



RELAZIONE
TECNICA

Agosto 2018



**Valutazione modellistica dello stato della Qualità dell'Aria
nelle province di Bari e Barletta-Andria-Trani**

Anno 2016

**Centro Regionale Aria (CRA) - Sub-struttura Modellistica
diffusionale**

Sommario

1. Introduzione.....	4
2. Sistema modellistico e definizione dei domini di calcolo	5
3. Valutazione delle performance della simulazione modellistica annuale 2016.....	6
4. Assimilazione delle misure sperimentali nella valutazione modellistica	17
5. Valutazione dello stato della Qualità dell’Aria sulle province Bari e BAT – Anno 2016	18
5.1 Biossido di azoto (NO ₂)	20
5.2 Biossido di zolfo (SO ₂)	22
5.3 Particolato Fine - PM ₁₀	23
5.4 Particolato Fine – PM _{2.5}	26
5.5 Ozono (O ₃)	27
5.6 Monossido di carbonio (CO)	28
5.7 Benzene(C ₆ H ₆).....	28
5.8 Benzo(a)pirene (B(a)P)	30
5.9 Arsenico (As).....	31
5.10 Cadmio (Cd)	32
5.11 Nichel (Ni)	33
5.11 Piombo (Pb)	34
Conclusioni	35

1. Introduzione

Il D.Lgs 155/2010 pone la valutazione della qualità dell'aria ambiente come premessa conoscitiva indispensabile per la gestione delle relative criticità e la conseguente pianificazione delle politiche di intervento. Tale valutazione può essere condotta con i modelli di dispersione della qualità dell'aria, in grado sia di valutare la qualità dell'aria in zone del territorio dove non sono presenti siti di monitoraggio, che di integrare le informazioni puntuali fornite dalle misure delle centraline di monitoraggio.

Nel corso del triennio 2015-2017 ARPA Puglia si è dotata di un sistema modellistico in grado di ricostruire sull'intero territorio regionale, con focus su eventuali sottodomini di interesse, le concentrazioni di inquinanti gassosi e di particolato in modalità sia retrospettiva che predittiva¹. Tale sistema è inoltre in grado di assimilare le misure fornite dalla rete di monitoraggio della qualità dell'aria gestite da ARPA Puglia.

Il sistema modellistico si basa sull'applicazione dei modelli euleriani di chimica e trasporto, che, come indicato nella Appendice III del D.Lgs155/2010, rappresentano gli strumenti più idonei a trattare il contesto pugliese, caratterizzato da una elevata complessità meteorologica ed emissiva. Il sistema di ARPA Puglia è attualmente installato ed implementato sul *datacenter* di calcolo ReCaS, realizzato dall'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" e dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Obiettivo della presente relazione è mostrare i risultati delle simulazioni condotte da ARPA Puglia con il suddetto sistema, utili a valutare, ai sensi del D.Lgs 155/2010, lo stato della qualità dell'aria, riferito all'anno 2016, delle province di Bari e Barletta–Andria-Trani ad una risoluzione spaziale di 1km. A tale risoluzione, infatti, è possibile caratterizzare con maggiore dettaglio i livelli di concentrazione e la relativa distribuzione spaziale degli inquinanti normati, con particolare riferimento all'identificazione delle aree di superamento di estensione superiore ad 1km².

Si precisa, inoltre, che i campi di concentrazione, simulati con il modello fotochimico, sono stati successivamente combinati/integrati con le misure effettuate nel 2016 dalle reti di monitoraggio di ARPA Puglia, al fine di ottenere una migliore e più realistica rappresentazione dello stato della qualità dell'aria sul territorio sia in termini di entità dei livelli di concentrazione che di distribuzione spaziale.

La relazione è così organizzata.

Dopo una descrizione del sistema modellistico e dei relativi input si fornirà:

- a) la valutazione statistica della performance dei risultati della simulazione sulle province Bari e BAT ad 1km con il solo modello fotochimico, condotta mediante l'utilizzo del software DELTA Tool;
- b) la valutazione dello stato della QA relativa al 2016, ai sensi del D.Lgs 155/2010, ottenuta combinando i campi di concentrazione, simulati sulle province Bari e BAT, con le misure delle centraline. In particolare, per i diversi inquinanti normati dal D.Lgs 155/2010, si mostreranno le mappe dei relativi indicatori prescritti rispetto ai limiti previsti per la protezione della salute umana, evidenziando i superamenti laddove presenti.

