenza in un tempo di scala di circa un'ora (15). La turbolenza è generata dal vento (turbolenza meccanica) e dai flussi di calore (turbolenza termica). La definizione di mixing layer e di PBL (Planetary Boundary Layer) coincide nel caso in cui per PBL si intenda lo strato turbolento più vicino al suolo e non si tenga conto, nella definizione, dei processi di scambio radiativo notturno. Ad ogni modo anche per il mixing layer, e di conseguenza per Hmix, esistono differenti definizioni spesso legate ai diversi metodi di misura e di stima utilizzati (4, 13).

In questo lavoro Hmix è stata stimata dal modello diagnostico CALMET, utilizzando l'algoritmo di Gryning-Batchvarova (12, 13).

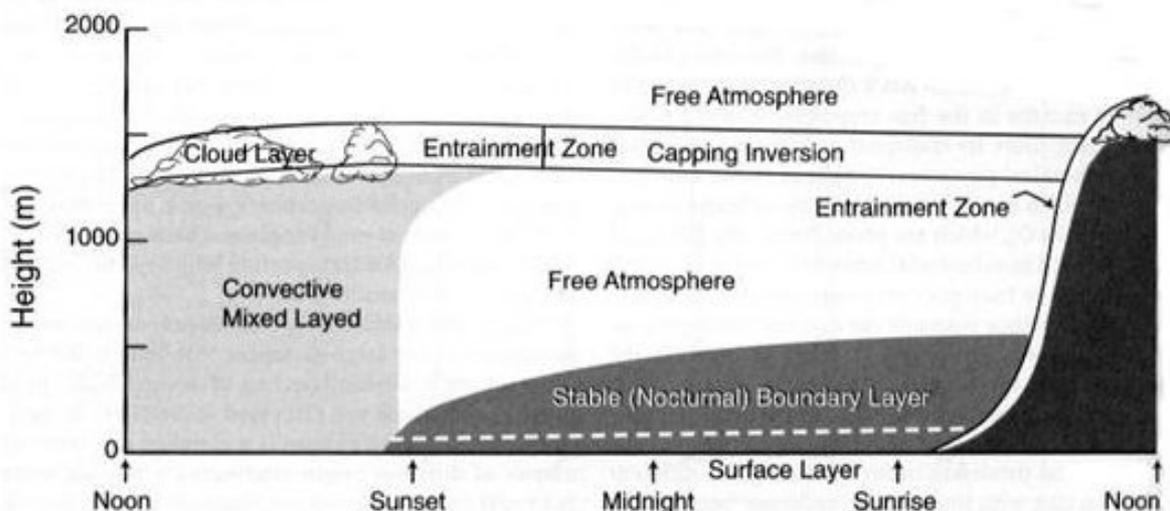


Fig.1 – Tipico andamento giornaliero del Planetary Boundary Layer.

1.2 Esalazione di radon dal terreno, formazione di aerosol radioattivo, accumulo in aria

I radionuclidi radon (^{222}Rn) e thoron (^{220}Rn), rispettivamente della catena dell'uranio e del torio, sono gas nobili prodotti dal decadimento del ^{226}Ra e del ^{232}Th .

Il gas esala dal terreno e si diffonde in atmosfera. L'esalazione cambia al variare della permeabilità del terreno: può diminuire sensibilmente se il terreno è umido, ghiacciato, in presenza di copertura nevosa, o per l'aumento della pressione

atmosferica, mentre altri parametri meteo come temperatura e vento possono aumentare il rateo di esalazione (7, 9, 14, 16).

Gli isotopi radioattivi derivanti dal decadimento del radon e del thoron - polonio, bismuto, piombo - sono metalli pesanti che reagiscono molto velocemente, in meno di 1 secondo, con vapor d'acqua o gas in traccia, formando cluster (diametro 0.5-4 nm). Successivamente, in tempi dell'ordine di decine di secondi, i cluster si attaccano prevalentemente a particelle submicrometriche preesistenti, con diametro compreso tra 0.1 e 1 μm . Tuttavia, alcuni studi riferiscono che una quantità non del tutto trascurabile di aerosol radioattivo può essere presente anche nella frazione superiore a 1 μm (10, 11).

La formazione dell'aerosol radioattivo è favorita dalla presenza di vapor d'acqua, e quindi di umidità dell'aria, di gas in traccia e di aerosol di dimensioni submicrometriche, come ad esempio i prodotti di combustione (11).

In atmosfera il radon, il thoron e l'aerosol radioattivo subiscono processi di diffusione in funzione delle variabili meteorologiche, come il vento (per avvezione), la temperatura, la radiazione (per convezione). La rimozione dell'aerosol avviene, oltre che per effetto del decadimento radioattivo, tramite deposizione secca o per effetto del dilavamento dovuto alla pioggia.

1.3 Campionatori e strumenti di misura

Per la misura di radon e progenie è stato utilizzato il campionatore FAI-PBL mixing (<http://www.fai-instruments.com/index.php/it/main-page-ita/prodotti/pbl-monitor>), uno strumento che campiona su base oraria il particolato atmosferico, sul quale si fissano gli isotopi radioattivi. Una volta terminato il campionamento, il supporto viene automaticamente spostato e passa alla fase di misura: un contatore Geiger-Muller misura l'attività dei prodotti di decadimento di ^{222}Rn e ^{220}Rn , in particolare dei β -emettitori. Lo strumento misura il rateo di conteggi (conteggi al minuto) che, in condizioni di equilibrio, è proporzionale alla concentrazione di radon in aria. Le caratteristiche costruttive dello strumento consentono di utilizzare differenti teste di prelievo: in questo caso è stato effettuato il campionamento di PM10.



Fig.2 –Il campionatore FAI-PBL mixing.

Le misure di PM10 e PM2.5 sono state effettuate, su base giornaliera, con un campionatore FAI-HYDRA (<http://www.fai-instruments.com/index.php/it/main-page-ita/prodotti/hydra>), strumento caratterizzato da due teste di prelievo, per permettere di campionare contemporaneamente le due frazioni.



Fig.3 –Il campionatore FAI-HYDRA per PM10 e PM2.5.

1.4 Area di studio e periodo

L'area di studio è il bacino Firenze-Prato-Pistoia.

Le misure di radon sono state effettuate presso Villa S. Lorenzo, a Sesto Fiorentino (FI), le misure di PM10 e PM2.5, oltre che in questo sito, anche in un sito di misura presso Monte Morello, ad una distanza di circa 3.5 Km in linea d'area, ma ad una quota altimetrica decisamente superiore (700m s.l.m. rispetto a circa 40m s.l.m. del bacino).

Le variabili meteorologiche sono state misurate dalla stazione del LAMMA, installata sul tetto della sede del CNR di Sesto Fiorentino (15 m s.l.s.). In particolare sono stati rilevati i seguenti parametri meteorologici: velocità del vento VV (m/s), temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), pressione P (hP), radiazione globale R_g (w/m² su base oraria, MJ/m² cumulata su base giornaliera), umidità relativa U_r (%), pioggia (mm).



Fig.4 – Mappa dei siti di misura.

Le misure utilizzate in questo studio sono state programmate nell'ambito di due campagne distinte, nel 2005-2006 e nel 2010. Le variabili meteorologiche sono state misurate per gli interi periodi.

Dal 15 settembre 2005 al 18 giugno 2006 sono state effettuate misure orarie di radon, mentre PM₁₀ e PM_{2.5} sono stati campionati su base giornaliera presso Villa S. Lorenzo e nel sito di Monte Morello (solo PM₁₀).

Durante la campagna di misura del 2010 sono state effettuate misure di radon su base oraria presso Villa S. Lorenzo e di PM_{2.5} su base giornaliera nei siti di Villa S. Lorenzo e di Monte Morello (i campionamenti, contemporanei nei due siti, sono stati effettuati a giorni alterni).

1.5 Il sistema di modelli meteorologici

Le misure sono state affiancate dalle stime di Hmix ottenute dalla catena di modelli meteorologici ad alta risoluzione WRF-CALMET, implementata presso il LAMMA.

Per il periodo settembre 2005 - giugno 2006 sono state utilizzate le stime modellistiche ottenute dall'archivio implementato presso il Lamma nell'ambito del progetto WINDGIS (17, 18), che copre gli anni compresi tra il 2004 e il 2007.

L'archivio è costituito dalle stime ottenute dalla catena di modelli ad alta risoluzione, che prevede l'utilizzo del modello globale GFS (Global Forecast System) a 50 Km, del modello a mesoscala WRF-NMM (8) a 12 Km, del modello CALMET (versione 4.1) (12), a una risoluzione finale di 2 Km.

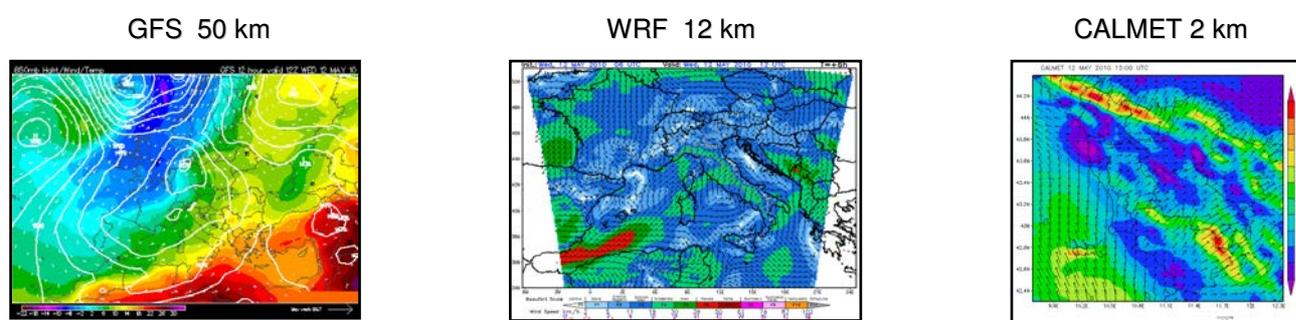


Fig.5 – Catena di modelli meteorologici.

La simulazione relativa all'anno 2010 si basa invece su una nuova catena di modelli, in conseguenza all'aggiornamento dell'archivio meteorologico e all'introduzione della versione più aggiornata del modello CALMET, la 5.8.4.

Il nuovo archivio deriva dal modello WRF-ARW inizializzato con i dati delle analisi ECMWF a 25 Km, ed è costituito da due data-set omogenei, uno ottenuto dal modello configurato ad una risoluzione di 9 Km sull'intero territorio nazionale, l'altro, ottenuto dalla griglia innestata ad alta risoluzione (3 Km), su un dominio che comprende l'Italia centro-settentrionale. Per questo lavoro il modello CALMET, inizializzato dalle stime del modello WRF-ARW a 3 Km di risoluzione, è stato configurato su un dominio che comprende il bacino Firenze-Prato-Pistoia, ad una risoluzione di 500 m.

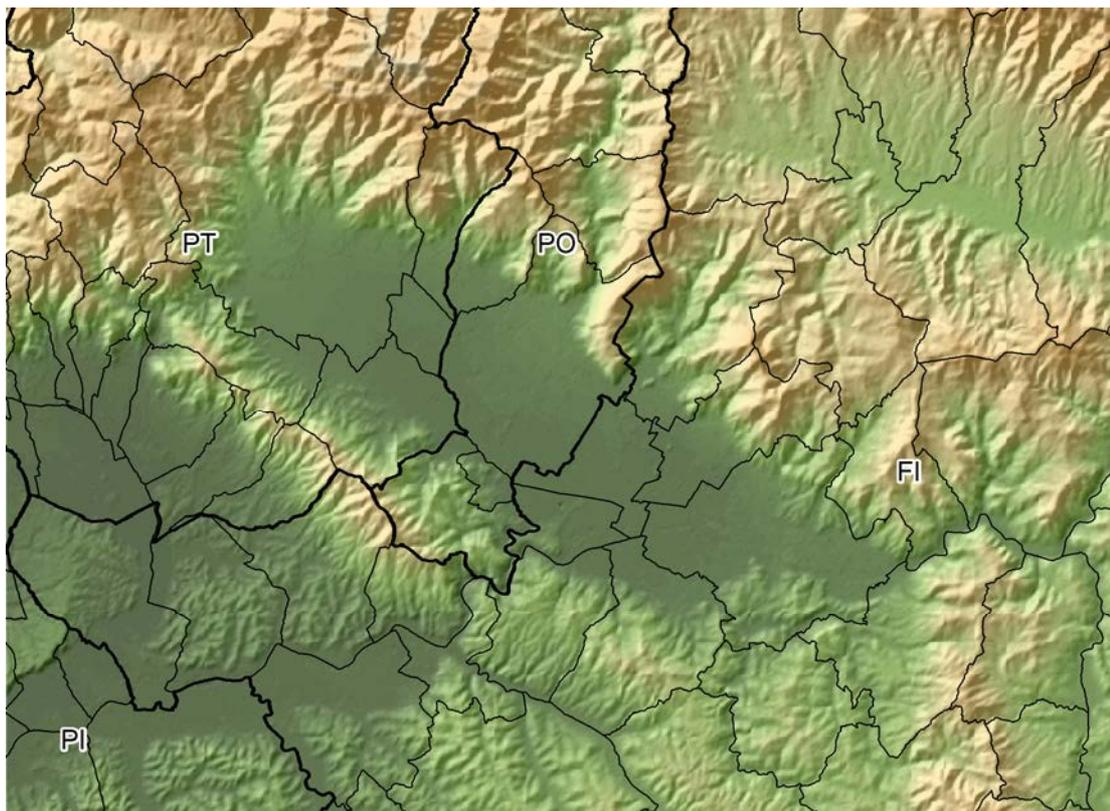


Fig.6– Dominio di calcolo per il modello CALMET.

La nuova catena di modelli, ad una risoluzione maggiore rispetto alla precedente, fornisce stime più attendibili, come è stato verificato confrontando i risultati ottenuti dalle due catene di modelli per il mese di febbraio 2006.

A titolo di esempio vengono riportati i grafici relativi alla temperatura media giornaliera (stimata e misurata nella stazione del LAMMA) e del vento medio giornaliero (stimato e misurato nella stazione sinottica dell’Aeronautica Militare di Peretola), nell’anno 2010. Si può notare che il modello riproduce in modo fedele sia la temperatura che il vento.

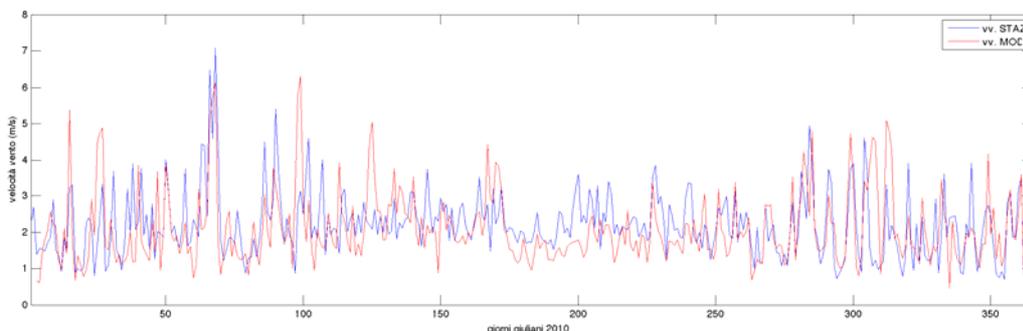


Fig.7– Confronto tra il vento medio giornaliero misurato preso la stazione dell’Aeronautica Militare di Peretola (blu) e stimato dal modello CALMET (rosso).

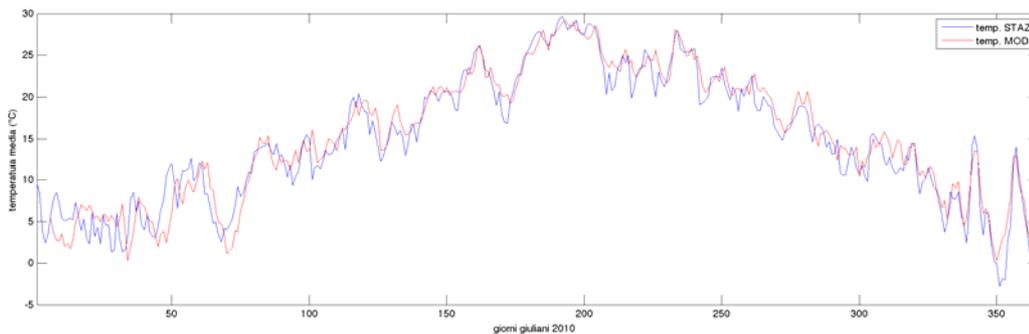


Fig.8- Confronto tra la temperatura media giornaliera misurata presso la stazione del Lamma (blu) e stimata dal modello CALMET (rosso).

1.6 Confronto stime-misure nel periodo settembre 2005-giugno 2006

1.6.1 Misure di concentrazione di radon: esclusione dei giorni di pioggia

Sulla base delle considerazioni fatte riguardo al principio di funzionamento dello strumento, sono stati eliminati i dati rilevati in presenza di eventi di pioggia importanti, in quanto le misure possono risultare falsate. Infatti la pioggia, superiore però a una certa soglia, ha un effetto di dilavamento sull'aerosol e quindi anche sulla parte di questo a cui si sono legati gli isotopi radioattivi di radon e progenie, per cui si ha una riduzione dei conteggi. La pioggia, cambiando la permeabilità del terreno, può ridurre il rateo di emissione del radon. Inoltre, l'effetto dilavamento fa sì che non si raggiunga l'equilibrio radon-progenie.

L'umidità alta, di contro, può favorire la formazione di aerosol radioattivo: si può verificare una condizione in cui una debole pioggia, che non ha forte effetto di rimozione, può determinare un aumento dei conteggi. La soglia per discriminare tra pioggia efficace o no è, in una certa misura, arbitraria: sulla base di precedenti studi (2, 3), è stata scelta pari a 10 mm giornalieri.

In totale, eliminando dal campione le misure relative ai giorni di pioggia maggiore di 10 mm, sono stati scartati 25 giorni, pari al 7% dei dati validi del campione (si passa da 89.6% di dati validi del campione originale a 82.6% di dati validi).

1.6.2 Hmix e radon: andamento del "giorno medio" e serie temporali

Il confronto tra gli andamenti orari della concentrazione di radon e di Hmix evidenzia una marcata anticorrelazione: al crescere di Hmix la concentrazione di radon diminuisce, mentre in condizioni corrispondenti a Hmix basso la concentrazione di radon aumenta.

L'andamento giornaliero anticorrelato di radon e Hmix risulta evidente osservando il grafico relativo al "giorno medio", elaborato sia sul totale dei dati, sia su base stagionale: il giorno medio autunnale è calcolato considerando i mesi ottobre, novembre e dicembre, il giorno medio invernale con gennaio, febbraio e marzo, il giorno medio primaverile con aprile, maggio e giugno. Purtroppo non sono state effettuate misure di radon nel periodo estivo.

Osservando il grafico del giorno medio annuo si nota che mentre Hmix cresce dal sorgere del sole, raggiunge il massimo nelle ore centrali del giorno e decresce al tramonto, con valori minimi nella notte e nelle prime ore del mattino, la concentrazione di radon ha un andamento opposto, con valori minimi durante il giorno e valori che crescono fino a raggiungere un massimo nelle prime ore del mattino, per poi decrescere dalle ore 7 in poi.

Il giorno tipo stagionale mostra, per quanto riguarda Hmix, valori decisamente alti nelle ore centrali del periodo primaverile, oltre 1800 m, con una forte variazione giornaliera; nelle ore notturne si registrano valori molto bassi, anche inferiori a 200 m. Nei periodi autunnale e invernale invece l'escursione giorno notte è meno marcata, con valori che variano tra 400 e 1000 m in autunno e 500 e 1100 m in inverno. Le condizioni di stabilità atmosferica, più frequenti in primavera-estate rispetto al semestre freddo, sono caratterizzate da forte irraggiamento solare nelle ore centrali del giorno: il forte irraggiamento favorisce i moti convettivi e quindi Hmix in queste condizioni è alta. Invece dopo il tramonto, in assenza di moti convettivi, le condizioni stabili corrispondono ad assenza di ventilazione e quindi a Hmix bassa. Nel semestre freddo la maggior frequenza di condizioni di tempo perturbato porta a un generale aumento di Hmix per effetto del vento, anche se il minore irraggiamento non determina valori alti durante le ore centrali del giorno.

Per quanto riguarda le concentrazioni di radon, i valori minimi si raggiungono nelle ore diurne della primavera, mentre nella notte e nelle prime ore del mattino i valori aumentano sensibilmente, con una forte escursione. In inverno i valori massimi sono inferiori rispetto a quelli raggiunti in primavera, mentre i minimi sono superiori; il divario giorno-notte è poco marcato, in accordo con l'andamento di Hmix. I valori più alti, sia in termini di massimi che minimi giornalieri, si verificano in autunno.

Per completezza, in fig.10 sono riportate le serie temporali dei valori medi giornalieri di radon (rosso) e dei valori medi giornalieri di Hmix, per il periodo in esame. Si può notare anche da questo grafico che gli andamenti sono anticorrelati, all'aumento di Hmix corrisponde una diminuzione dei valori di radon e viceversa. In

particolare, nel periodo autunnale, a valori di Hmix mediamente bassi corrispondono alti valori di radon. Nel periodo invernale, invece, si ha un'alternanza di situazioni con picchi marcati di radon e bassi valori di Hmix e di condizioni di alta diffusività caratterizzate da bassi valori di radon. Nel periodo primaverile Hmix è mediamente più alta e la concentrazione di radon minore.

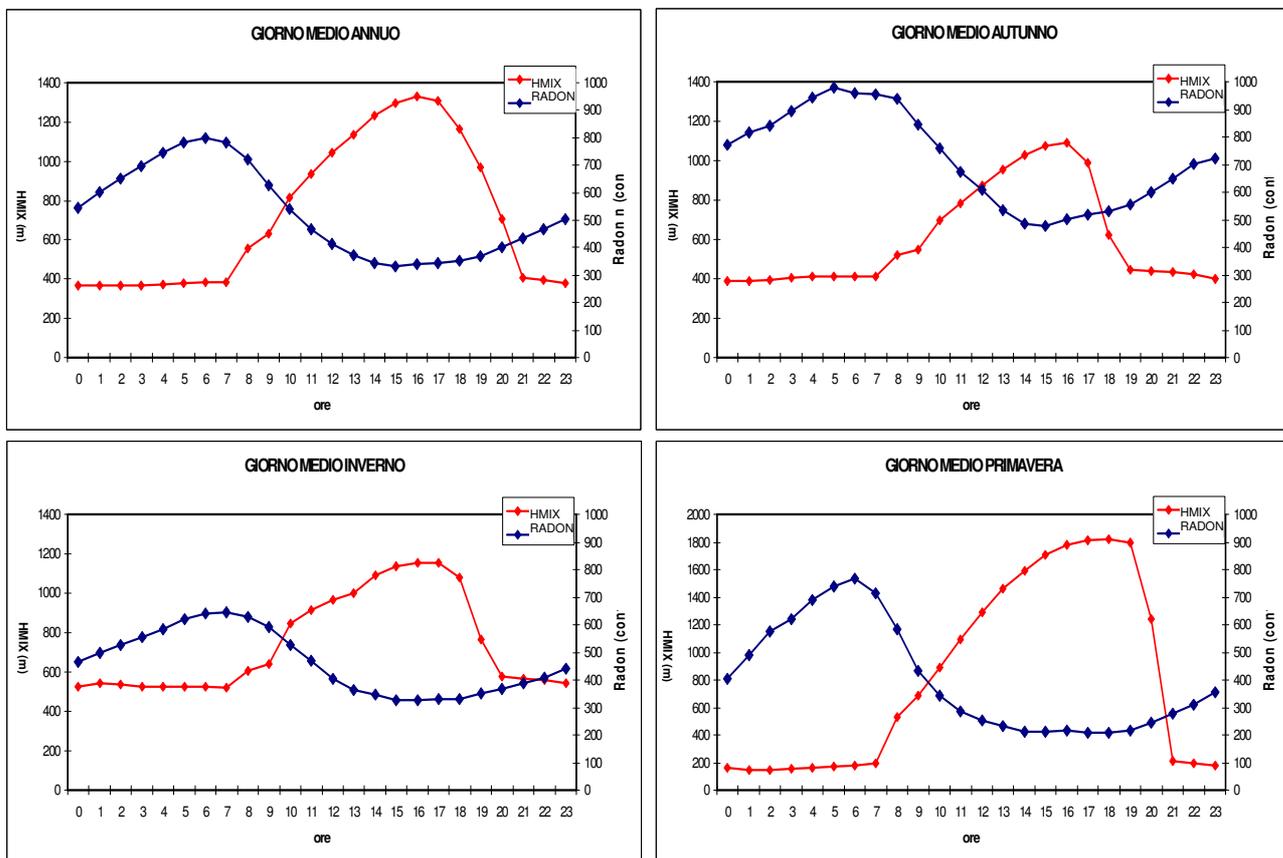


Fig.9 – Andamento del giorno medio annuale e stagionale per Hmix (rosso) e radon (blu).

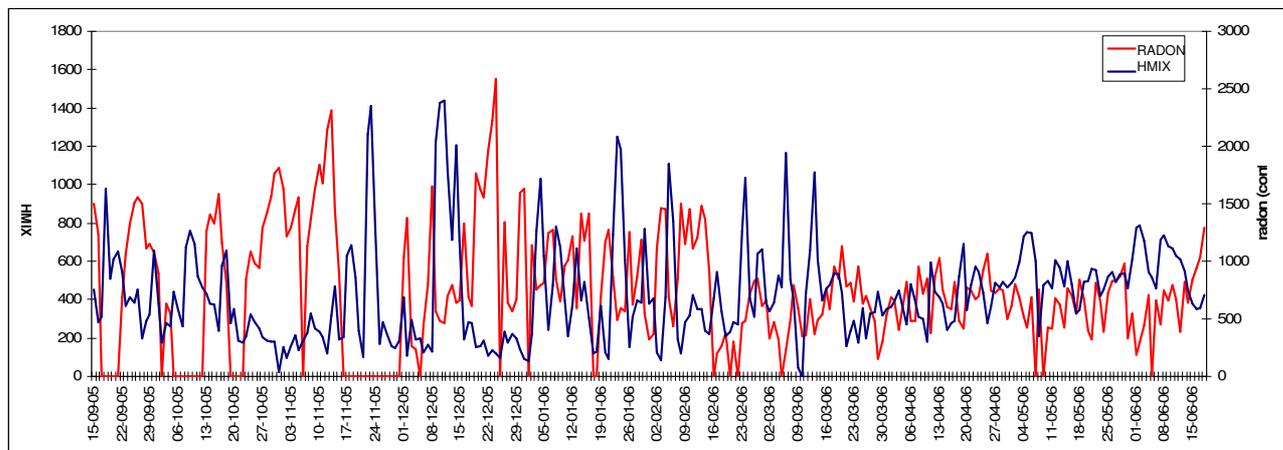


Fig.10 – Serie temporale dei dati medi giornalieri di Hmix (rosso) e di radon (blu).

1.6.3 Correlazioni tra Hmix, radon e parametri meteo

I valori di concentrazione di radon e di Hmix sono stati confrontati con i principali parametri meteorologici misurati nella stazione meteo di Sesto Fiorentino durante il periodo in esame. I coefficienti di correlazione tra le grandezze sono stati elaborati sul totale dei dati e su base stagionale per le serie di dati orari e per le serie di dati giornalieri; utilizzare dati giornalieri aggiunge informazione in quanto vengono mediati gli andamenti con ciclo di 24 ore, di conseguenza le correlazioni evidenziano corrispondenze non determinate da questa periodicità.

Per quanto riguarda il radon, le correlazioni con la stima di Hmix e con i dati meteo sono state effettuate sia con il dato misurato corrispondente, sia considerando un ritardo di 1 e 2 ore (in pratica al valore Hmix relativo al tempo t è stata associata la misura di radon al tempo $t+1$ o $t+2$). Di seguito verranno commentati i risultati parametro per parametro.

A titolo di esempio, nei seguenti grafici sono riportate le serie temporali dei dati orari, per il periodo 1-18 giugno, di Hmix e di radon, radiazione globale, umidità relativa, velocità del vento (fig.11), da cui si evidenziano bene le correlazioni e le anticorrelazioni tra le variabili considerate.

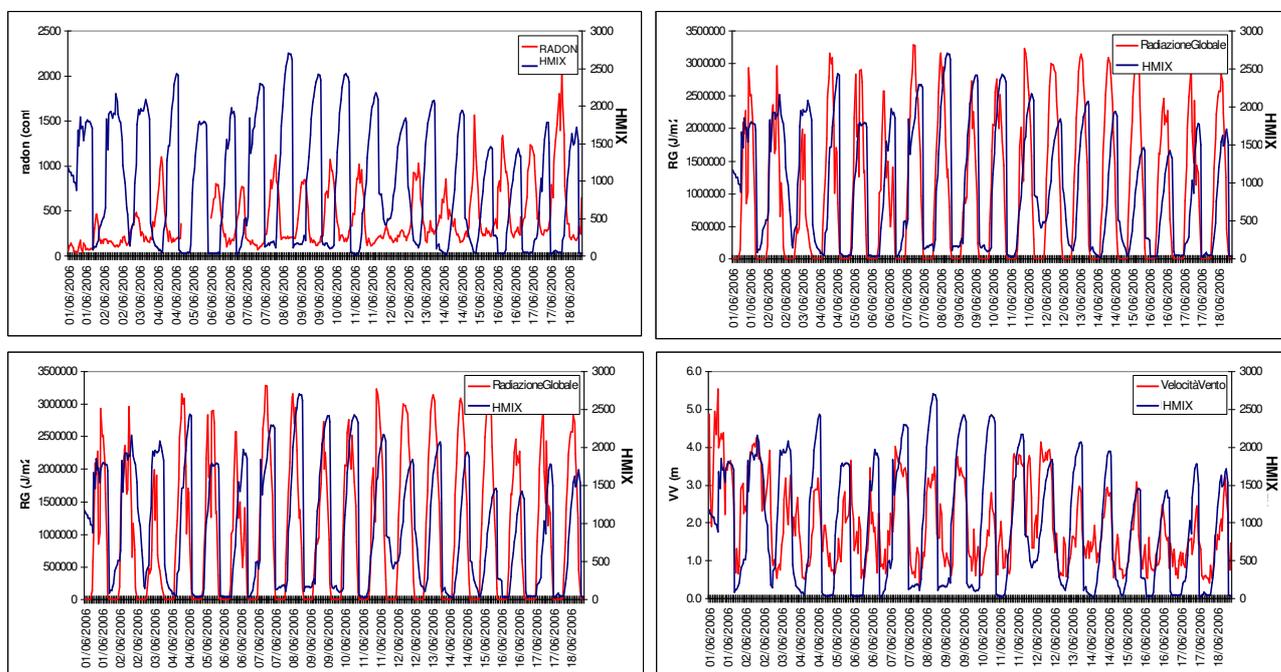


Fig.11 – Serie temporale dei dati orari, per il periodo 1-18 giugno, di Hmix (blu) e di radon, radiazione globale, umidità relativa, velocità del vento (rosso).

Analogamente, in fig. 12 sono riportati i grafici delle serie temporali dei dati orari, sempre per il periodo 1-18 giugno, di radon e di temperatura, radiazione globale, umidità relativa, velocità del vento.

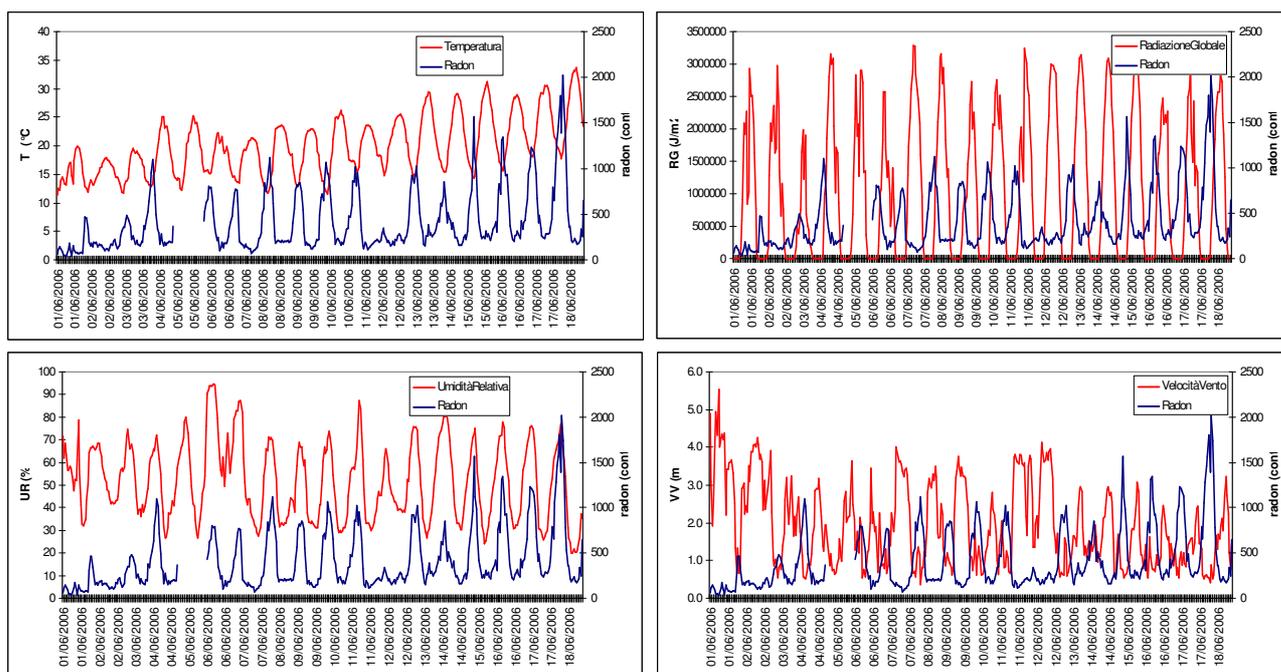


Fig.12 – Serie temporale dei dati orari, per il periodo 1-18 giugno, di radon (blu) e di temperatura, radiazione globale, umidità relativa, velocità del vento (rosso).

1.6.4 Radon e HMIX

Considerando i coefficienti di correlazione tra i valori orari di Hmix e di radon i valori più alti (in valore assoluto) corrispondono ad un ritardo di 1 ora.

A livello stagionale, le correlazioni più alte si hanno in primavera, in cui si raggiunge -0.59 con 1 ora di ritardo, mentre in inverno il valore maggiore (-0.45) si ha con un ritardo di 2 ore; questo potrebbe avvalorare l'ipotesi che il ritardo sia legato, oltre che alle caratteristiche della misura di radon (§ 1.3), anche alla velocità di diffusione dell'aerosol, maggiore nei periodi caldi, quando sono più importanti i moti convettivi. In ogni caso la correlazione tra radon e Hmix è maggiore in primavera, in cui la componente convettiva prevale sulla parte turbolenta-meccanica e il ciclo giornaliero è più evidente.

Tab.1 – Coefficienti di correlazione tra HMIX e radon su base oraria.

HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	-0.50	-0.53	-0.51
AUT.	-0.48	-0.53	-0.52
INV.	-0.41	-0.44	-0.45
PRI.	-0.57	-0.59	-0.55

Prendendo in esame le correlazioni basate su dati medi giornalieri, si nota che i valori sono sempre minori, con l'esclusione del periodo invernale; in primavera la correlazione raggiunge il valore minimo (-0.35 giornaliero rispetto a -0.59 orario con 1 ora di ritardo). La media giornaliera sembra evidenziare l'effetto dei soli fenomeni meccanici, mentre la componente convettiva, avendo un andamento giornaliero, viene mediata.

Tab.2 – Coefficienti di correlazione tra HMIX e radon su base giornaliera.

HMIX	Radon
TOT.	-0.48
AUT.	-0.47
INV.	-0.49
PRI.	-0.35

1.6.5 Radon, HMIX, vento

Si osserva una notevole anticorrelazione tra i valori di velocità del vento e i valori di concentrazione di radon (-0.57), maggiore con la serie di misure contemporanee rispetto a quelle "ritardate" di 1 o 2 ore. Hmix e VV sono correlate (0.58). A livello stagionale per VV-Rn la variazione è limitata (-0.54 in autunno, -0.57 negli altri casi), per VV-Hmix la variazione è maggiore (0.56 in inverno, 0.63 in autunno).

Tab.3 – Coefficienti di correlazione tra vento, HMIX e radon su base oraria.

VELOCITA' VENTO	HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	0.58	-0.57	-0.56	-0.51
AUT.	0.63	-0.57	-0.59	-0.57
INV.	0.56	-0.54	-0.51	-0.46
PRI.	0.58	-0.57	-0.55	-0.45

Tab.4 – Coefficienti di correlazione tra vento, HMIX e radon su base giornaliera.

VELOCITA' VENTO	HMIX	Radon
TOT.	0.73	-0.67

A livello di correlazione tra valori medi giornalieri si nota un significativo aumento del valore assoluto di correlazione (VV-Rn -0.67; VV-Hmix 0.73); la media giornaliera

di radon e Hmix sembra evidenziare l'effetto dei fenomeni legati alla turbolenza meccanica rispetto a quelli convettivi.

1.6.6 Radon, Hmix, Radiazione globale

Anche questo parametro, come la velocità del vento, è anticorrelato con il radon e correlato con Hmix (0.45): considerando le misure di radon con ritardo, il valore assoluto più alto si ha con un ritardo di 2 ore (-0.44, rispetto a -0.30 senza ritardo), confermando le considerazioni espresse più volte riguardo alla capacità dispersiva dell'atmosfera per effetto della convezione e suoi effetti sull'aerosol.

I coefficienti di correlazione su base stagionale sono maggiori in primavera (Hmix 0.58; Rn(2ore) -0.53) rispetto all'autunno e all'inverno (Hmix 0.31, 0.34; Rn(2ore) -0.34, 0.35).

Le correlazioni sulle serie storiche giornaliere sono molto più basse (Hmix 0.27; Rn -0.28), dato che la radiazione globale ha un andamento giornaliero che viene mediato.

Tab.5 – Coefficienti di correlazione tra radiazione globale, HMIX e radon su base oraria.