¹ Il servizio di previsione ed analisi dello stato della qualità dell'aria sulla Puglia e sull'area di Taranto, reso operativo da Arpa Puglia nel corso del 2016, è stato attivato ai sensi degli art.14 e art.18 del D.Lgs 155/2010. Sul sito <http://cloud.arpa.puglia.it/previsioniqualitadellaria/index.html> sono disponibili giornalmente le previsioni a +72 ore dello stato della QA (con risoluzione spaziale rispettivamente di 4 km sulla Puglia e di 1 km sull'area di Taranto) e la ricostruzione (detta analisi) dello stato della QA relativa al giorno precedente (ieri), ottenuta mediante assimilazione dei dati misurati.

2. Sistema modellistico e definizione dei domini di calcolo

Al fine di ricostruire le concentrazioni di tutti gli inquinanti normati su base oraria per l'intero anno 2016 sulle province di Bari e di Barletta, Andria e Trani ad 1km di risoluzione spaziale, è stata condotta una simulazione con il modello euleriano tridimensionale di trasporto e chimica dell'atmosfera FARM (Flexible Air quality Regional Model). Il sistema modellistico è stato configurato in modo del tutto analogo a quanto già predisposto per la valutazione modellistica dello stato della qualità dell'aria sulla regione Puglia con focus sul Salento per l'anno 2016, alla cui relazione² si rimanda per i relativi dettagli inerenti la scelta degli schemi chimici, la descrizione della componente meteorologica e degli input emissivi.

Il sistema modellistico FARM è stato, quindi, applicato simultaneamente su un dominio comprendente la regione Puglia, con risoluzione spaziale pari a 4 km, e su un dominio, innestato nel precedente, comprendente le province di Bari e Barletta – Andria - Trani con risoluzione pari ad 1km (Figura 1).

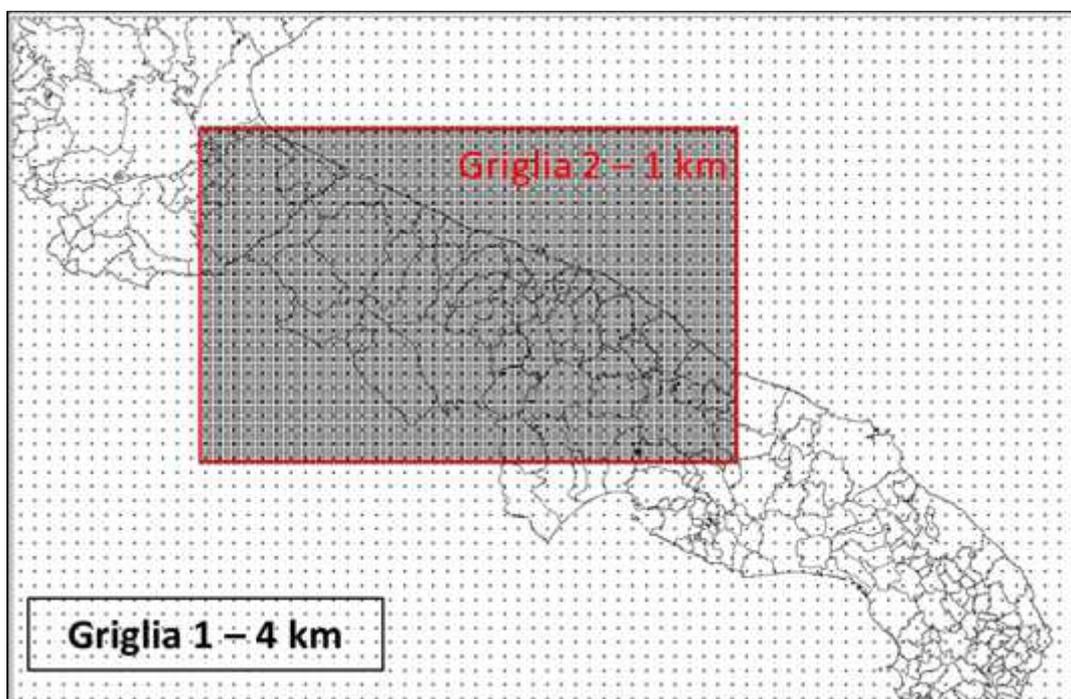


Figura 1 - Domini di calcolo del sistema modellistico

La discesa di scala è effettuata tramite la tecnica *two way nesting*, che consente di simulare le dinamiche di dispersione, trasporto e trasformazione degli inquinanti nel dominio a risoluzione migliore, tenendo conto sia degli effetti delle sorgenti emissive esterne e dei processi dominati dalle scale spaziali più grandi di quella urbana (come lo smog fotochimico), sia dei fenomeni locali di accumulo. Nella tabella successiva si riportano le caratteristiche spaziali dei due domini.