RADIAZIONE GLOBALE	HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	0.45	-0.30	-0.38	-0.44
AUT.	0.31	-0.22	-0.30	-0.34
INV.	0.34	-0.22	-0.30	-0.35
PRI.	0.58	-0.33	-0.44	-0.53

Tab.6 – Coefficienti di correlazione tra radiazione globale, HMIX e radon su base giornaliera.

RADIAZIONE GLOBALE	HMIX	Radon
TOT.	0.27	-0.28

1.6.7 Radon, Hmix, Temperatura

La correlazione tra Hmix e temperatura è meno marcata rispetto ai valori relativi alla radiazione globale, ed è significativa solo in primavera (0.63). Per quanto riguarda il radon l'anticorrelazione sul totale è maggiore con un ritardo di 1 ora (-0.37), ma in autunno ed in inverno il valore maggiore si registra con le misure contemporanee. A livello stagionale la correlazione tra T e Hmix è maggiore in primavera, mentre tra T e radon è maggiore in inverno (-0.61).

Su base giornaliera Hmix e temperatura non sono correlati (-0.07), mentre per il radon la correlazione è molto bassa (-0.20).

Tab.7 – Coefficienti di correlazione tra temperatura, HMIX e radon su base oraria.

TEMPERATURA	HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	0.28	-0.36	-0.37	-0.33
AUT.	0.14	-0.28	-0.26	-0.22
INV.	0.15	-0.61	-0.61	-0.55
PRI.	0.63	-0.46	-0.48	-0.39

Tab.8 – Coefficienti di correlazione tra temperatura, HMIX e radon su base giornaliera.

TEMPERATURA	HMIX	Radon
TOT.	0.07	-0.20

1.6.8 Radon, Hmix, umidità

Forte anticorrelazione tra umidità (U_r) relativa e Hmix (-0.64): è evidente che le condizioni di forte umidità si instaurano in corrispondenza di scarsa ventilazione e scarsa/assente radiazione globale. Il radon (ritardo di 1 ora) è invece correlato (0.59), sia per le condizioni favorevoli all'accumulo, sia per il fatto che il vapor acqueo favorisce la formazione di aerosol radioattivo. A livello stagionale per Hmix- U_r il valore massimo si ha in primavera (-0.71) e il minimo in inverno (-0.57), per Rn- U_r il massimo è in autunno (0.59) e il minimo in inverno (0.46).

I dati giornalieri evidenziano una maggiore anticorrelazione tra Hmix e umidità relativa (-0.63) rispetto ai dati orari, mentre tra radon e umidità relativa la correlazione è minore (0.49).

Tab.9 – Coefficienti di correlazione tra umidità, HMIX e radon su base oraria.

UMIDITA'	HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	-0.64	0.58	0.59	0.52
AUT.	-0.68	0.56	0.59	0.51
INV.	-0.57	0.46	0.46	0.38
PRI.	-0.71	0.55	0.55	0.44

Tab.10 – Coefficienti di correlazione tra umidità, HMIX e radon su base giornaliera.

UMIDITA'	HMIX	Radon
TOT.	-0.63	0.49

1.6.9 Radon, Hmix, pressione

La pressione non è correlata a Hmix (0.02), mentre ha una modesta correlazione con il radon (0.35): a livello stagionale la correlazione Rn-P è alta in autunno (0.44), bassa in inverno (0.27), scarsissima in primavera (0.17). I dati giornalieri per il radon mostrano un aumento della correlazione (0.44).

Tab.11 – Coefficienti di correlazione tra pressione, Hmix e radon su base oraria.

PRESSIONE	HMIX	Radon	Radon (lag1h)	Radon (lag2h)
TOT.	0.02	0.35	0.34	0.34
AUT.	0.10	0.44	0.43	0.43
INV.	0.04	0.27	0.25	0.24
PRI.	-0.04	0.17	0.17	0.15

Tab.12 – Coefficienti di correlazione tra pressione, Hmix e radon su base giornaliera.

PRESSIONE	HMIX	Radon
TOT.	0.07	0.44

1.6.10 Radon, Hmix, PM10, PM2.5

Nel periodo 15/09/2005-18/06/2006 sono state effettuate misure di PM10 e PM2.5 presso Villa San Lorenzo (VSL) e di PM10 presso Monte Morello (MM), con una percentuale di dati validi pari a 86% nel sito VSL e 81% nel sito di MM.

Sono stati calcolati i coefficienti di correlazione tra il PM campionato presso Villa S. Lorenzo e le variabili meteo, il radon, Hmix e le misure di PM10 campionato presso Monte Morello.

Le misure di PM10 e PM2.5 (VSL) sono molto correlate (0.96), mentre su base stagionale il valore diminuisce in primavera (0.83); al contrario, la correlazione tra PM10 nei siti VSL e MM (0.41) cresce notevolmente in primavera (0.73), così come tra PM2.5 VSL e PM10 MM (0.34 tot, 0.82 primavera).

Tab.13 – Coefficienti di correlazione tra PM10 nel sito di Villa S. Lorenzo (VSL) e variabili meteo, HMIX, radon, PM2.5 VSL, PM10 MM, su base giornaliera.

PM10 VSL	Velocità del Vento	Radiaz. Globale Cumul.	Temp.	Umidità relativa	Press.	HPBL	Radon	PM2.5 VSL	PM10 MM
TOT.	-0.49	-0.33	-0.39	0.41	0.22	-0.48	0.75	0.96	0.41
AUT.	-0.50	-0.15	-0.38	0.33	0.33	-0.44	0.75	0.97	0.31
INV.	-0.55	-0.30	-0.30	0.41	0.12	-0.48	0.81	0.97	0.49
PRI.	-0.52	0.07	0.22	0.02	0.17	-0.39	0.57	0.83	0.73

Tab.14 – Coefficienti di correlazione tra PM2.5 nel sito di Villa S. Lorenzo (VSL) e variabili meteo, HMIX, radon, PM10 VSL, PM10 MM, su base giornaliera.

PM2.5 VSL	Velocità del Vento	Radiaz. Globale Cumul.	Temp.	Umidità relativa	Press.	HPBL	Radon	PM10 VSL	PM10 MM
TOT.	-0.46	-0.37	-0.46	0.41	0.22	-0.42	0.73	0.96	0.34
AUT.	-0.43	-0.16	-0.43	0.26	0.31	-0.38	0.68	0.97	0.24
INV.	-0.57	-0.37	-0.39	0.43	0.15	-0.43	0.86	0.97	0.43
PRI.	-0.50	0.09	0.13	0.04	0.25	-0.29	0.53	0.83	0.82

Osservando le serie temporali di PM10 presso Villa S.Lorenzo (rosso) e di PM10 presso Monte Morello (blu) si nota che in primavera l'andamento e i valori di concentrazione sono molto simili, mentre in autunno ed in inverno ci sono delle notevoli differenze, soprattutto durante gli episodi critici, che si verificano solo presso VSL, mentre presso MM i valori di concentrazione si mantengono sostanzialmente bassi durante tutto il periodo. Le misure nei due siti, a pochi Km di distanza in linea d'area, ma a quote altimetriche diverse (circa 40 m s.l.m., 700 m s.l.m.), evidenziano che durante gli episodi critici in pianura gli inquinanti atmosferici non si distribuiscono in quota, ma restano intrappolati al di sotto della quota di inversione termica. Nel semestre caldo, invece, quando i moti convettivi diventano importanti e anche il trasporto long-range prevale sulle emissioni locali, si hanno concentrazioni sostanzialmente paragonabili nei due siti.

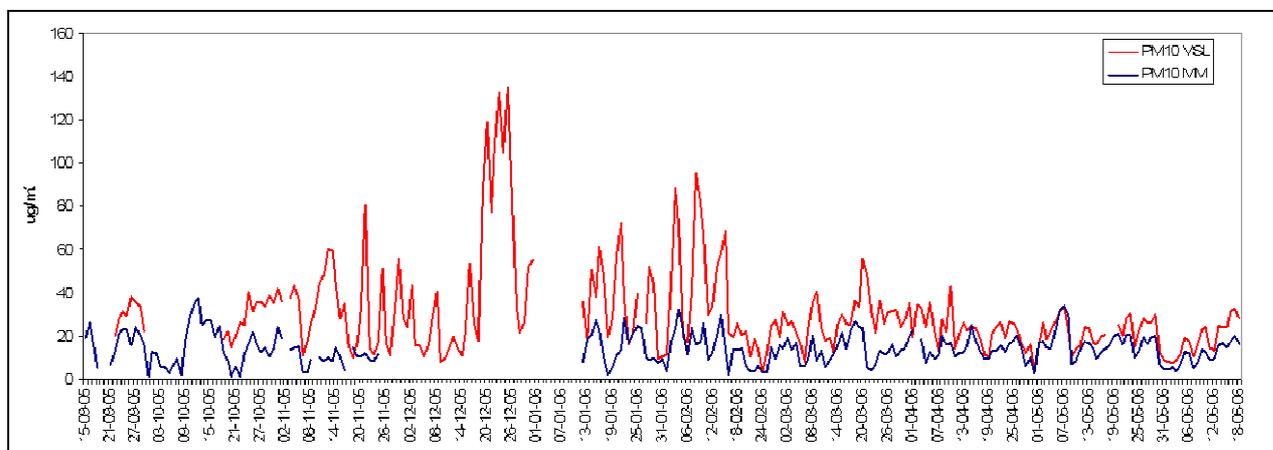


Fig.13 – Serie temporale dei dati medi giornalieri di PM10 presso Villa S.Lorenzo (rosso) e di PM10 presso Monte Morello (blu).

Le misure di radon e di PM10 VSL risultano molto correlate, soprattutto nel semestre freddo, meno in primavera (0.75 tot; 0.53 primavera) e analogamente per il PM2.5. Anche l'anticorrelazione tra Hmix e PM10/PM2.5 VSL è maggiore (in valore assoluto) nel periodo freddo rispetto alla primavera. Nei grafici in fig. 13 e fig. 14 sono riportate rispettivamente le serie temporali di PM10 VSL e radon e di PM10 VSL e Hmix. Dai

grafici si può notare che durante gli episodi critici di PM10 i valori di radon sono alti, mentre il valore medio giornaliero di Hmix è generalmente molto basso.

Per quanto riguarda le correlazioni tra PM e variabili meteo, si possono ripetere le stesse considerazioni fatte per le correlazioni tra variabili meteo e radon: anticorrelazione con vento (-0.49 PM10; -0.67 Rn) e con radiazione globale (-0.33 PM10; -0.28 Rn), correlazione con umidità relativa (0.41 PM10; 0.49 Rn) e con la pressione (0.22 PM10; 0.44 Rn), anche se in misura minore. La temperatura invece risulta più anticorrelata con il PM10 e il PM2.5 rispetto al radon (-0.39 PM10; -0.46 PM2.5; -0.20 Rn). A livello stagionale la temperatura è anticorrelata nel semestre freddo e correlata in primavera: questo si spiega considerando la variabilità stagionale delle emissioni, che in inverno aumentano in corrispondenza di temperature più basse (es. riscaldamento domestico), mentre nel periodo caldo la formazione di aerosol secondario è favorita da alte temperature.

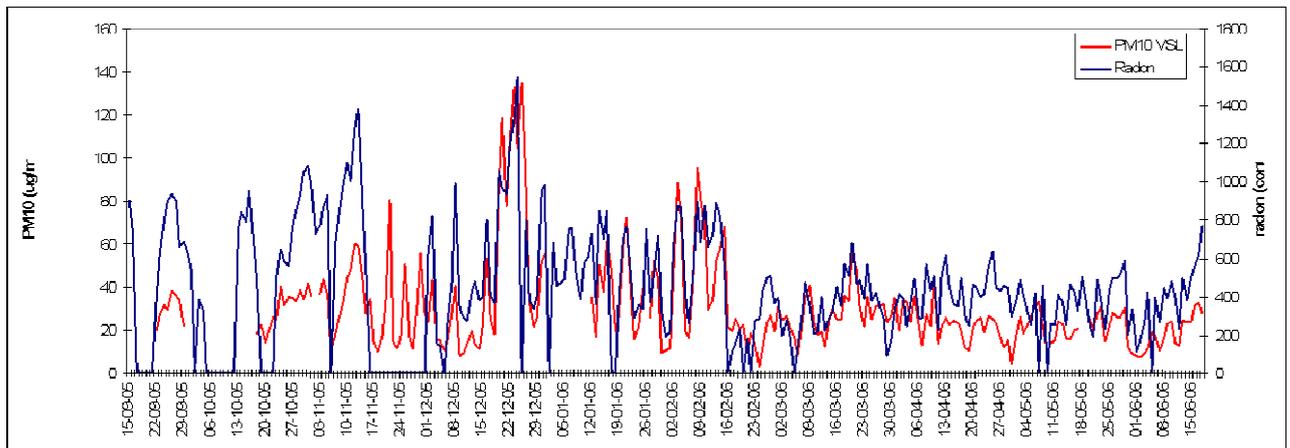


Fig.14 – Serie temporale dei dati medi giornalieri di PM10 (rosso) e di radon (blu).

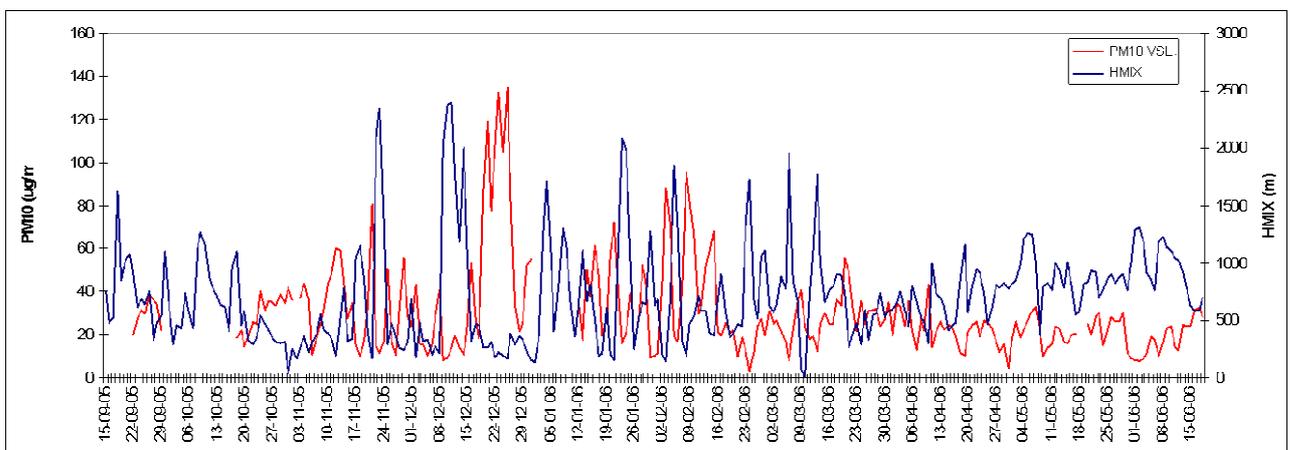


Fig.15 – Serie temporale dei dati medi giornalieri di PM10 (rosso) e di Hmix (blu).

1.7 Confronto stime Hmix e misure di radon e PM2.5 nel 2010

Le stime di Hmix sono state effettuate, tramite la catena di modelli WRF/ARW-CALMETv5.8.4, per l'intero anno 2010.

Le misure di concentrazione di radon non coprono l'intero periodo, ma si limitano a due intervalli disgiunti, dal 28 aprile al 26 agosto e dal 27 novembre al 31 dicembre, con una percentuale di dati validi pari al 38%.

Anche le misure di PM2.5 effettuate con i campionatori FAI nei siti di Villa S. Lorenzo e Monte Morello hanno una copertura parziale, coprendo rispettivamente i periodi che vanno dal 14 giugno al 29 luglio e dal 5 settembre al 30 dicembre (VSL) e dal 21 marzo al 30 dicembre (MM). I campionamenti sono stati effettuati a giorni alterni, quindi la percentuale di dati validi è molto bassa, pari al 19% (VSL) e 37% (MM). Dato che il periodo in cui i dati sono presenti contemporaneamente è molto esiguo, i coefficienti di correlazione tra Hmix, variabili meteo, radon e PM2.5 sono stati elaborati separatamente, non su uno stesso campione di misure contemporanee come per i dati relativi al 2005-2006.

Per quanto riguarda i coefficienti di correlazione tra Hmix e variabili meteo (99% di dati validi), in linea di massima si possono ripetere le considerazioni già espresse per il periodo 2005-2006, sia per le correlazioni su base oraria che su base giornaliera. Si deve però ricordare che il campione di dati 2005-2006 è costituito da misure rilevate in autunno, inverno e primavera: il periodo estivo è invece presente nel campione del 2010, che risulta quindi completo.

Anche in questo caso, a livello orario, la variabile meteo più correlata con Hmix è la radiazione globale, con valori molto alti nel periodo caldo (0.83 in estate); anche il vento è correlato, con valori maggiori nel semestre caldo, presumibilmente in relazione alle brezze di monte e di valle; la temperatura è correlata nel semestre caldo e molto poco nel semestre freddo; l'umidità è sempre anticorrelata; la pressione non è mai correlata. Su base giornaliera i valori di correlazione diminuiscono, perdendo la componente circadiana.

Tab.15 – Coefficienti di correlazione tra HMIX e variabili meteo, su base oraria.

Hmix (orario)	Velocità vento	Radiazione Globale	Temp	Umidità Relativa	Pressione
TOT.	0.40	0.72	0.39	-0.52	0.00
INV.	0.38	0.49	0.23	-0.43	0.05
PRI.	0.48	0.74	0.46	-0.54	-0.06
EST.	0.52	0.83	0.60	-0.65	-0.06
AUT.	0.30	0.47	0.28	-0.32	-0.08

Tab.16 – Coefficienti di correlazione tra HMIX e variabili meteo, su base giornaliera.

Hmix (giornaliero)	Velocità vento	Radiazione Globale	Temp	Umidità Relativa	Pressione
TOT.	0.34	0.46	0.43	-0.43	0.07

Per completezza sono riportati i coefficienti di correlazione tra Hmix, radon e PM2.5, campionato nei siti di Villa S. Lorenzo e Monte Morello. Anche in questo caso, in considerazione della parziale copertura temporale dei dati, sono stati considerati i coefficienti di correlazione totali, relativi a periodi temporali diversi per radon e PM2.5. L'anticorrelazione tra Hmix e radon è presente anche se meno marcata rispetto al periodo 2005-2006 (-0.53 orario; -0.48 giornaliero).

Il valore di correlazione tra Hmix e PM2.5 (VSL) è leggermente inferiore (in valore assoluto) rispetto al valore del 2005-2006 (-0.42); anche la correlazione tra radon e PM2.5 (VSL) è inferiore, 0.60 rispetto a 0.72 nel periodo 2005-2006. Le misure di PM2.5 registrate a Monte Morello risultano poco correlate con le misure di radon, mentre per quanto riguarda Hmix si ha addirittura un valore positivo.

Tab.17 – Coefficienti di correlazione tra HMIX, radon e PM2.5 presso VSL e MM, su base oraria e giornaliera.

HMIX VSL	Radon	PM2.5 VSL	PM2.5 MM
oraria	-0.37	-	-
giorn.	-0.22	-0.38	0.11

Tab.18 – Coefficienti di correlazione tra radon e PM2.5 presso VSL e MM, su base giornaliera.

Radon	HMIX VSL	PM2.5 VSL	PM2.5 MM
giorn.	-0.22	0.60	0.22

Le serie temporali su base oraria relative al mese di luglio (fig. 12) e del mese di dicembre (fig. 13) evidenziano bene l'andamento del periodo caldo, caratterizzato da una marcata ciclicità giornaliera di Hmix e radon; nel periodo freddo il radon si accumula e i valori restano alti per più giorni, in corrispondenza dei periodi in cui Hmix resta basso anche durante le ore centrali del giorno, con valori massimi dell'ordine di 400-500 m.

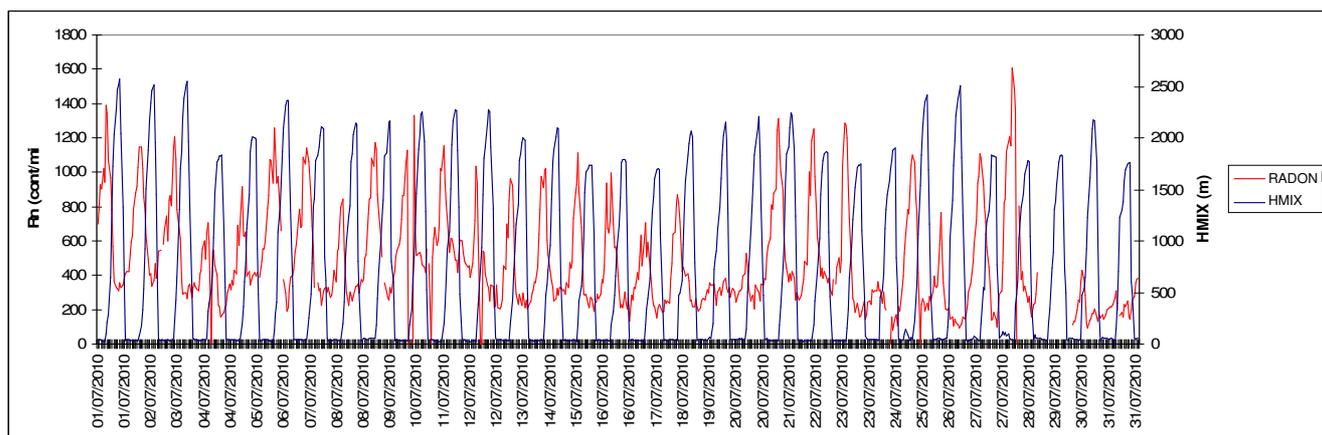


Fig.16 – Serie temporale dei dati orari di radon (rosso) e di HMIX (blu) nel mese di luglio 2010.

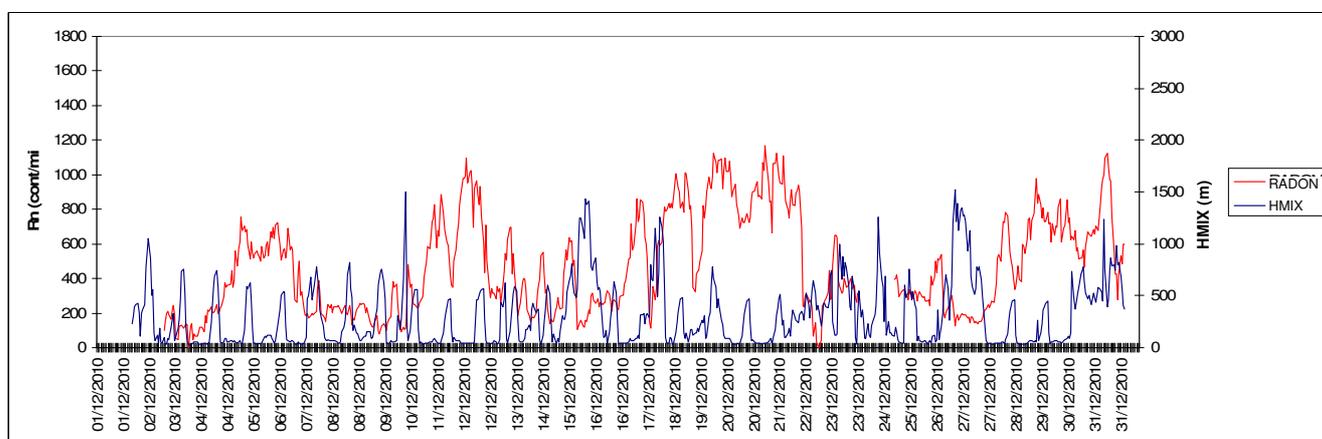


Fig.17 – Serie temporale dei dati orari di radon (rosso) e di Hmix (blu) nel mese di dicembre 2010.

Osservando i dati misurati nel mese di dicembre (tab.19), unico periodo in cui sono disponibili contemporaneamente le misure di radon e di PM2.5 nei due siti (solo ogni due giorni), si può notare che i giorni in cui presso VSL si registrano valori di concentrazione alti, presso MM sono molto bassi, mentre i valori di radon sono alti. Questi episodi, in linea con quanto osservato nell'inverno 2005-2006, possono confermare che i superamenti dei valori limite in pianura si verificano quando gli inquinanti atmosferici non si distribuiscono in quota, ma restano intrappolati al di sotto della quota di inversione termica, in questi casi molto bassa.

Si segnala che, nell'ambito di queste analisi, la stazione di Monte Morello risulta rivestire grande importanza per confermare l'andamento delle variabili oggetto di studio, Hmix e radon, e in particolare per supportare l'ipotesi che il parametro Hmix sia fondamentale nel determinare la concentrazione di inquinanti negli strati inferiori dell'atmosfera.

Infatti, quando Hmix e' alta gli inquinanti del bacino possono raggiungere Monte Morello, con conseguente aumento del PM nel sito in quota (Hmix-PM2.5 MM: correlazione positiva) e diminuzione nel sito presso Villa S. Lorenzo (Hmix-PM2.5VSL: correlazione negativa). In condizioni di Hmix bassa, invece, la concentrazione di PM e di radon aumenta presso VSL (Hmix-PM2.5 VSL: sempre correlazione negativa), mentre presso il sito di Monte Morello la concentrazione di PM ha un andamento indipendente, perché controllato dal trasporto nella libera troposfera.

Tab.19 – Valori di concentrazione media giornaliera per PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$) presso VSL e MM, misure di radon(conteggi/s) e stime di Hmix (m).

Data	radon	PM2.5 (VSL)	PM2.5 (MM)	HMIX
02/12/2010		5	3	362
04/12/2010	212	7	5	182
06/12/2010	580	21	5	165
08/12/2010	219	12	4	209
10/12/2010	284	18	5	316
12/12/2010	742	72	4	172
14/12/2010	263	12	5	248
16/12/2010	285	21	10	286
18/12/2010	820	82	9	262
20/12/2010	849	131	3	130
22/12/2010	360	68	18	372
24/12/2010	259	5	17	358
26/12/2010	306	7	15	486
28/12/2010	515	32	5	121
30/12/2010	640	67	7	377

1.8 Sintesi dei risultati ottenuti nel confronto stime-misure

Scopo di questa prima parte del lavoro è stato quello di verificare, attraverso il confronto con dati misurati, che la stima del parametro Hmix ottenuta dalla catena di modelli WRF-CALMET fosse attendibile.

Mentre il confronto, e quindi il processo di validazione, tra parametri meteo stimati e misurati come vento e temperatura risulta più immediato, per quanto riguarda Hmix la questione si fa più problematica, dato che non sono disponibili misure dirette di questa variabile. E' stato effettuato un confronto con le variabili meteorologiche misurate a terra (VV, T, P, Rg, Ur, pioggia), e con misure proporzionali alla concentrazione di radon (conteggi al secondo), su cui si basa un metodo indiretto di

valutazione della variazione temporale di Hmix. Infine, sono state utilizzate misure di PM10 e PM2.5, effettuate presso Villa S.Lorenzo e Monte Morello (sito in quota).

I risultati ottenuti dal confronto tra le stime di Hmix e dei parametri misurati evidenziano una buona corrispondenza tra stime e misure, sia a livello orario che su base giornaliera e portano a concludere che la configurazione della catena di modelli sul bacino Firenze-Prato-Pistoia è adeguata.

2. Gli indicatori meteorologici per la previsione dei livelli critici di concentrazione di PM10

La prima parte del lavoro ha evidenziato che la configurazione della catena di modelli sul bacino Firenze-Prato-Pistoia permette di stimare correttamente le variabili meteorologiche di interesse, in particolare Hmix. Le stime di Hmix, di vento e di temperatura ottenute sul dominio di calcolo sono state elaborate in modo da ottenere valori medi annuali e stagionali, oltre che valori medi giornalieri in corrispondenza dei siti che ospitano le stazioni di monitoraggio ARPAT. Dopo una analisi finalizzata a determinare le correlazioni tra stime di Hmix e misure di PM10 nei siti di monitoraggio e ad individuare gli episodi critici verificati nel 2010, sono stati determinati gli indicatori relativi alle condizioni meteorologiche predisponenti l'accumulo di sostanze inquinanti.

2.1 Le stazioni di monitoraggio PM10

In questo lavoro sono state prese in esame le stazioni di monitoraggio ARPAT relative al PM10 che ricadono nel bacino Firenze-Prato-Pistoia. Si tratta di 15 stazioni, di cui 4 ubicate nell'area urbana di Firenze (2 traffico e 2 fondo), 3 nell'area urbana di Prato (2 traffico e una fondo), 2 nell'area urbana di Pistoia (una traffico e una fondo), una rispettivamente presso Montale (rurale, fondo), Calenzano (urbana, fondo), Signa (urbana, fondo), Scandicci (urbana, fondo), Campi Bisenzio (urbana, fondo) e nel Comune di Prato (urbana, traffico).

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche delle stazioni di monitoraggio, mentre in figura 18 è rappresentata la loro localizzazione nel bacino Firenze-Prato-Pistoia.

Tab.20 – Stazioni di monitoraggio di PM10 nel bacino Firenze-Prato-Pistoia.

ID	NOME	PROVINCIA	LOCALITA'	UBICAZIONE	TIPO ZONA	TIPO STAZIONE	RETE REGIONALE	X_UTM	Y_UTM
1	FI-BASSI	FI	Firenze	v. Bassi	Urbana	Fondo	SI	683896	4850571
2	FI-BOBOLI	FI	Firenze	v. Boboli	Urbana	Fondo	SI	680584	4847554
3	FI-GRAMSCI	FI	Firenze	v.le Gramsci	Urbana	Traffico	SI	682669	4848861
4	FI-MOSSE	FI	Firenze	v. Ponte alle Mosse	Urbana	Traffico	SI	679057	4850389
5	FI-CALENZANO	FI	Calenzano	v. Giovanni XXIII	Urbana	Fondo		675620	4857404
6	FI-SIGNA	FI	Signa	v. Roma	Urbana	Fondo		668932	4849643
7	FI-SCANDICCI	FI	Scandicci	v. Buozzi	Urbana	Fondo	SI	676474	4847374
8	FI-CAMPI	FI	Campi Bisenzio	Via Orly	Urbana	Fondo		672259	4854279
9	PO-XXSETTEMBRE	PO	Prato	v. XX Settembre	Urbana	Traffico		665615	4853649
10	PO-FERRUCCI	PO	Prato	v. Ferrucci	Urbana	Traffico		669003	4859829
11	PO-ROMA	PO	Prato	v. Roma	Urbana	Fondo	SI	668090	4859957
12	PO-STROZZI	PO	Prato	v. Strozzi	Urbana	Traffico		668194	4861634
13	PT-MONTALE	PT	Montale	v. Pacinotti	Rurale	Fondo	SI	662364	4866774
14	PT-SIGNORELLI	PT	Pistoia	Signorelli	Urbana	Fondo	SI	652916	4867153
15	PT-ZAMENHOF	PT	Pistoia	v. Zamenhof	Urbana	Traffico		653584	4866054

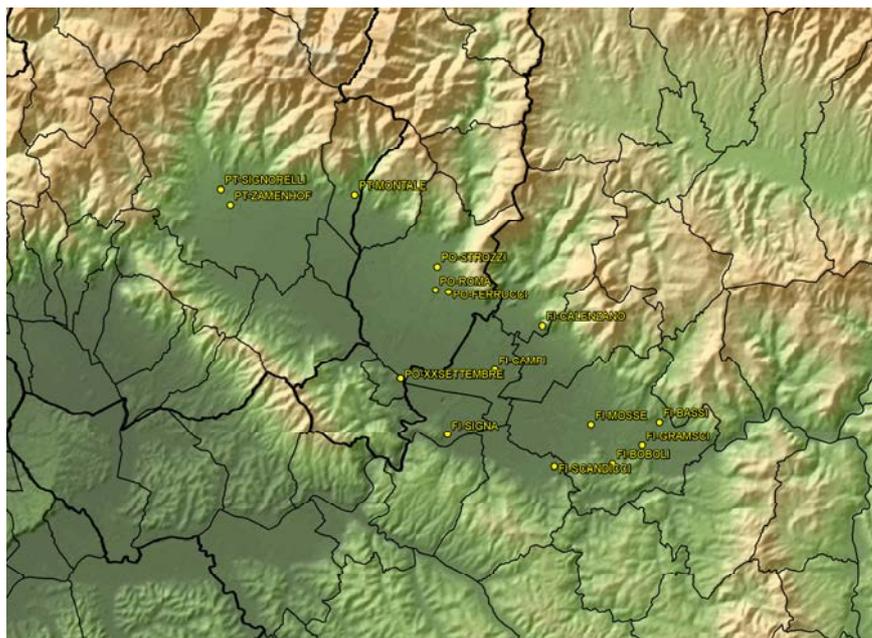


Fig.18 – Mappa dell’area di studio e localizzazione delle stazioni di monitoraggio di PM10.

2.2 Misure di PM10 nell’anno 2010

Analizzando le serie temporali delle misure di PM10 relative all’anno 2010, rilevate nelle 15 stazioni ARPAT, si può notare che si tratta di dati molto correlati. I valori dei coefficienti di correlazione tra i dati misurati nelle varie stazioni, riportati in tab.21, sono molto alti, generalmente dell’ordine di 0.8 – 0.9 o superiori.

Tab.21 – Valori di correlazione tra le stazioni di monitoraggio di PM10.

CORRELAZIONE	FI-BASSI	FI-BOBOLI	FI-CALENZANO	FI-CAMPI	FI-GRAMSCI	FI-MOSSE	FI-SCANDICCI	FI-SIGNA	PO-FERRUCCI	PO-ROMA	PO-STROZZI	PO-XX-SETT	PT-MONTALE	PT-SIGNOR	PT-ZAMENHOF
FI-BASSI	1.00	0.96	0.95	0.91	0.91	0.95	0.91	0.94	0.91	0.83	0.92	0.91	0.95	0.94	0.89
FI-BOBOLI	0.96	1.00	0.95	0.93	0.88	0.92	0.92	0.96	0.89	0.85	0.92	0.90	0.95	0.93	0.87
FI-CALENZANO-GIOVANNI	0.95	0.95	1.00	0.93	0.85	0.89	0.93	0.90	0.94	0.87	0.94	0.92	0.94	0.93	0.86
FI-CAMPI-BISENZIO	0.91	0.93	0.93	1.00	0.85	0.89	0.98	0.90	0.96	0.95	0.95	0.94	0.96	0.94	0.84
FI-GRAMSCI	0.91	0.88	0.85	0.85	1.00	0.95	0.81	0.87	0.80	0.79	0.86	0.86	0.89	0.91	0.90
FI-MOSSE	0.95	0.92	0.89	0.89	0.95	1.00	0.85	0.91	0.87	0.84	0.89	0.91	0.93	0.92	0.88
FI-SCANDICCI-BUOZZI	0.91	0.92	0.93	0.98	0.81	0.85	1.00	0.90	0.96	0.94	0.96	0.92	0.95	0.92	0.80
FI-SIGNA	0.94	0.96	0.90	0.90	0.87	0.91	0.90	1.00	0.87	0.87	0.91	0.89	0.94	0.92	0.83
PO-FERRUCCI	0.91	0.89	0.94	0.96	0.80	0.87	0.96	0.87	1.00	0.93	0.95	0.93	0.95	0.93	0.82
PO-ROMA	0.83	0.85	0.87	0.95	0.79	0.84	0.94	0.87	0.93	1.00	0.90	0.90	0.92	0.87	0.74
PO-STROZZI	0.92	0.92	0.94	0.95	0.86	0.89	0.96	0.91	0.95	0.90	1.00	0.93	0.95	0.94	0.85
PO-XX-SETTEMBRE	0.91	0.90	0.92	0.94	0.86	0.91	0.92	0.89	0.93	0.90	0.93	1.00	0.95	0.95	0.90
PT-MONTALE	0.95	0.95	0.94	0.96	0.89	0.93	0.95	0.94	0.95	0.92	0.95	0.95	1.00	0.97	0.89
PT-SIGNORELLI	0.94	0.93	0.93	0.94	0.91	0.92	0.92	0.92	0.93	0.87	0.94	0.95	0.97	1.00	0.94
PT-ZAMENHOF	0.89	0.87	0.86	0.84	0.90	0.88	0.80	0.83	0.82	0.74	0.85	0.90	0.89	0.94	1.00

Nelle figure 19-22 sono riportate le serie temporali delle concentrazioni medie giornaliere rilevate rispettivamente nell'area urbana di Firenze (fig.19), nell'interland fiorentino (fig.20), nell'area urbana di Prato (e Calenzano) (fig.21), nell'area urbana di Pistoia (e Montale)(fig.22). Tutte le serie hanno un andamento temporale molto simile, come evidenziato dai coefficienti di correlazione; nel periodo invernale e autunnale le concentrazioni sono più alte, con presenza di picchi molto elevati, mentre nel semestre caldo le concentrazioni sono nettamente più basse.

In termini quantitativi si notano differenze importanti tra sito e sito, soprattutto nel semestre freddo e in corrispondenza dei picchi di concentrazione: se è vero che gli episodi critici si verificano in tutte le stazioni e gli andamenti temporali sono analoghi, ci sono però delle differenze quantitative importanti, che possono portare al superamento del valore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in alcune stazioni mentre in altre no.

Le concentrazioni rilevate nelle due stazioni urbane-fondo di Firenze (Bassi, Boboli) sono quasi identiche, molto simili come andamento a quelle rilevate nelle due stazioni di traffico (Gramsci, Mosse), ma con valori nettamente più bassi (Fig.19).

Le serie storiche rilevate nelle stazioni dell'interland fiorentino sono, anche in termini quantitativi, simili a quelle di stazioni di traffico, sebbene una sola di queste, PO-XXSettembre, sia classificata come tale. In alcuni episodi le stazioni di fondo Signa, Calenzano e Campi Bisenzio raggiungono valori maggiori rispetto alla stazione PO-XXSettembre (fig.20).

Analoghe considerazioni si possono fare per la stazione fondo di PO-Roma, la cui serie temporale è in tutto simile a quelle rilevate nelle due stazioni di traffico dell'area urbana pratese e della stazione di Calenzano (fig.21).