Tabella 1 - Caratteristiche spaziali dei domini di simulazione

Dominio	Denominazione	Estensione	Risoluzione spaziale
Griglia 1	Regione Puglia	316 x 248 km ²	4km x 4km
Griglia 2	Bari-BAT	152 x 96 km ²	1km x 1km

² Documento disponibile al link <http://www.arpa.puglia.it/web/guest/modellistica>

L'estensione verticale dei due domini è pari a 9050 m, con i seguenti 16 livelli di calcolo espressi in metri sopra l'orografia:

10, 35, 70, 120, 195, 305, 465, 695, 1025, 1505, 2200, 3205, 4550, 6050, 7550, 9050.

3. Valutazione delle performance della simulazione modellistica annuale 2016

Al fine di valutare il grado di accuratezza delle simulazioni modellistiche, di seguito si mostrano i risultati della valutazione della performance del modello, condotta con il DELTA TOOL³, un software di analisi statistica realizzato dal JRC (European Commission Joint Research Centre) nell'ambito del FAIRMODE (Forum for air quality modelling in Europe). Il DELTA TOOL definisce un criterio di performance del modello (MQO) quale livello minimo di qualità che deve essere raggiunto dal modello per *policy use*. Tale criterio di performance è attivato per O₃, NO₂, PM_{2.5} e PM₁₀ rispettivamente per gli indicatori: massima concentrazione media mobile giornaliera su 8 ore, concentrazione oraria e concentrazione media giornaliera. Per l'O₃ il criterio di performance viene valutato anche limitatamente al solo periodo estivo.

Partendo dall'assunzione che il modello ha una buona performance quando ha un grado di incertezza confrontabile con quello delle corrispondenti misure, nel DELTA TOOL l'obiettivo di qualità del modello (MQO) si raggiunge se l'indicatore di qualità del modello (MQI), definito come:

$$MQI = \frac{1}{\beta} \frac{RMSE}{RMS_U} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}}{\beta RMS_U} \quad (1)$$

risulta ≤ 1 per almeno il 90% delle stazioni disponibili.

Questi indicatori di qualità sono calcolati paragonando i risultati del modello e i dati misurati in corrispondenza delle centraline di monitoraggio⁴.

Per una data centralina, RMSE è la radice dell'errore quadratico medio tra i dati osservati O_i e i dati modellati M_i, su una serie temporale, estratti in corrispondenza della centralina, pari a:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}, \quad (2)$$

RMS_U è l'incertezza delle misure, definita come:

$$RMS_U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{95}(O_i))^2} = U_{95,r}^{RV} \sqrt{(1 - \alpha^2)(\bar{O}^2 + \sigma_o^2) + \alpha^2 RV^2}. \quad (3)^5$$

³ Tale software è ampiamente utilizzato dalla comunità scientifica e dalle ARPA ed è considerato uno strumento di validazione di riferimento per applicazioni modellistiche specifiche, condotte ai sensi del D. Lgs 155/2010.

⁴ Affinché per una data centralina sia calcolato il corrispondente MQI è necessaria una disponibilità di misure maggiore o uguale al 75% nel periodo in esame.

⁵ Nel calcolo dell'RMS_U, \bar{O} è la media della serie temporale delle misure e σ_o è la deviazione standard delle misure. Il coefficiente $U_{95,r}^{RV}$ rappresenta l'incertezza relativa delle misure, stimata attorno al valore limite di riferimento (pari a 200 µg/m³ nel caso di NO₂), mentre α^2 è un parametro specifico per ogni inquinante, legato all'incertezza della misura

Nell'MQI gli errori associati al bias, alla deviazione standard dei dati modellati σ_M , e alla correlazione R , sono condensati in un singolo numero e sono collegati mediante la seguente relazione:

$$MQI^2 = \frac{RMSE^2}{(\beta RMS_U)^2} = \frac{BIAS^2}{(\beta RMS_U)^2} + \frac{(\sigma_M - \sigma_O)^2}{(\beta RMS_U)^2} + \frac{2\sigma_M\sigma_O(1-R)}{(\beta RMS_U)^2} \quad (4).$$

Come indicato nell'Appendice III del D. Lgs 155/2010, l'MQO deve essere soddisfatto per almeno il 90% delle stazioni disponibili.

L'MQO è quindi espresso come

$$MQI_{90\%perc} \leq 1.$$

Il DELTA TOOL consente di visualizzare l'MQO su un diagramma specifico, denominato target plot, i cui assi X e Y rappresentano rispettivamente il CRMSE (*centered root mean square error*, somma del secondo e terzo termine a destra dell'equazione 4) ed il bias (primo termine a destra dell'equazione 4), normalizzati rispetto all'incertezza delle osservazioni RMS_U . Per una data centralina il relativo MQI corrisponderà alla distanza tra il punto sul target plot rappresentante la centralina (la cui ascissa è $CRMSE/\beta RMS_U$ e ordinata è $BIAS/RMS_U$) e l'origine. L'area colorata in verde identifica il soddisfacimento del criterio di performance per ciascuna centralina. L' $MQI_{90\%perc}$ è indicato in alto a sinistra del diagramma.