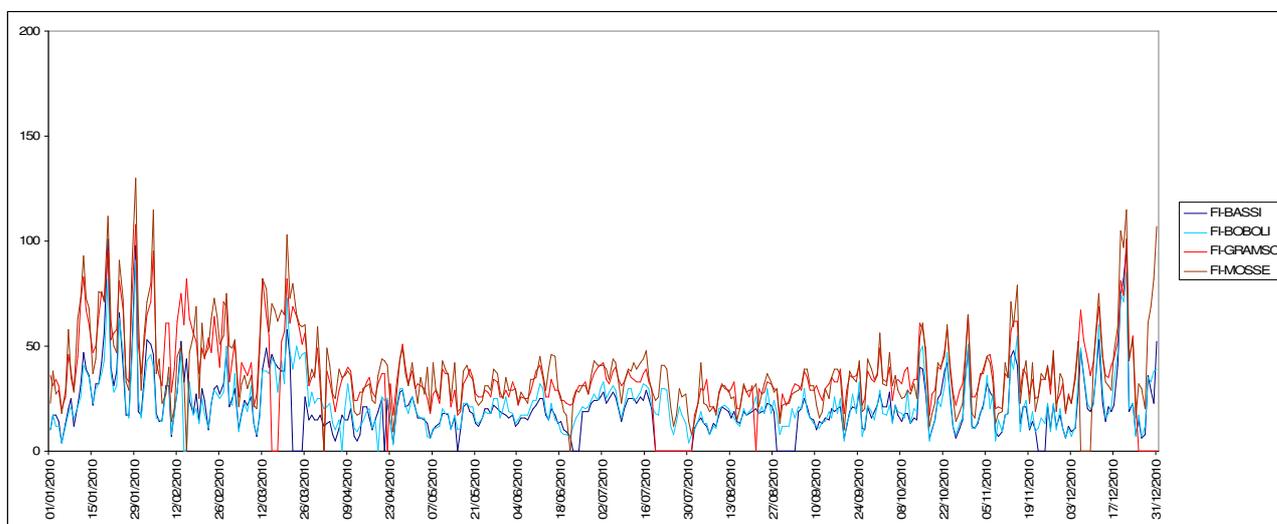


Fig.19 – Serie temporale della concentrazione media giornaliera di PM10 misurato nelle stazioni di Firenze, Bassi, Boboli, Gramsci, Mosse, nell'anno 2010.

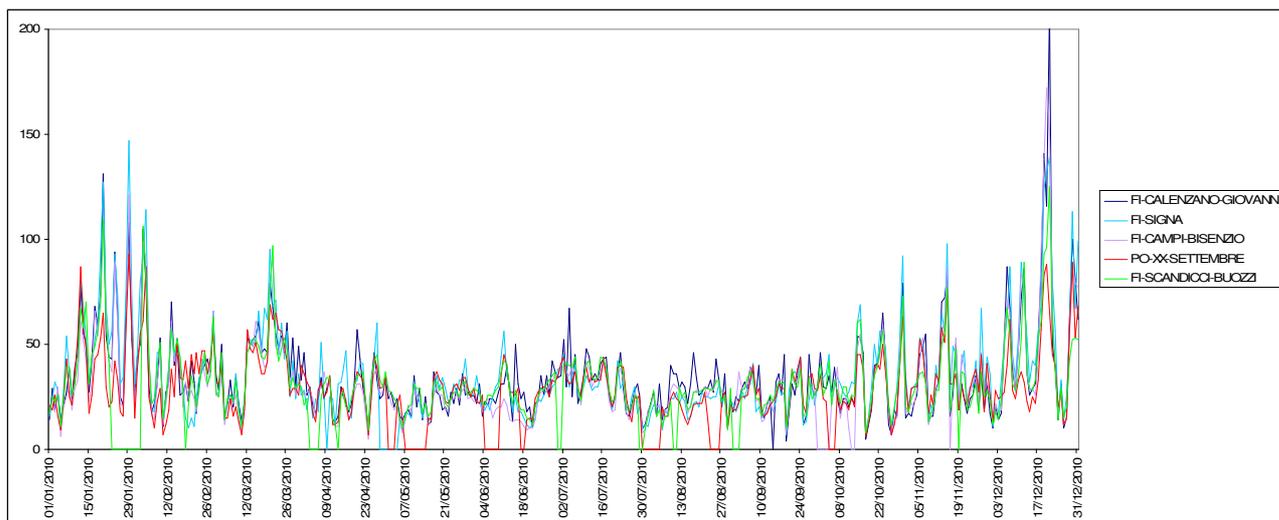


Fig.20 – Serie temporale della concentrazione media giornaliera di PM10 misurato nelle stazioni di Calenzano, Signa, Campi, Prato-XXSettembre, Scandicci, nell’anno 2010.

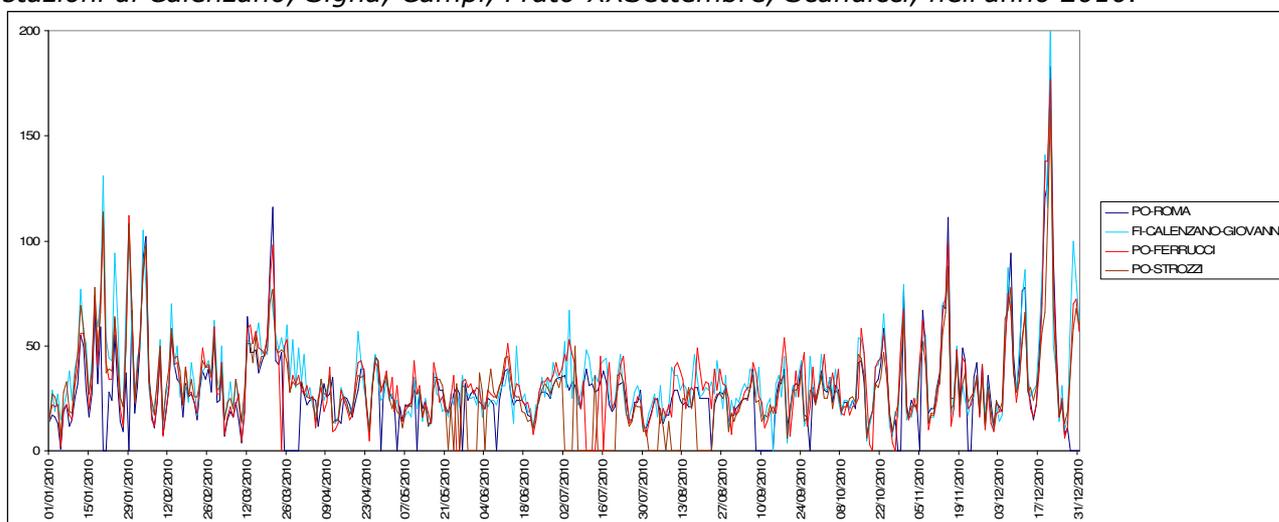


Fig.21 – Serie temporale della concentrazione media giornaliera di PM10 misurato nelle stazioni di Prato, via Roma, Ferrucci, Strozz e di Calenzano, nell’anno 2010.

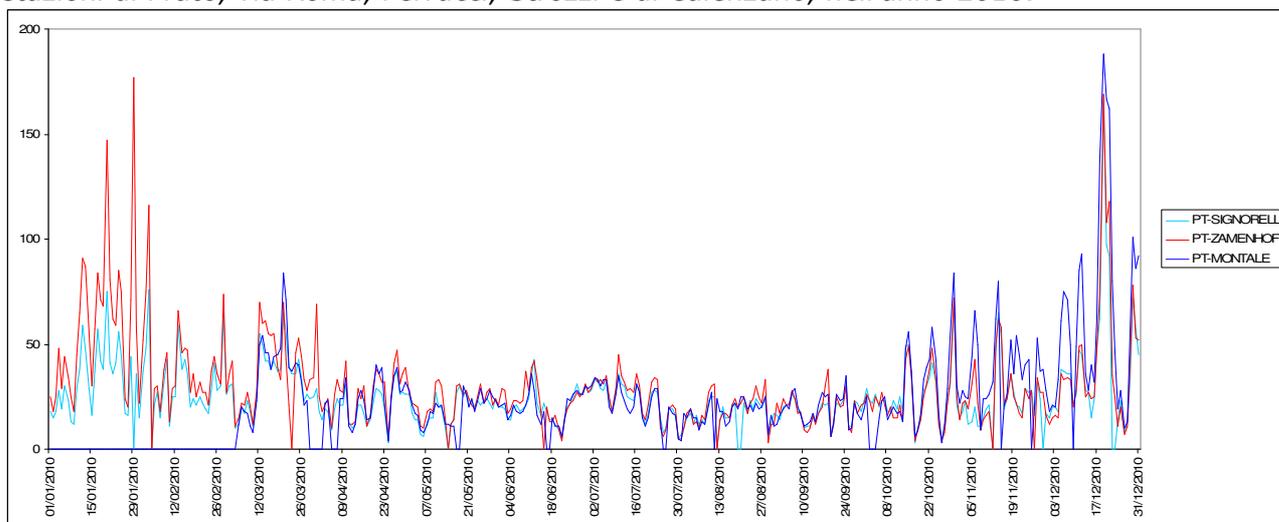


Fig.22 – Serie temporale della concentrazione media giornaliera di PM10 misurato nelle stazioni di Pistoia, Signorelli, Zamenhof e Montale, nell’anno 2010.

Anche le serie rilevate nelle stazioni dell'area urbana di Pistoia e di Montale hanno un andamento molto simile a quanto misurato nelle altre stazioni del bacino (fig. 22); la stazione di fondo urbano mostra valori più bassi mentre la stazione di Montale (fondo-rurale), presenta i valori più alti durante gli episodi critici nel semestre freddo, mentre nel periodo caldo i valori di concentrazione sono praticamente uguali in tutte le stazioni.

In sintesi si può dire che gli andamenti delle serie temporali sono molto simili in tutte le stazioni del bacino, che i valori più elevati si rilevano solo nel semestre freddo, ma che a livello quantitativo si presentano notevoli differenze, non riconducibili semplicemente alla classificazione fondo, traffico. Nel periodo caldo invece tutte le serie tendono ad avere non solo gli andamenti, ma anche i valori quantitativi molto simili.

Tab.22 – Valori di correlazione tra le stazioni di monitoraggio di PM10, in rosso sono indicate le stazioni di traffico

Stazione	dati validi %	conc. media annua	superamenti	hmix media annua	correl.hmix-conc.
FI-BASSI	91	22	13	532	-0.39
FI-BOBOLI	99	23	13	481	-0.40
FI-GRAMSCI	93	38	67	536	-0.52
FI-MOSSE	98	39	69	514	-0.50
FI-SIGNA	98	36	68	458	-0.51
FI-SCANDICCI	93	33	40	488	-0.47
FI-CAMPI	98	32	46	479	-0.42
FI-CALENZANO	100	35	60	496	-0.41
PO-XX-SETTEMBRE	91	31	35	424	-0.38
PO-FERRUCCI	97	33	47	536	-0.33
PO-ROMA	91	31	33	522	-0.33
PO-STROZZI	89	32	38	489	-0.38
PT-MONTALE	77	29	31	506	-0.42
PT-SIGNORELLI	97	26	21	541	-0.39
PT-ZAMENHOF	98	31	42	507	-0.44

Le differenze nei valori quantitativi sono evidenziate anche nella tab. 22, in cui sono riportati i valori medi annui e il numero di superamenti della soglia di 50 µg/m³ per ciascuna stazione. Le stazioni di traffico, evidenziate in rosso, hanno evidentemente valori medi e numero di superamenti alti, mentre le stazioni classificate fondo hanno

valori molto diversi: per esempio nelle stazioni di Bassi e di Boboli la media annua è molto bassa, come il numero di superamenti (solo 13), mentre nelle stazioni di fondo di Signa e Calenzano si hanno rispettivamente 68 e 60 superamenti, maggiori di quanto rilevato in alcune stazioni di traffico.

2.3 Stime di Hmix, vento e temperatura nel bacino FI-PO-PT

In questo paragrafo vengono analizzate le variabili meteorologiche stimate nel dominio di calcolo, che copre il bacino Firenze-Prato –Pistoia. I valori orari sono stati mediati in modo da ottenere mappe rappresentative della media annua e delle medie stagionali di temperatura, velocità del vento e Hmix.

2.3.1 Temperatura

La temperatura media annua stimata (fig. 23) è piuttosto uniforme, con valori tra 13 e 15 °C, valori inferiori nell'area montana e valori più alti nella piana fiorentina (15-17°C). A livello stagionale, in primavera ed estate la temperatura media è uguale nel bacino Firenze-Prato-pistoia, mentre in inverno e in autunno nell'area pistoiese e pratese la temperatura media è più bassa di qualche grado rispetto all'area fiorentina (fig.24).

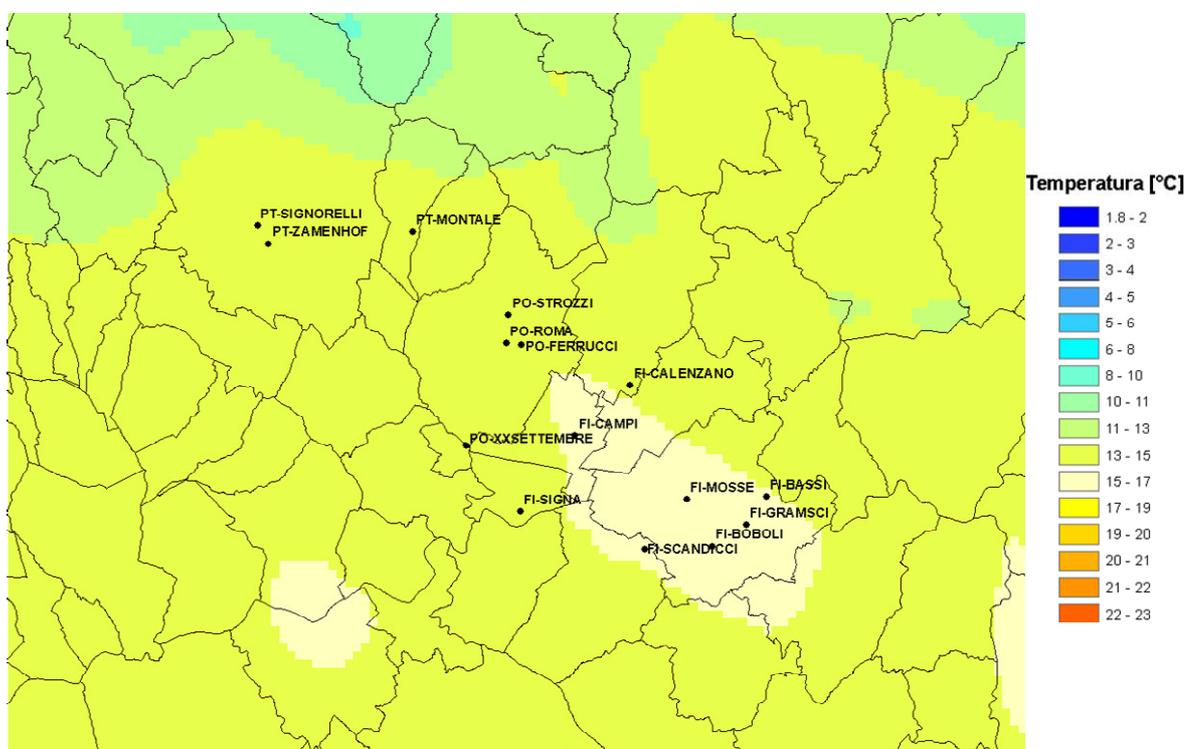


Fig.23 – Mappa dei valori medi stagionali di vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell'anno 2010.

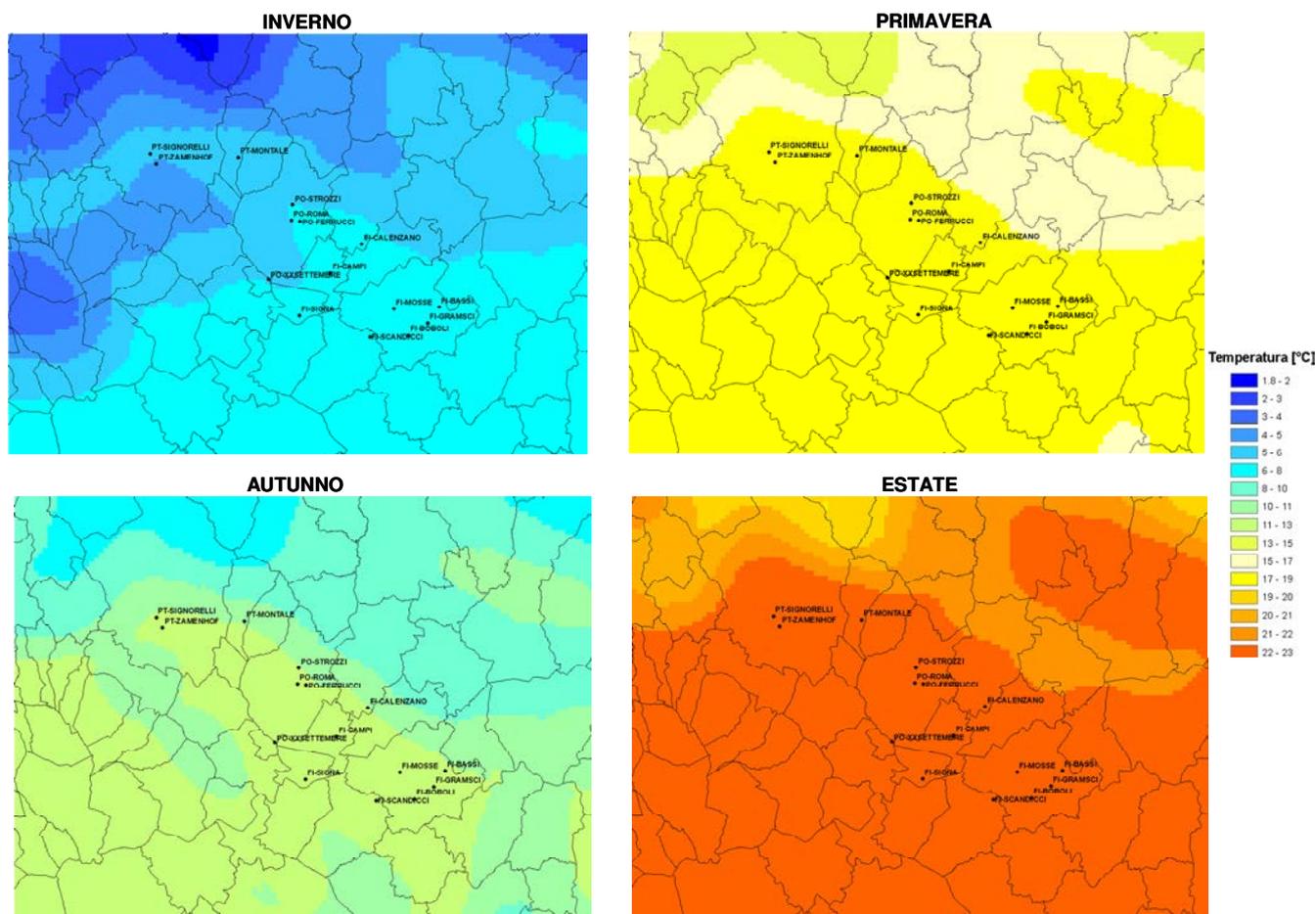


Fig.24 – Mappa dei valori medi stagionali di vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell’anno 2010.

2.3.2 Velocità del vento

Il valore della velocità del vento, come media annua, è più alto sui rilievi: nel bacino Firenze-Prato-Pistoia presenta delle differenze, più basso nell’area tra Firenze e Prato e a sud di Pistoia (fig.25). A livello stagionale, il periodo più ventoso nel bacino è la primavera, mentre i valori più bassi si verificano in estate, con valori compresi tra 1.5 e 2 m/s: nel semestre caldo la ventosità nella piana è omogenea, mentre in autunno ed in inverno le aree segnalate sopra sono caratterizzate da un vento mediamente più basso.

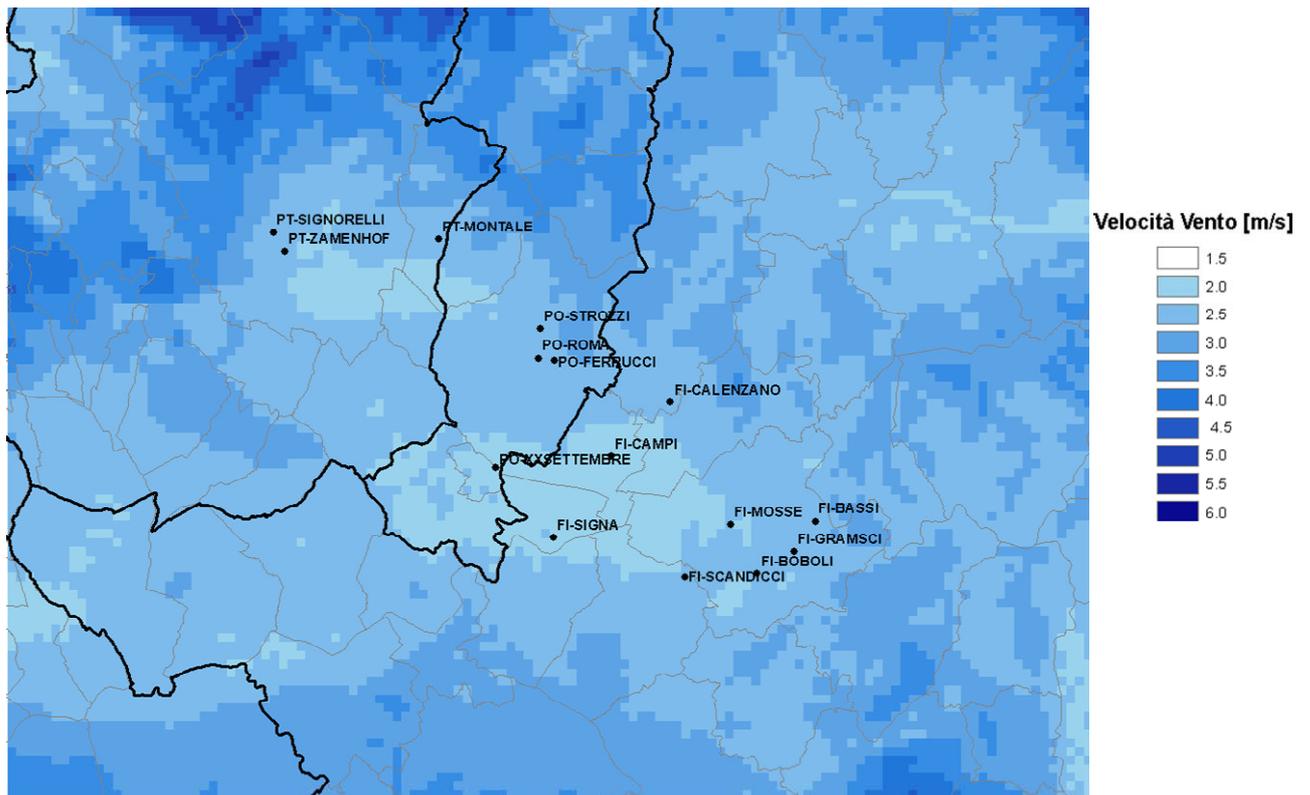


Fig.25 – Mappa dei valori medi annuali di vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell’anno 2010.

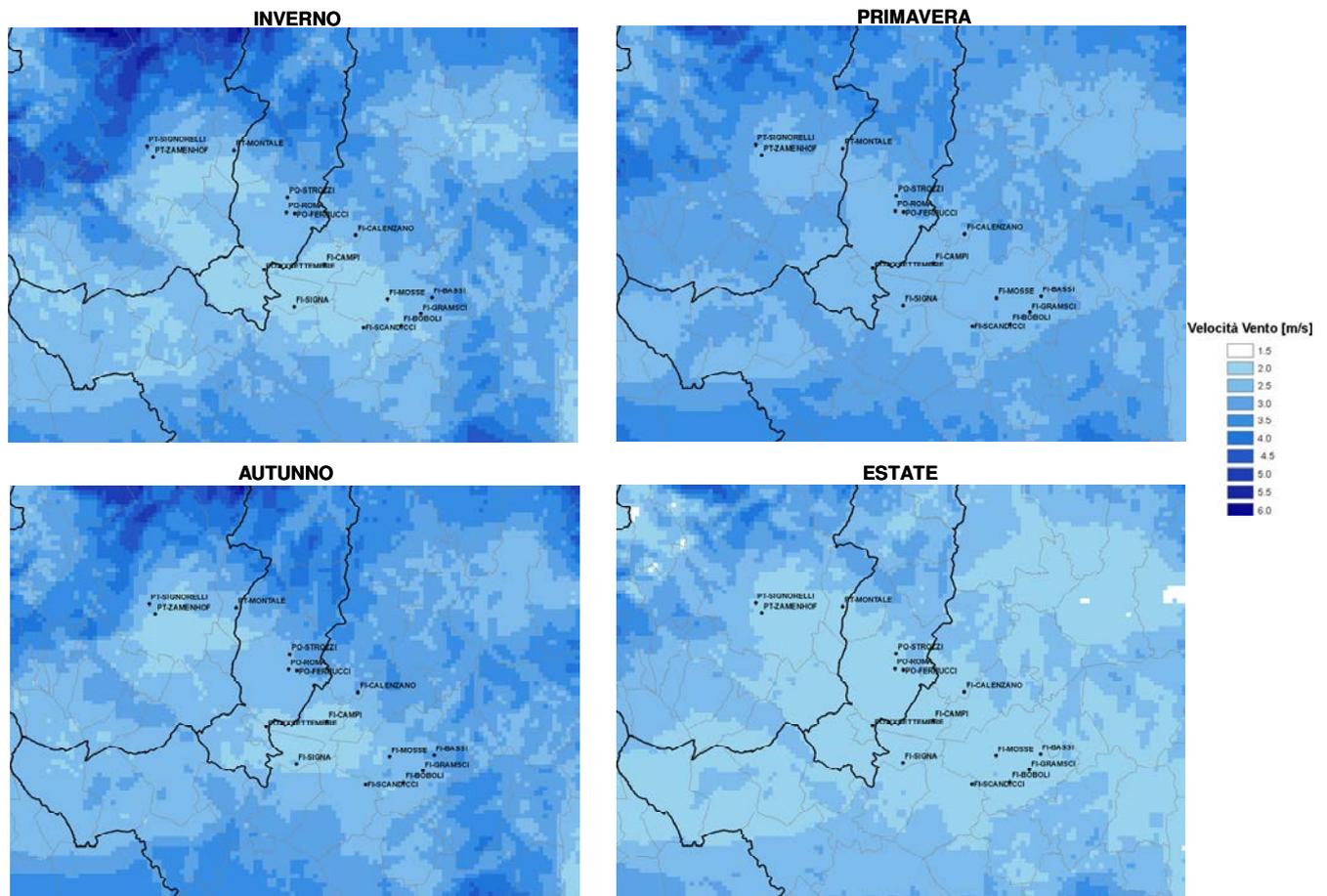


Fig.26 – Mappa dei valori medi stagionali di vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell’anno 2010.

2.3.3 Hmix

I valori medi annui di Hmix nel dominio di studio seguono l'orografia, più alti in montagna e inferiori nelle zone pianeggianti (fig.27). Anche in questo caso, come per il vento medio, nel bacino i valori più alti si hanno in primavera, mentre i più bassi in estate, comunque omogenei in tutta la piana. In autunno e in inverno si evidenziano invece valori disomogenei, più bassi nella parte centrale del bacino (fig.28).

Queste variazioni spaziali di Hmix nella Piana, sebbene piuttosto limitate, sono sicuramente da attribuire alla componente turbolenta, cioè al vento, come si può notare confrontando le mappe dei due parametri. Peraltro una variazione della componente convettiva, legata alla radiazione, non sarebbe giustificabile in un'area così limitata.

I coefficienti di correlazione delle serie temporali orarie di Hmix estratte in corrispondenza delle 15 centraline di monitoraggio del PM10 molto alti, 0.95-0.98, evidenziano che gli andamenti temporali sono molto simili all'interno del bacino (tab.23).

In tab. 22 sono riportati anche i coefficienti di correlazione tra Hmix e PM10 nei 15 siti di campionamento: anche in questo caso, come ampiamente illustrato nel capitolo precedente, si evidenzia una anticorrelazione tra Hmix e PM10, con valori che vanno da -0.33 a -0.51.

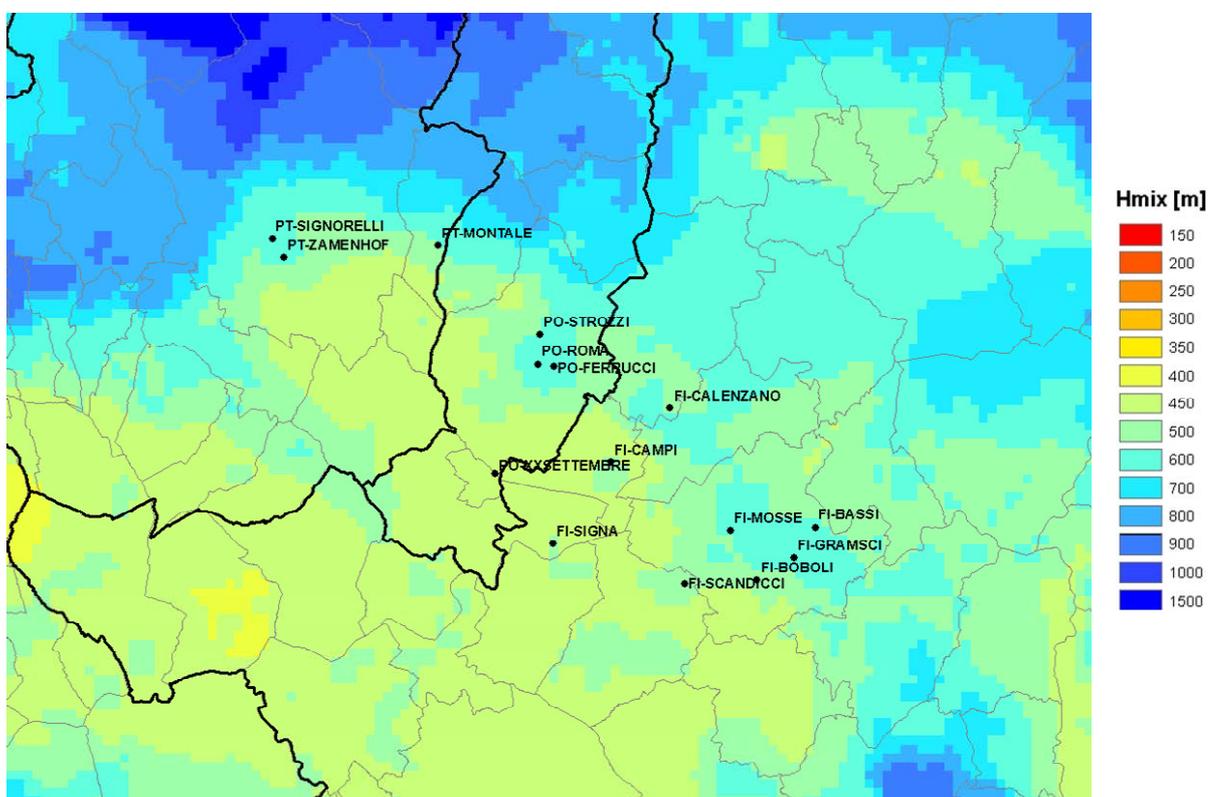


Fig.27 – Mappa dei valori medi annui di Hmix stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell'anno 2010.

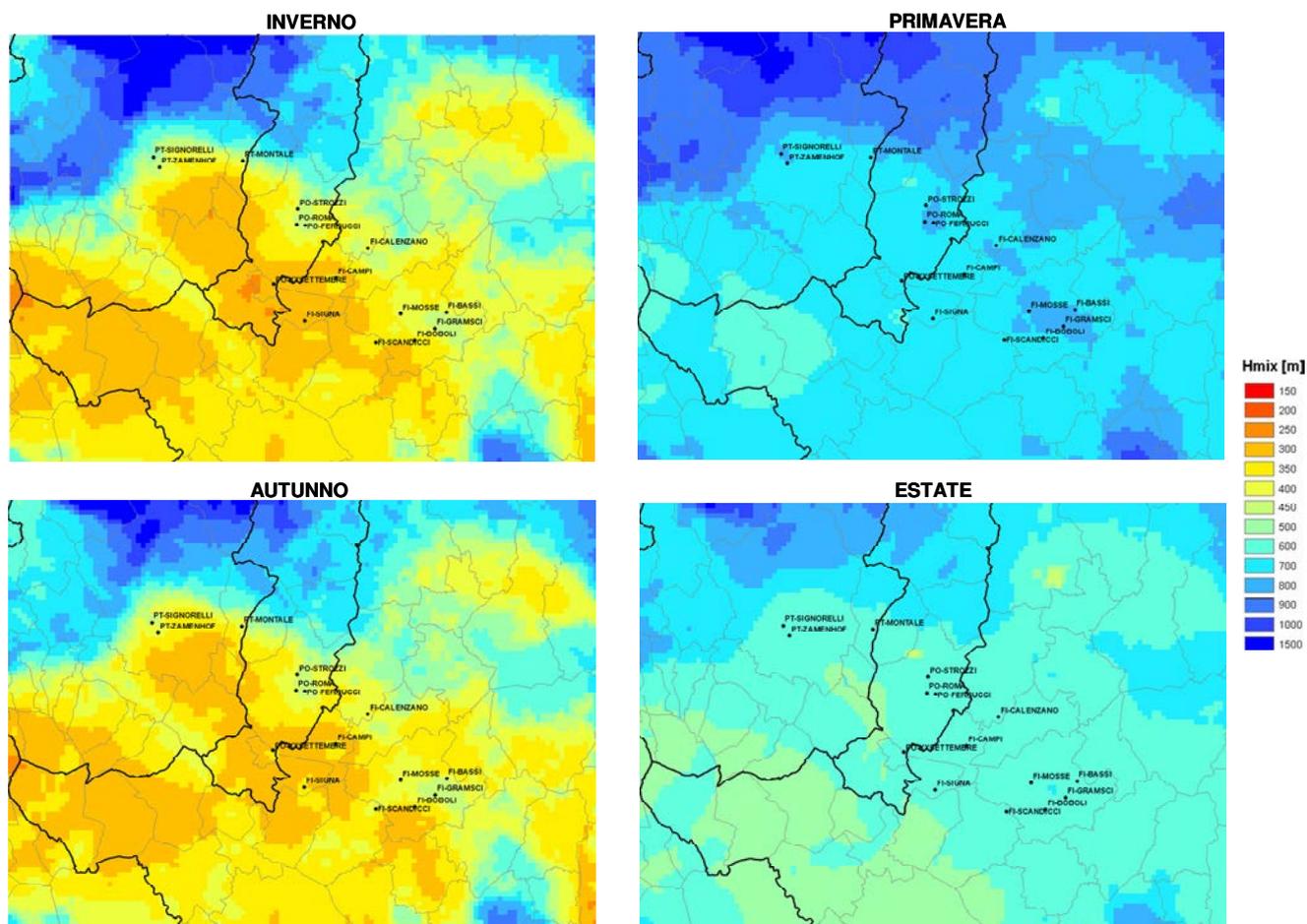


Fig.28 – Mappa dei valori medi stagionali di Hmix stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell’anno 2010.

Tab.23 – Valori di correlazione tra le stazioni di monitoraggio di PM10.

	FI-BASSI	FI-BOBOLI	FI-GRAMSCI	FI-MOSSE	FI-SIGNA	FI-SCANDICCI-BUOZZI	PO-CAMPI-BISENZIO	PO-FERRUCCI	PO-ROMA	PO-STROZZI	PT-MONTALE	PT-SIGNORELLI	PT-ZAMENHOF	FI-CALENZANO-GIOVANNI	PO-XX-SETTEMBRE
FI-BASSI	1.00	0.97	0.99	0.98	0.96	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.92	0.92	0.98	0.96
FI-BOBOLI	0.97	1.00	0.99	0.99	0.98	0.99	0.96	0.93	0.93	0.94	0.92	0.92	0.93	0.96	0.98
FI-GRAMSCI	0.99	0.99	1.00	0.99	0.97	0.98	0.96	0.94	0.94	0.95	0.93	0.92	0.93	0.97	0.96
FI-MOSSE	0.98	0.99	0.99	1.00	0.98	0.99	0.97	0.95	0.95	0.96	0.94	0.93	0.93	0.98	0.97
FI-SIGNA	0.96	0.98	0.97	0.98	1.00	0.99	0.97	0.94	0.94	0.95	0.93	0.93	0.94	0.97	0.99
FI-SCANDICCI-BUOZZI	0.97	0.99	0.98	0.99	0.99	1.00	0.97	0.93	0.94	0.94	0.92	0.93	0.94	0.96	0.98
FI-CAMPI-BISENZIO	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	1.00	0.96	0.96	0.97	0.95	0.94	0.94	0.97	0.97
PO-FERRUCCI	0.96	0.93	0.94	0.95	0.94	0.93	0.96	1.00	1.00	0.99	0.97	0.93	0.92	0.98	0.94
PO-ROMA	0.96	0.93	0.94	0.95	0.94	0.94	0.96	1.00	1.00	0.99	0.97	0.93	0.93	0.98	0.95
PO-STROZZI	0.96	0.94	0.95	0.96	0.95	0.94	0.97	0.99	0.99	1.00	0.98	0.94	0.93	0.99	0.96
PT-MONTALE	0.95	0.92	0.93	0.94	0.93	0.92	0.95	0.97	0.97	0.98	1.00	0.95	0.94	0.97	0.93
PT-SIGNORELLI	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.93	0.94	0.95	1.00	0.99	0.94	0.93
PT-ZAMENHOF	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.92	0.93	0.93	0.94	0.99	1.00	0.94	0.95
FI-CALENZANO-GIOVANNI	0.98	0.96	0.97	0.98	0.97	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.97	0.94	0.94	1.00	0.97
PO-XX-SETTEMBRE	0.96	0.98	0.96	0.97	0.99	0.98	0.97	0.94	0.95	0.96	0.93	0.93	0.95	0.97	1.00

A titolo di esempio, in fig. 29 sono riportati valori medi giornalieri per l'intero anno 2010 di Hmix e velocità del vento in corrispondenza delle stazioni FI-Bassi, PO-Roma, PT-Signorelli e PO-XXSettembre: i valori medi di Hmix crescono nel periodo caldo, in corrispondenza dell'aumento della radiazione solare, mentre in autunno ed in inverno mediamente diminuiscono. Da notare però che nella stagioni fredde sono presenti molti picchi, in cui i valori di Hmix sono molto alti: questi valori alti sono direttamente legati a eventi in cui il vento è molto forte, come si può notare dalla corrispondenza temporale tra i picchi nei due grafici. In sintesi, Hmix è generalmente più basso in inverno ed autunno, salvo durante episodi, peraltro piuttosto frequenti, legati a perturbazioni caratterizzate da vento forte. Gli andamenti sono molto simili nei 4 siti, sebbene i picchi presentino valori un po' diversi.