Nello scatter plot si confrontano per ogni centralina le concentrazioni medie annuali modellate e misurate. Nel caso delle medie annuali l'indicatore di qualità del modello, MQI, diventa⁶ pari al rapporto tra il bias (tra le concentrazioni medie annue modellate e misurate) e l'incertezza sulla media misurata, secondo la relazione:

$$MQI = \frac{|\bar{O} - \bar{M}|}{\beta RMS_U} \leq 1 \quad (5).$$

Come per la (1), valida sulle serie temporali, anche nel caso della media annuale l'MQO è soddisfatto se $MQI \leq 1$ per almeno il 90% delle centraline.

Sempre relativamente alla valutazione della capacità del modello di riprodurre i dati misurati, il DELTA TOOL può stimare, per ogni centralina, ciascuno degli indicatori riportati nell'equazione (4), per i quali deve essere soddisfatto un corrispondente criterio di performance. Infatti, a partire dall'equazione (4), ipotizzando casi ideali in cui, a coppie, due di questi indicatori risultino perfetti (p.e. $R=1$ e $\sigma_M=\sigma_O$), possono essere ricavati criteri di performance (MPC) per ognuno di essi (Tabella 2). Il vantaggio di questo approccio è che mentre l'MQI, basato sul RMSE, fornisce una panoramica generale sulla performance del modello, gli indicatori relativi al bias, alla deviazione standard e alla correlazione possono essere utilizzati per mettere in evidenza quali aspetti migliorare al fine di incrementare la performance del modello.

Nella stessa tabella è indicato l' MPI_{perc} , utile a valutare la capacità del modello di riprodurre eventi estremi (quali, per es., i superamenti su base oraria previsti per NO_2). Nella formula M_{perc} ed O_{perc} rappresentano i percentili delle serie orarie o medie giornaliere delle concentrazioni, rispettivamente modellate e misurate a seconda delle specie considerate, mentre il denominatore è funzione dell'incertezza della misura legata al valore O_{perc} .

attorno al valore limite RV. I valori numerici di tali grandezze, definite nei lavori di Pernigotti et al. (2013) e Thunis et al. (2012), sono stati determinati nel caso dell' NO_2 sui dataset EU AIRBASE, disponibili per diversi anni meteorologici.

⁶ Per le medie annuali il parametro CRMSE dell'equazione (4) è pari a 0.

Tabella 2: Indicatori di performance e criteri per ciascun indicatore per statistiche temporali.

Indicatori di performance	Criteri di performance
$BIAS (R = 1, \sigma_O = \sigma_M)$	$\frac{ BIAS }{\beta RMS_U} \leq 1$
$R (BIAS = 0, \sigma_O = \sigma_M)$	$\frac{2\sigma_O\sigma_M(1-R)}{(\beta RMS_U)^2} \leq 1$
$Std. dev. (BIAS = 0, R = 1)$	$\frac{ \sigma_O - \sigma_M }{\beta RMS_U} \leq 1$
$MPI_{perc} = \frac{ M_{perc} - O_{perc} }{\beta U_{95}(O_{95})}$	$MPI_{perc} \leq 1$

Il DELTA TOOL mostra il valore di tutti questi indicatori, calcolati per ogni centralina, evidenziando se per ognuno di essi è soddisfatto il corrispondente criterio, in un particolare grafico denominato *summary plot*. All'interno del *summary plot*, si precisa che:

- ✓ le righe 1 e 2 forniscono le medie annuali osservate e il numero di superamenti del valore limite per ciascuna stazione⁷.
- ✓ le righe 3-6 forniscono una panoramica sulla statistica, calcolata sulle serie temporali orarie modellate e misurate, in termini di bias, correlazione e deviazione standard per ciascuna stazione, oltre che una informazione sull'abilità del modello nel catturare il range più alto dei valori di concentrazione (H_{perc}). L'area verde rappresenta il raggiungimento del criterio, mentre l'area arancione per i primi tre indicatori rappresenta il soddisfacimento del criterio, ma con un errore associato al rispettivo indicatore.
- ✓ le righe 7-8 forniscono la statistica spaziale espressa in termini di correlazione spaziale e di deviazione standard. I suddetti indicatori vengono calcolati sulle concentrazioni annuali, modellate e misurate, normalizzate rispetto all'incertezza sul dato medio osservato⁸. Per tali indicatori vengono definiti specifici criteri di accettabilità, ovvero: $\frac{|\sigma_O - \sigma_M|}{\beta RMS_U} \leq 1$ per la deviazione standard e $R \geq 1 - 0.5\beta^2 \frac{RMS_U^2}{\sigma_O \sigma_M}$ per la correlazione. I colori vengono assegnati in modo analogo a quanto indicato per le righe 3-5.