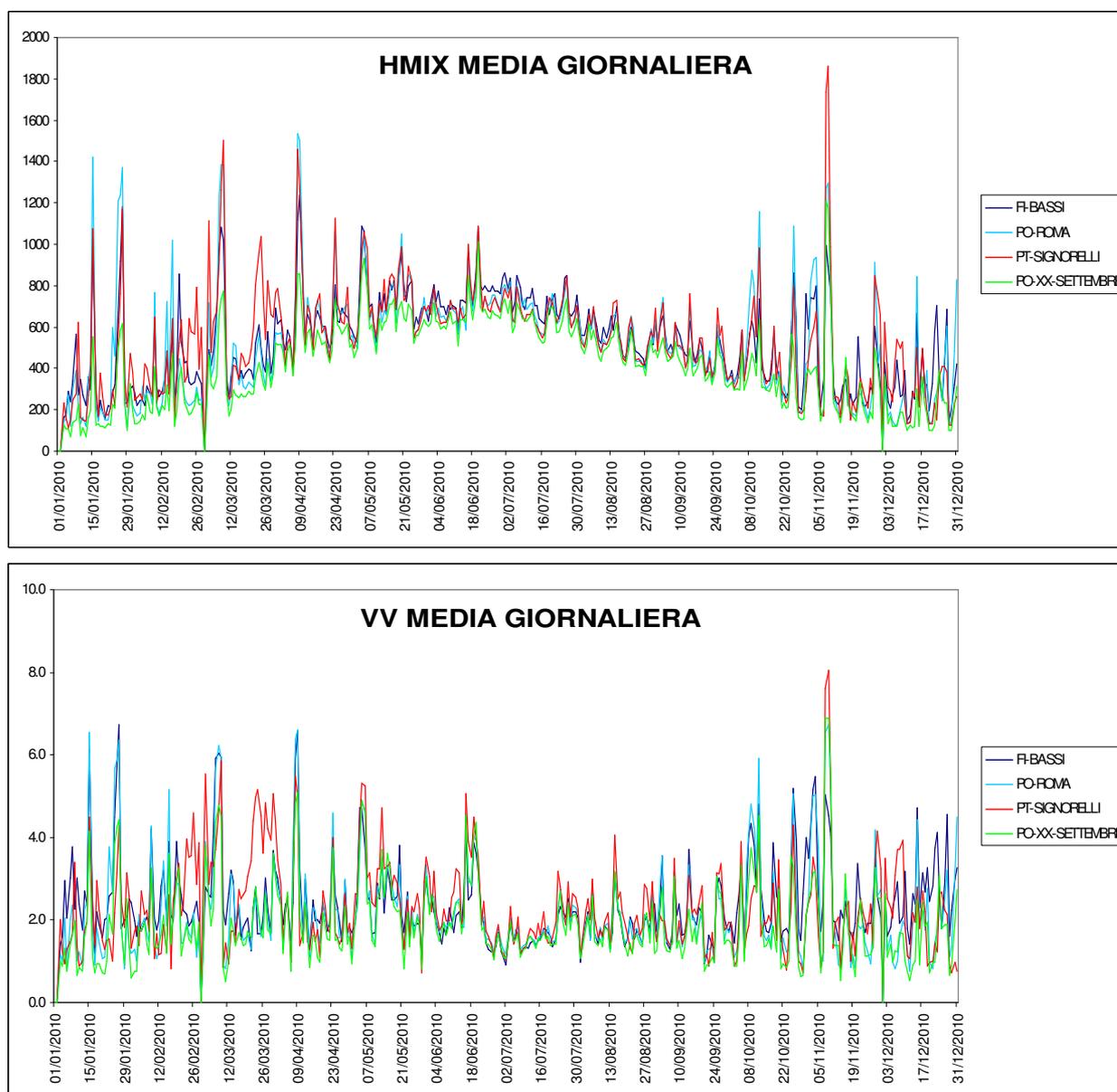


Fig.29 – Mappa dei valori medi stagionali di Hmix e vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell'anno 2010.

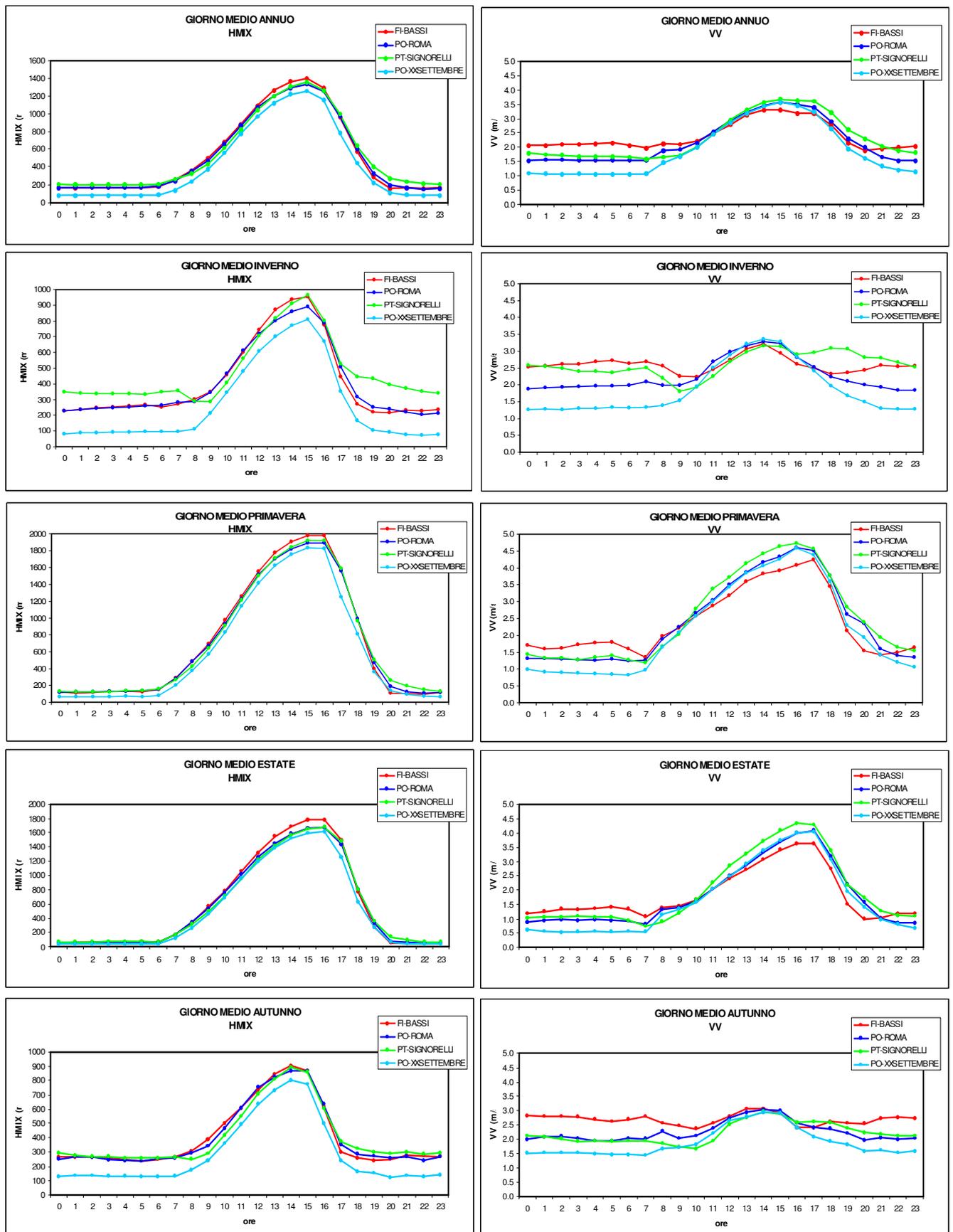


Fig.30 – Mappa dei valori medi annuali e stagionali di vento stimati da WRF-CALMET nel dominio di calcolo, nell'anno 2010.

Sempre in corrispondenza dei 4 siti, sono stati elaborati il giorno medio annuale e stagionale, sia per Hmix che per la velocità del vento (fig. 30). A livello annuale per Hmix non si evidenziano differenze nell'andamento, ma valori più bassi a PO-XXSettembre; per quanto riguarda la velocità del vento si può notare che nelle ore serali-notturne si hanno valori più alti a FI-Bassi e PT-Signorelli e decisamente inferiori a PO-XXSettembre. A livello stagionale, in primavera ed in estate i valori di Hmix sono molto simili nei 4 siti, mentre le differenze maggiori si riscontrano in inverno e in autunno, in cui è evidente il ruolo del vento, marcatamente diverso nelle ore serali-notturne, sempre più basso nel sito di PO-XXSettembre.

2.4 Determinazione degli indicatori

L'analisi svolta ha mostrato che i parametri meteorologici analizzati, Hmix e velocità del vento (VV), all'interno del bacino Firenze-Prato-Pistoia sono caratterizzati da un andamento temporale simile, in quanto le condizioni di stabilità atmosferica o le perturbazioni interessano tutta l'area. Si evidenziano tuttavia delle differenze, più marcate nel semestre freddo, nella velocità del vento, e di conseguenza in Hmix, che ha valori mediamente più bassi nella parte centrale del bacino.

Tali differenze, comunque di modesta entità, non giustificano però le differenze quantitative nei valori di concentrazione di PM10 riscontrate nei vari siti. In effetti i valori misurati nella stazione di PO-XXSettembre, uno dei siti caratterizzati da velocità del vento e Hmix più basse, sono comunque inferiori a quelli misurati, ad esempio, nella stazione di Calenzano, a cui corrispondono valori di VV e Hmix più alti.

In sintesi, condizioni meteorologiche comuni a tutta l'area determinano l'andamento temporale delle concentrazioni di PM10 e quindi anche dei picchi: tuttavia, i valori quantitativi sono diversi da un sito all'altro, soprattutto durante gli episodi critici, da cui deriva un numero di superamenti della soglia di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ molto diverso da stazione a stazione.

La classificazione delle stazioni, fondo o traffico, non spiega in molti casi queste differenze, in quanto, soprattutto nell'interland fiorentino, le stazioni classificate fondo superano come media annuale e come numero di superamenti l'unica stazione di traffico limitrofa, PO-XXSettembre. Senza entrare nel merito dell'annosa questione della localizzazione delle stazioni e della loro classificazione, una corretta analisi della variabilità spaziale della concentrazione di PM10 non può prescindere dalle caratteristiche e quindi dalla localizzazione delle stazioni di fondo, che dovrebbero essere rappresentative di un'area più vasta rispetto a quanto compete alle stazioni di traffico. A prescindere da questa precisazione, appare comunque evidente che,

soprattutto durante gli episodi critici, caratterizzati da stabilità atmosferica e scarsissima diffusività, le sorgenti emissive locali sono decisive per determinare o meno il superamento della soglia di concentrazione per il PM10. Il diverso carico emissivo nel bacino deve quindi essere considerato come fattore determinante soprattutto in presenza di condizioni meteorologiche critiche per la diffusione degli inquinanti.

Di seguito vengono individuati gli episodi critici verificati nel 2010, sulla base dei superamenti della soglia di allarme da parte delle stazioni di fondo. Successivamente, i periodi individuati vengono analizzati da un punto di vista meteorologico, sia con dati misurati che stimati. Infine vengono proposti alcuni indicatori meteo per la caratterizzazione degli episodi critici, utilizzabili anche in ambito previsionale.

2.4.1 Individuazione dei periodi critici

Per individuare i periodi critici per la dispersione degli inquinanti in atmosfera, sono stati considerati i valori di concentrazione di PM10 registrati nelle nove stazioni di fondo del bacino Firenze-Prato-Pistoia, in particolare i superamenti della soglia di 50 µg/m³.

Nell'anno 2010 si sono registrati 80 giorni in cui almeno in una delle nove stazioni si sia verificato un superamento della soglia prevista. I periodi interessati vanno da gennaio a marzo e da ottobre a dicembre, quindi nel semestre freddo. In realtà, nelle sole stazioni di Signa o di Calenzano, si sono verificati 7 superamenti nel periodo caldo, mentre nelle altre stazioni del bacino i valori sono sostanzialmente bassi. In considerazione del fatto che i periodi critici dovrebbero riflettere una condizione comune a tutto il bacino, e anche delle caratteristiche delle stazioni di Signa e Calenzano (valori più alti delle stazioni di traffico), sono stati esclusi i giorni in cui i superamenti si verificano solo in queste due stazioni: in questo caso i giorni critici si riducono a 60.

Nella tabella 24 sono riportati i periodi critici e i valori di concentrazione rilevati nelle nove stazioni. Si può notare che nei mesi di gennaio, febbraio e marzo si sono verificati due episodi, interrotti solo da brevi intervalli, che vanno dal 12 gennaio al 4 febbraio, e dal 12 al 24 marzo. A dicembre si sono verificati 3 episodi, che hanno interessato quasi tutto il mese, dal 5 al 31. Nella seconda e terza decade di febbraio e nei mesi di ottobre e novembre gli episodi critici sono stati più sporadici.

Un primo riscontro della persistenza e delle condizioni meteorologiche alla scala sinottica può essere ottenuto dai report mensili dell'anno 2010, che confermano che durante i periodi individuati le condizioni meteorologiche erano favorevoli all'accumulo

degli inquinanti. I report sono disponibili sul sito del Consorzio Lamma:
<http://www.lamma.rete.toscana.it/clima-e-energia/climatologia/report-mensili-toscana> .

Tab.24 – Valori di correlazione tra le stazioni di monitoraggio di PM10.

data	FI-BASSI	FI-BOBOLI	FI-CALENZAI	FI-SIGNA	FI-SCANDICI	FI-CAMPI-BI	PO-ROMA	PT-MONTALI	PT-SIGNORE	Prec. Cumul.	VV-Peretola	VV-calmet	Hmix-calm
12/01/2010	47	41	77	81	67	61	55	NaN	59	0	0.9	1.0	133
13/01/2010	39	38	55	67	58	51	50	NaN	47	0	1.9	2.1	292
14/01/2010	36	35	51	52	70	42	29	NaN	29	0	1.4	1.4	252
17/01/2010	32	32	68	52	49	66	66	NaN	57	0.2	0.9	0.7	142
18/01/2010	42	37	59	60	56	54	32	NaN	42	0	1.0	1.3	195
19/01/2010	56	43	74	94	70	73	59	NaN	38	0	0.9	1.1	159
20/01/2010	101	82	131	127	109	106	NaN	NaN	75	0	1.0	0.8	134
21/01/2010	40	37	54	68	59	63	NaN	NaN	41	0	2.3	1.0	167
24/01/2010	66	63	94	93	NaN	89	55	NaN	56	0	0.8	1.9	336
25/01/2010	40	47	63	73	NaN	59	31	NaN	45	0	1.6	4.5	884
28/01/2010	48	43	69	77	NaN	59	37	NaN	44	0	0.9	1.6	208
29/01/2010	98	91	108	147	NaN	121	NaN	NaN	NaN	0.4	1.1	1.5	181
02/02/2010	53	43	50	80	NaN	53	51	NaN	48	0	1.3	1.4	171
03/02/2010	51	46	105	91	106	99	92	NaN	76	2	1.0	1.1	198
04/02/2010	46	40	78	114	81	91	102	NaN	NaN	0.2	1.7	1.2	251
09/02/2010	31	35	53	47	51	46	45	NaN	43	0	2.3	3.8	708
13/02/2010	52	46	70	58	57	61	54	NaN	59	0	1.5	1.2	265
15/02/2010	44	NaN	50	53	52	46	34	NaN	43	0	1.3	1.5	283
28/02/2010	47	50	62	66	63	66	55	NaN	65	0	1.7	1.6	263
12/03/2010	39	38	53	51	46	56	64	50	55	0.6	1.2	1.4	280
13/03/2010	49	38	50	52	50	50	47	54	50	0	1.5	2.3	421
14/03/2010	40	37	52	49	52	49	47	46	42	0	1.9	2.6	478
15/03/2010	46	44	54	52	52	61	48	46	42	0	1.8	1.3	312
16/03/2010	42	42	61	66	49	56	37	38	38	0	1.7	1.7	321
19/03/2010	38	32	46	62	47	41	54	48	38	0	1.3	1.3	354
20/03/2010	58	73	79	95	78	81	87	84	65	0	0.9	1.4	334
21/03/2010	45	48	67	68	97	90	116	71	55	0.4	1.3	0.8	314
22/03/2010	NaN	39	55	71	51	49	43	39	39	2.2	1.3	1.7	457
23/03/2010	NaN	50	48	45	42	46	41	37	36	0	1.8	2.3	589
24/03/2010	NaN	44	54	60	48	53	47	41	36	0	1.3	1.5	490
14/10/2010	40	47	54	60	60	48	42	48	49	0	1.8	1.5	328
15/10/2010	39	50	53	69	62	55	43	56	50	3.0	1.1	1.5	312
23/10/2010	42	47	65	57	56	59	58	58	41	0	1.1	1.0	251
29/10/2010	35	32	46	53	40	48	NaN	53	30	0	1.4	0.8	176
30/10/2010	48	51	79	92	73	72	76	84	68	0	0.9	1.4	216
06/11/2010	28	20	48	50	37	53	67	66	20	0.2	1.1	0.8	170
07/11/2010	26	27	55	37	32	43	50	50	11	18.2	1.2	1.9	263
13/11/2010	45	44	70	65	50	57	69	62	47	0	1.1	1.5	221
14/11/2010	48	39	72	56	55	60	68	80	65	0	0.8	1.3	189
15/11/2010	41	55	82	98	77	86	111	NaN	53	0	1.3	1.6	235
18/11/2010	21	24	50	45	48	53	48	52	36	21.6	0.9	1.6	214
20/11/2010	14	19	31	41	37	45	49	54	21	2.4	1.1	1.2	192
27/11/2010	22	23	36	67	37	46	41	53	32	0	0.9	1.7	267
05/12/2010	27	34	50	50	49	53	54	61	38	0	0.9	1.1	153
06/12/2010	48	49	87	63	67	71	71	75	37	6	0.9	1.4	151
07/12/2010	36	37	67	87	55	65	94	71	36	0	2.2	2.0	258
08/12/2010	20	23	38	45	31	42	46	50	36	3.2	1.9	1.8	215
11/12/2010	36	35	72	89	52	84	76	85	47	0	0.9	1.2	130
12/12/2010	53	60	86	70	89	76	78	93	45	0	1.3	1.0	174
17/12/2010	22	33	54	56	53	42	47	62	48	0	1.6	2.7	372
18/12/2010	41	47	85	69	61	95	79	137	62	3.8	0.8	1.3	232
19/12/2010	74	75	141	124	93	138	121	188	165	6.4	0.7	2.0	263
20/12/2010	82	71	116	132	96	172	127	167	97	9.9	0.9	1.1	130
21/12/2010	96	85	208	139	125	153	183	162	92	5.6	0.7	1.4	172
22/12/2010	19	20	50	80	62	67	92	80	NaN	9.9	2.8	2.5	364
23/12/2010	23	23	38	56	38	41	50	47	NaN	6.4	3.1	3.2	471
28/12/2010	36	35	62	55	42	55	NaN	54	32	0	1.1	0.8	120
29/12/2010	29	33	100	113	52	86	NaN	101	72	0	0.5	1.1	138
30/12/2010	23	38	81	67	53	79	NaN	86	57	0.4	0.8	2.3	328
31/12/2010	52	39	62	99	52	77	NaN	92	45	0	0.8	3.4	544

2.4.2 Gli indicatori meteorologici stimati da modello

In due precedenti studi, svolti nell'ambito del progetto PATOS (2, 3), sono stati analizzati i valori di concentrazione di PM10 sul territorio regionale toscano e le correlazioni con le principali variabili meteorologiche misurate da stazioni a terra per individuare indicatori meteo per l'accumulo degli inquinanti in atmosfera. In particolare, sono stati individuati alcuni valori-soglia, per due indicatori, la pioggia

cumulata su base giornaliera e per la velocità media giornaliera del vento. Le soglie proposte sono pari a 10 mm per la pioggia cumulata e 3 m/s per la velocità del vento. In tabella 24, accanto alla concentrazione di PM10 rilevata nelle stazioni di fondo nei periodi critici, sono riportati i valori relativi alla pioggia cumulata giornaliera presso la stazione di Sesto Fiorentino e la velocità media giornaliera del vento misurata nella stazione dell'Aeronautica Militare di Peretola. In corrispondenza di questo sito sono stati estratti i valori medi giornalieri di velocità del vento e di Hmix stimati dal modello.