Infine per tutti gli indicatori la seconda colonna del *summary plot*, che riporta un cerchio colorato (verde o rosso), fornisce l'informazione sulla percentuale di stazioni che soddisfano il corrispondente criterio di performance: il cerchio sarà verde se più del 90% di centraline soddisfa il criterio, mentre sarà rosso se il numero di centraline è minore del 90%.

⁷ Per l'NO₂ ad esempio è il valore massimo orario di 200 µg/m³

⁸ $RMS_{\bar{U}} = \sqrt{\frac{\sum U(\bar{O})^2}{N}}$

La figura 2 mostra lo scatter plot (relativo alle medie annue) e il target plot per l'NO₂ (valutato sulle serie delle concentrazioni orarie), elaborati dal DELTA TOOL confrontando⁹ le concentrazioni misurate e modellate in corrispondenza delle centraline, che misurano i livelli di NO₂ nelle province Bari e BAT. Ogni punto dello scatter plot e del target plot rappresenta una centralina di monitoraggio. Nello scatter plot le linee esterne e continue corrispondono ad un valore di MQI (definito nell'equazione 5) pari ad 1, mentre le linee interne tratteggiate ad un valore pari a 0.5. Per una data centralina la distanza del corrispondente punto sullo scatter plot dalla bisettrice rappresenta il valore dell'MQI associato alla stessa centralina. In particolare l'appartenenza di una centralina alla zona verde o arancione indica il soddisfacimento del criterio relativo all'MQI fornito dalla equazione (5). Come per il target plot, anche per lo scatter plot l'MQO è soddisfatto se almeno il 90% delle centraline cade nelle aree arancioni e/o verdi.

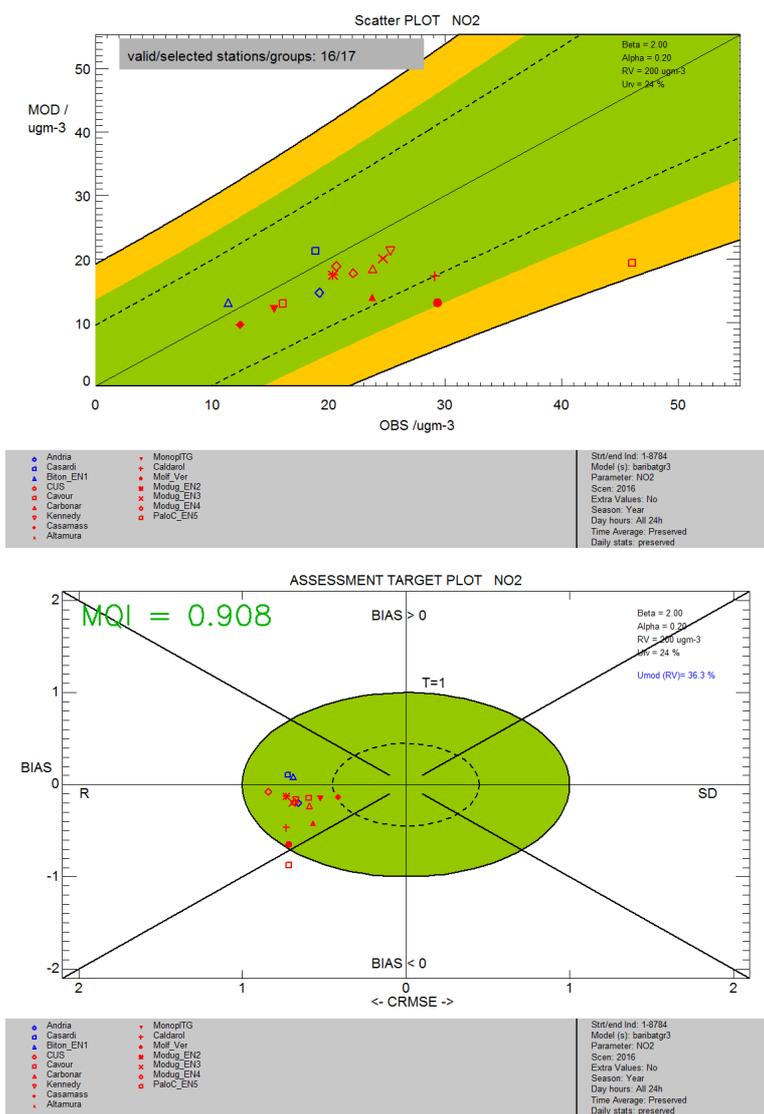


Figura 2 - Scatter plot (in alto) e target plot (in basso) prodotto dal Delta Tool per NO₂ sul dominio comprendente le province Bari e Bat.

Dallo scatter plot è evidente che il modello soddisfa il criterio dell'MQI annuale in corrispondenza di tutte le centraline, nelle quali si monitora l'NO₂. Il modello tende a sottostimare in particolare le

⁹ Tale confronto ha riguardato un numero di centraline pari in particolare a 16, perché per tali centraline il dataset misurato aveva più del 75% dei dati validi.

concentrazioni misurate presso le postazioni da traffico “Via Cavour” e “Molfetta-Verdi”. Ciò può essere dovuto ad una rappresentazione non adeguata delle emissioni locali (ad es. traffico di prossimità), oltre al fatto che il modello fotochimico elabora le concentrazioni su celle di dimensioni 1kmx1km, sulle quali vengono distribuite le emissioni da traffico. Analogamente il target plot mostra che l’MQI associato al 90° percentile delle stazioni (indicato in alto a sinistra del diagramma) risulta minore di 1, soddisfacendo quindi l’obiettivo di qualità (MQO). L’unica centralina che non soddisfa il criterio dell’MQI per le serie temporali orarie (e pertanto si trova all’esterno dell’area verde del target plot) è la centralina “Via Cavour” per le ragioni già indicate.

Il *summary plot* (Figura 3) prodotto per l’NO₂ mostra, infine, il soddisfacimento di tutti i criteri di performance previsti dal DELTA TOOL in corrispondenza di tutte le centraline.

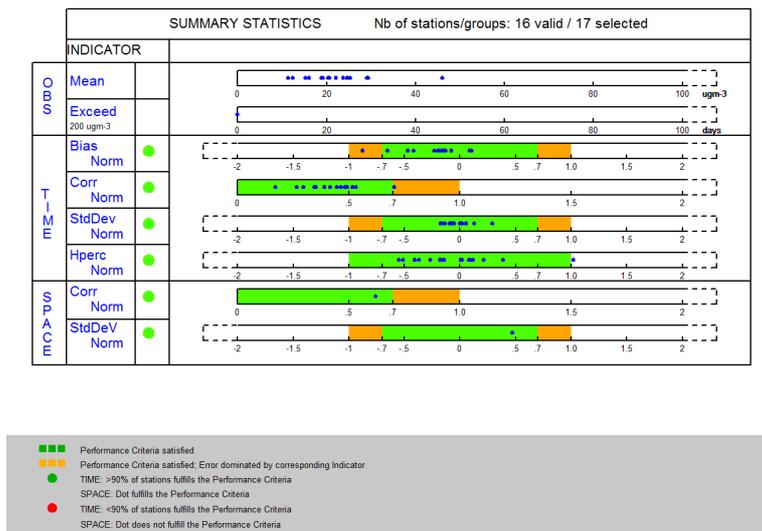
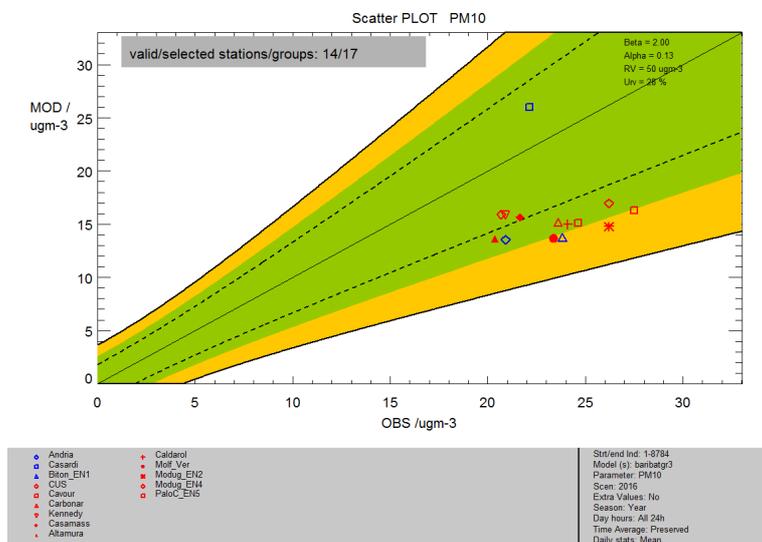


Figura 3 – Summary plot prodotto dal Delta Tool per NO₂ sul dominio comprendente le province Bari e Bat.

La figura 4 mostra lo scatter plot (relativo alle medie annue) e il target plot per il PM₁₀ (valutato sulle serie delle medie giornaliere), elaborati dal DELTA TOOL confrontando le concentrazioni, misurate e modellate, in corrispondenza delle centraline che misurano i livelli di PM₁₀ nelle province Bari e BAT.