Durante i periodi critici la pioggia è assente o ha valori molto bassi: fanno eccezione due giorni, il 7 e il 18 novembre, in cui la pioggia cumulata supera ampiamente il valore soglia di 10 mm. Il superamento della soglia di concentrazione di PM10, tuttavia, si verifica solo in tre stazioni, con valori appena superiori alla soglia: inoltre il giorno successivo non ci sono superamenti, in accordo con quanto evidenziato negli studi precedenti sull'effetto della pioggia sulle condizioni di accumulo del giorno successivo all'evento. Da notare che dal 18 al 23 dicembre si sono verificati eventi di pioggia, con valori cumulati inferiori alla soglia di 10 mm, che non hanno determinato un effetto di dilavamento dell'atmosfera.

Per quanto riguarda la velocità media del vento, nei periodi critici i valori sono sempre molto bassi, la soglia di 3 m/s viene superata solo in un caso, il 23 dicembre, in cui ci sono solo due superamenti, con valori di poco superiori a 50 µg/m³.

Osservando le variabili stimate da modello, VV e Hmix, si può notare anche in questo caso che i valori della velocità del vento sono bassi, in linea con i valori misurati, salvo in tre giorni, il 25 gennaio, il 9 febbraio e il 31 dicembre, in cui la velocità media stimata è molto maggiore rispetto alla corrispondente misura. Anche nel caso della variabile VV stimata sembra quindi plausibile adottare la stessa soglia proposta per la variabile misurata (3 m/s).

Anche Hmix è generalmente molto basso, salvo in corrispondenza dei tre giorni segnalati, in cui il vento simulato è molto alto. In particolare, nei periodi critici i valori di Hmix sono generalmente dell'ordine di 200 – 250 m o addirittura inferiori nei mesi di gennaio, febbraio, novembre e dicembre. Nel mese di marzo, in cui si è verificato un episodio critico piuttosto lungo, i valori di Hmix sono mediamente più alti, superiori a 300 m e in alcuni casi dell'ordine di 450-500 m. Questa differenza è attribuibile all'effetto della componente convettiva di Hmix, legata alla radiazione solare, che nel mese di marzo ha una rilevanza maggiore rispetto ai mesi compresi tra novembre e febbraio, come si può notare anche osservando il grafico della serie temporale di Hmix

in fig. 29 (sopra). In considerazione del fatto che Hmix presenta delle variazioni del valore medio anche su base mensile, resta difficile stabilire una soglia unica, seppure indicativa, per tutto il periodo in cui si possono verificare episodi critici per la concentrazione degli inquinanti. Infatti per i mesi in cui l'effetto della radiazione solare è minore (novembre-febbraio) si potrebbe individuare una soglia di 300 m, mentre per marzo tale soglia potrebbe salire anche a 400 m.

In sintesi, questa analisi ha confermato la correttezza delle conclusioni tratte dai precedenti studi, quindi della importanza determinante degli indicatori pioggia cumulata e velocità media giornaliera del vento. Questi due parametri sono generalmente correlabili alle condizioni meteo alla scala sinottica, in quanto le condizioni di stabilità atmosferica o le perturbazioni caratterizzate da forte vento e da pioggia persistente interessano generalmente un areale ampio.

A questi due indicatori può essere affiancato un terzo, rappresentato dalla stima del valore medio giornaliero di Hmix, che aggiunge informazione, dato che rappresenta un parametro strettamente legato alla diffusività atmosferica. Inoltre, questo parametro è anche legato all'orografia che a sua volta influenza la meteorologia alla scala locale, determinando differenze interne ad aree limitate, come, nel nostro caso, il bacino Firenze-Prato-Pistoia. Le informazioni ottenute dagli indicatori pioggia cumulata e velocità del vento (misurati o stimati da modelli) possono quindi essere integrate con le mappe della media giornaliera di Hmix (stimate da modello ad alta risoluzione).

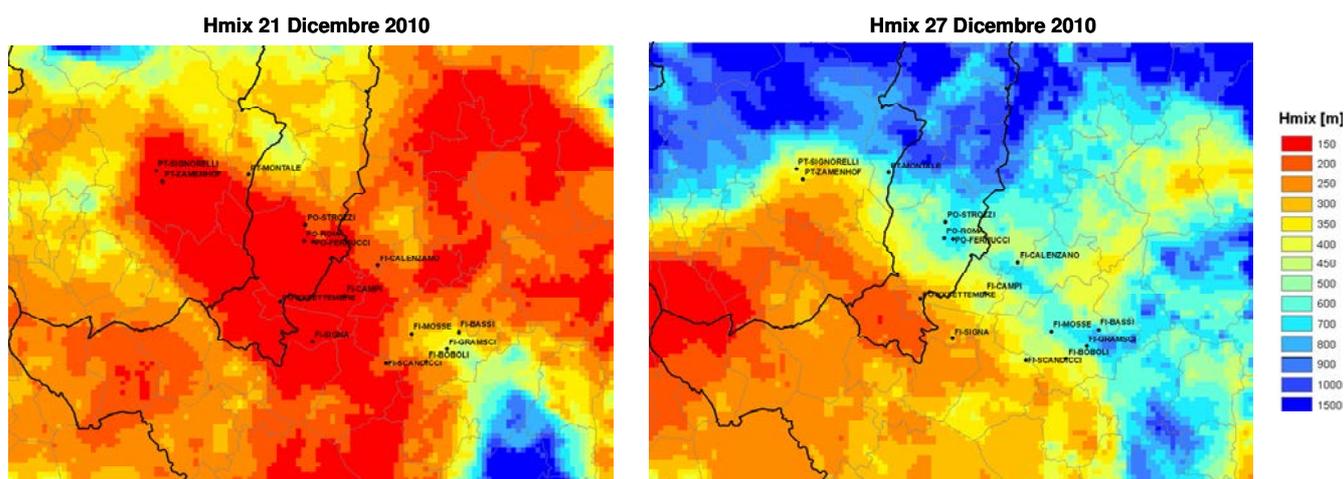


Fig.31 – Mappe del valore medio giornaliero di Hmix nei giorni 20 e 27 dicembre 2010.

A titolo di esempio sono riportate le mappe relative al giorno 21 dicembre 2010, caratterizzato da stabilità atmosferica e alti livelli di concentrazione di PM10, e al giorno 27 dicembre 2010, in cui un persistente vento di tramontana ha modificato le

condizioni meteo e ha aumentato sensibilmente la diffusività atmosferica. I valori di Hmix nel bacino, inferiore a 150 m il giorno 21 dicembre e tra 400 e 600 m il giorno 27 dicembre, evidenziano in modo significativo questo drastico cambiamento. Per completezza, sono riportate anche le corrispondenti mappe della velocità media giornaliera del vento, da cui si nota la calma di vento nella prima mappa e il vento intenso nella seconda.

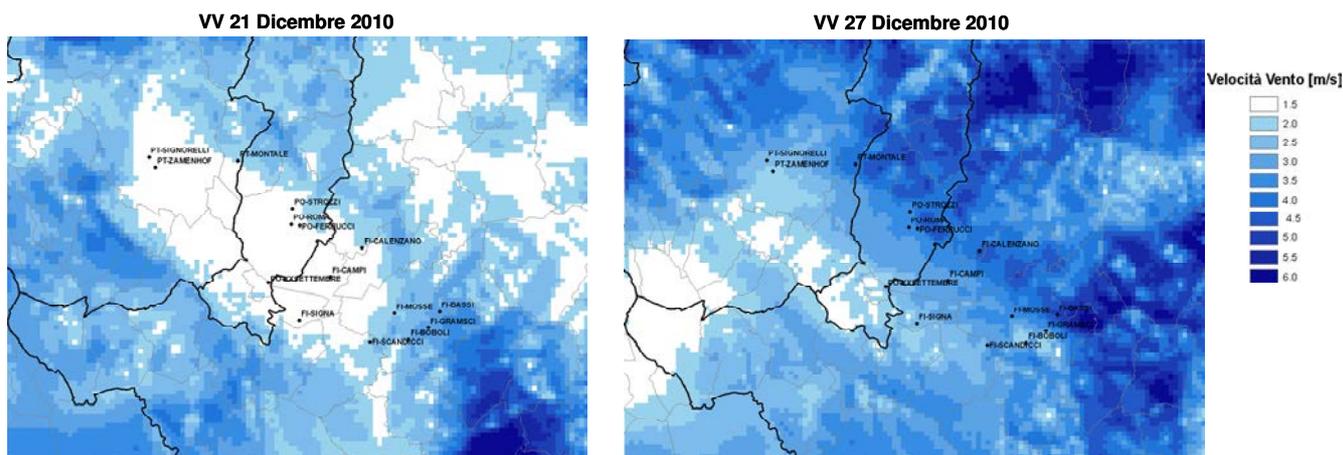


Fig.32 – Mappe del valore medio giornaliero di velocità del vento nei giorni 20 e 27 dicembre 2010.

Sulla base delle considerazioni fatte, sembra plausibile sfruttare le informazioni aggiuntive che si ottengono dalle mappe dei valori medi giornalieri di Hmix, ottenute da un modello ad alta risoluzione, per effettuare previsioni delle condizioni meteo favorevoli o meno l’accumulo di inquinanti in atmosfera.

In pratica, le informazioni ottenute dai modelli operativi per le previsioni (WRF a 12 Km e a 3 Km di risoluzione) relativi alle condizioni meteo sinottiche, possono essere integrate con informazioni aggiuntive ottenute dalle mappe dei valori medi giornalieri di Hmix. Queste informazioni, relative alla scala locale, si potrebbero ottenere implementando nella catena modellistica operativa il modello diagnostico CALMET, con una configurazione analoga a quella utilizzata per il presente studio, in cui il modello è stato inizializzato con le stime del modello WRF dell’Archivio Meteo del Consorzio LaMMA. Ovviamente, il passaggio alla modalità previsionale dovrebbe prevedere un periodo di messa a punto e di verifica delle prestazioni.

Questo tipo di previsione riguarderebbe comunque esclusivamente le condizioni meteorologiche favorevoli o meno all’accumulo degli inquinanti, e non direttamente la previsione della concentrazione di PM10 o dei superamenti della soglia di allarme, per cui le misure ottenute dalle centraline di monitoraggio rappresentative dell’area di

interesse risultano di importanza fondamentale, anche nell'ottica di attivare un servizio di previsione specifico per le criticità del periodo invernale.

Conclusioni

L'altezza dello strato di rimescolamento, H_{mix} , è un fattore determinante per l'accumulo degli inquinanti atmosferici nello strato più vicino al suolo. Si tratta di un parametro di difficile valutazione, che può venire stimato tramite misure indirette o attraverso algoritmi implementati in modelli numerici. In questo studio, che si sviluppa in due parti, è stato proposto un approccio modellistico.

Nella prima parte le stime di H_{mix} , ottenute da una catena di modelli meteorologici ad alta risoluzione (WRF-ARW/CALMET), sono state confrontate con i valori di concentrazione di radon, di PM10 e di PM2.5, effettuati dall'Università di Firenze nell'ambito di due campagne di misura (anni 2005-2006 e 2010), e con i parametri meteo misurati presso la sede del Consorzio LaMMA. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona corrispondenza tra stime e misure, sia a livello orario che su base giornaliera, da cui si deduce che la configurazione della catena di modelli implementata permette di stimare correttamente la variabile di interesse, H_{mix} .

Nella seconda parte del lavoro, le stime di H_{mix} , di vento e di temperatura, ottenute dalla catena di modelli applicata al bacino Firenze Prato Pistoia per l'anno 2010, sono state elaborate in modo da ottenere valori medi annuali e stagionali, oltre che valori medi giornalieri. Dopo una analisi finalizzata a determinare le correlazioni tra stime di H_{mix} e misure di PM10 nei siti di monitoraggio e ad individuare gli episodi critici verificati nel 2010, sono stati determinati gli indicatori relativi alle condizioni meteorologiche predisponenti l'accumulo di sostanze inquinanti.

In sintesi, questa analisi ha confermato la correttezza delle conclusioni tratte dai precedenti studi svolti nell'ambito del Progetto PATOS, quindi dell'importanza degli indicatori pioggia cumulata e velocità media giornaliera del vento, parametri correlabili alle condizioni meteo alla scala sinottica. A questi indicatori può essere affiancato un terzo, rappresentato dalla stima del valore medio giornaliero di H_{mix} , ottenuto da un modello ad altissima risoluzione, che quindi caratterizza la meteorologia alla scala locale.

In prospettiva, sembra plausibile sfruttare le informazioni aggiuntive che si ottengono dalle mappe dei valori medi giornalieri di H_{mix} per effettuare previsioni delle condizioni meteo favorevoli o meno l'accumulo di inquinanti in atmosfera. Per questo sarebbe necessario implementare nella catena modellistica operativa il modello diagnostico CALMET, con una configurazione analoga a quella utilizzata per il presente

studio, in cui il modello è stato inizializzato con le stime del modello WRF dell'Archivio Meteo del Consorzio LaMMA.

Tuttavia, anche nell'ottica di attivare un servizio di previsione specifico per le criticità del periodo invernale, va sottolineato il ruolo fondamentale delle misure della concentrazione di PM10 ottenute dalle centraline di monitoraggio della Rete Regionale, in quanto la previsione riguarderebbe esclusivamente le condizioni meteorologiche predisponenti, e non direttamente la previsione della concentrazione di PM10 o dei superamenti della soglia di allarme.

Ringraziamenti

Per la realizzazione di questo studio si ringraziano i gruppi di ricerca di Chimica (prof. Roberto Udisti) e di Fisica (prof. Franco Lucarelli) dell'Università di Firenze, che hanno collaborato al presente studio nella fase di confronto tra le stime modellistiche e le misure di radon e di PM10-PM2.5, ottenuti in due distinte campagne di misura, nel 2005-2006 e nel 2010.

Inoltre ringraziamo la d.ssa Bianca Patrizia Andreini, Responsabile del Centro Regionale Tutela Qualità dell'ARIA di ARPAT, per la fornitura delle misure di PM10 registrate nelle stazioni di monitoraggio presenti nel bacino Firenze Prato Pistoia.

Bibliografia

1. Allegrini, I., Febo, A., Pasini, A., Schiarini, S., 1994. Monitoring of the nocturnal mixed layer by means of particulate radon progeny measurement. *Journal of Geophysical Research* 99 (D9), 18,765e18,777.
2. Busillo C., Calastrini F., Gualtieri G. (2005): Studio finalizzato all'individuazione dei parametri meteorologici in grado di influenzare in modo significativo i livelli di concentrazione di PM10 – Progetto "PATOS", 30 Luglio 2005.
3. Busillo C., Calastrini F., Gualtieri G. (2007): Studio finalizzato all'individuazione dei parametri meteorologici in grado di influenzare in modo significativo i livelli di concentrazione di PM10 Analisi dati relativi al periodo 01/10/2005 – 30/09/2006, 16 aprile 2007
4. COST 710, 1998. COST Action 710-Final report, 1998. Mixing height determination. In: Fisher, B., et al. (Eds.), *Harmonisation of the Pre-Processing of Meteorological Data for Atmospheric Dispersion Models*. EUR 18195 EN, pp. 12–14. 71–81.
5. COST 715 WG2, 2005. COST Action 715 final report of WG2. 2005. Data validation of mixing height. In: Piringer, M., Joffre, S. (Eds.), *The Urban Surface Energy Budget and Mixing Height in European Cities*. Demetra Ltd Publ., pp. 88–90. 184–186. Evans, R.D., 1955. *The Atomic Nucleus*. McGraw-Hill, New York.
6. COST 715, 2005. COST Action 715-final report, 2005. The mixing height and inversions in urban areas. In: Fisher, B., et al. (Eds.), *Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems*. Demetra Ltd Publishers, pp. 71–98.
7. Marcazzan, G.M., Caprioli, E., Valli, G., Vecchi, R., 2003. Temporal variation of ²¹²Pb concentration in outdoor air of Milan and a comparison with ²¹⁴Bi. *J. Environ. Radioact.* 65, 77–90.
8. NCAR TECHNICAL NOTE, (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version3 <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
9. Porstendo, J., Butterweck, G., Reineking, A., 1994. Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters. *Health Physics* 67 (3), 283e287.
10. Porstendo, J., Roßbig, G., Ahmed, A., 1979. Experimental determination of the attachment coefficients of atoms and ions on monodisperse aerosols. *Journal of Aerosol Science* 10, 21.
11. Porstendo, J., Zock, Ch., Reineking, A., 2000. Aerosol size distribution of the radon progeny in outdoor air. *Journal of Environmental Radioactivity* 51, 37e48.
12. Scire J.S., Robe F.R., Ferman M.E., Yamartino R.J. (1999): *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (version 5.0)* – Earth Tech Inc., Concord, MA, USA, Settembre 1999.

13. Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S.-E., Joffre, S., Rasmussen, A., Tercier, P., 1999 Review and intercomparison of operational methods for determination of the mixing height. *Atmos. Environ.* 34, 1001–1027.
14. Sesana, L., Caprioli, E., Marcazzan, G.M., 2003. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental radioactivity* 65, 147e160.
15. Stull R., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Springer. ISBN: 9027727686.
16. Veleva, B., et al., Variation of short-lived beta radionuclide (radon progeny) concentrations and the mixing processes in the atmospheric boundary layer, *J. Environ. Radioact.* (2009), doi:10.1016/j.jenvrad.2009.08.008.
17. Busillo C., Calastrini F., Gualtieri G., Gozzini G., Mari R. (2008): WIND-GIS - Progetto per la realizzazione di un servizio web per la valutazione del potenziale eolico della regione Toscana, report finale, 16 dicembre 2008.
18. Mari R., Bottai L., Busillo C., Calastrini F., Gozzini G., Gualtieri G., A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy), *Renewable Energy* vol 36 (2011) 754-763 - Copyright © 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved ISSN: 0960-1481.