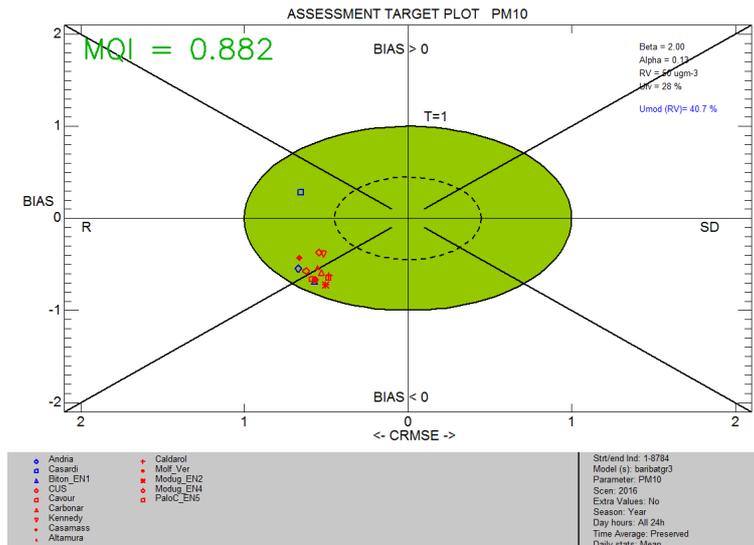


Figura 4 - Scatter plot (in alto) e target plot (in basso) prodotto dal Delta Tool per PM₁₀ sul dominio comprendente le province Bari e Bat.

Dallo scatter plot è evidente che il modello soddisfa il criterio dell'MQI annuale in corrispondenza di tutte le centraline, pur rivelando una tendenza a sottostimare i livelli di concentrazione di PM₁₀. Analogamente il target plot mostra che l'MQI associato al 90° percentile delle stazioni (indicato in alto a sinistra del diagramma) risulta minore di 1, soddisfacendo quindi l'obiettivo di qualità (MQO). Il *summary plot* (Figura 5) prodotto per il PM₁₀ mostra infine il soddisfacimento di tutti i criteri di performance previsti dal DELTA TOOL in corrispondenza di tutte le centraline.

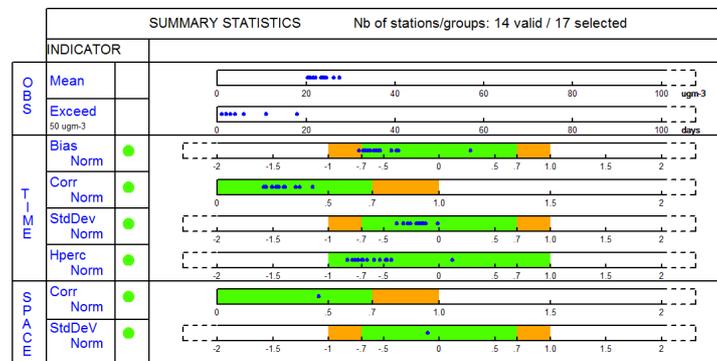


Figura 5 – Summary plot prodotto dal Delta Tool per PM₁₀ sul dominio comprendente le province Bari e Bat.

La figura 6 mostra lo scatter plot (relativo alle medie annue) e il target plot per il PM_{2.5} (valutato sulle serie delle medie giornaliere), elaborati dal DELTA TOOL confrontando le concentrazioni misurate e modellate in corrispondenza delle centraline che misurano i livelli di PM_{2.5} nelle province Bari e BAT.

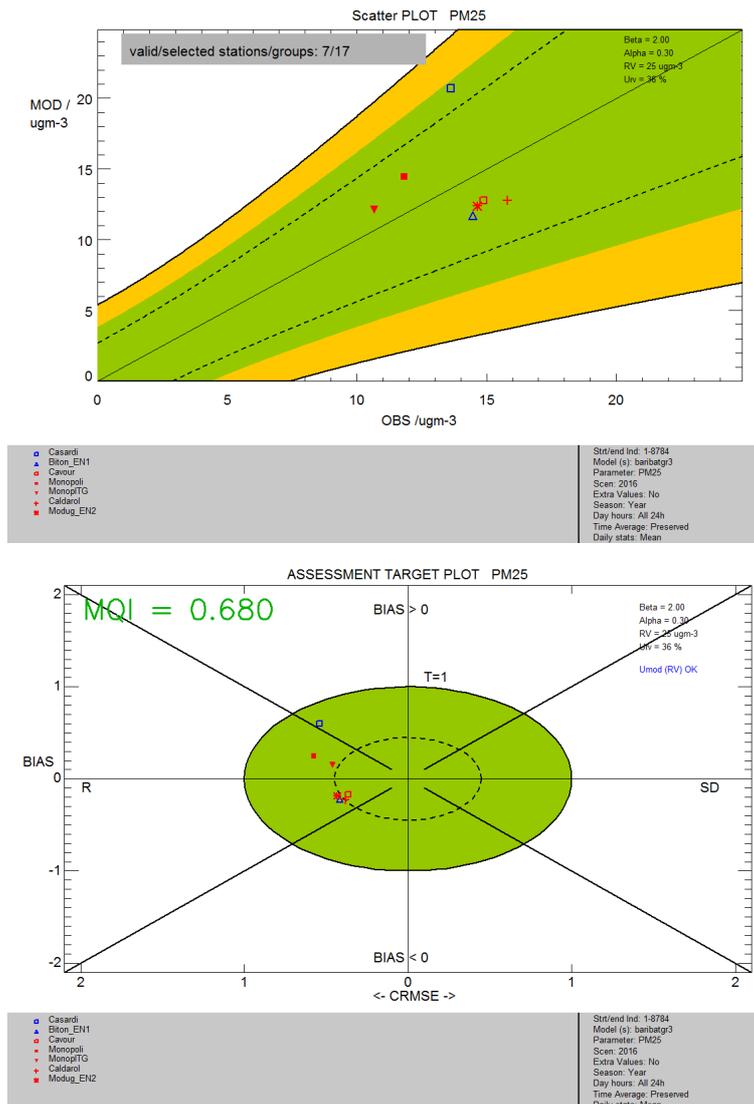


Figura 6 - Scatter plot (in alto) e target plot (in basso) prodotto dal Delta Tool per PM_{2.5} sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

Dallo scatter plot è evidente che il modello soddisfa il criterio dell'MQI annuale in corrispondenza di tutte le centraline. Analogamente il target plot mostra che l'MQI associato al 90° percentile delle stazioni (indicato in alto a sinistra del diagramma) risulta minore di 1, soddisfacendo quindi l'obiettivo di qualità (MQO).

Per quanto riguarda l'ozono le Figure 7 e 8 mostrano lo scatter plot e il target plot elaborato dal DELTA TOOL riferito alla massima concentrazione media mobile giornaliera su 8 ore relativamente sia al periodo annuale che al solo periodo estivo. I grafici elaborati sia sull'anno che sul solo periodo estivo evidenziano come il modello soddisfi il criterio di performance MQO.

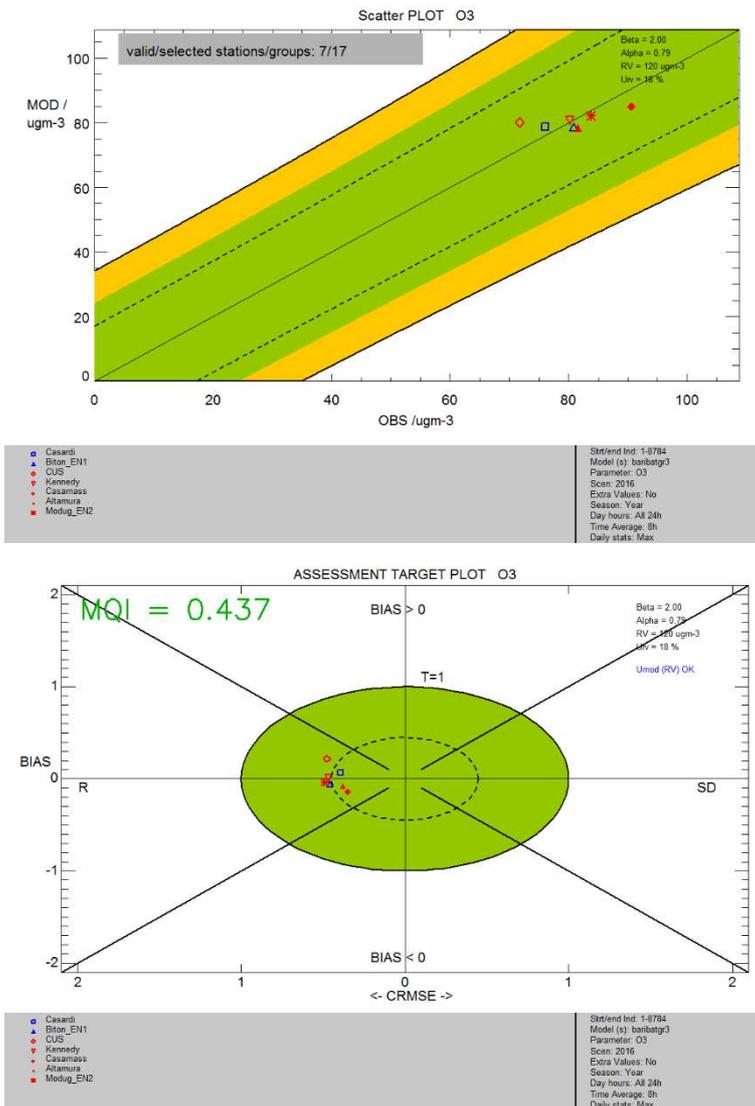
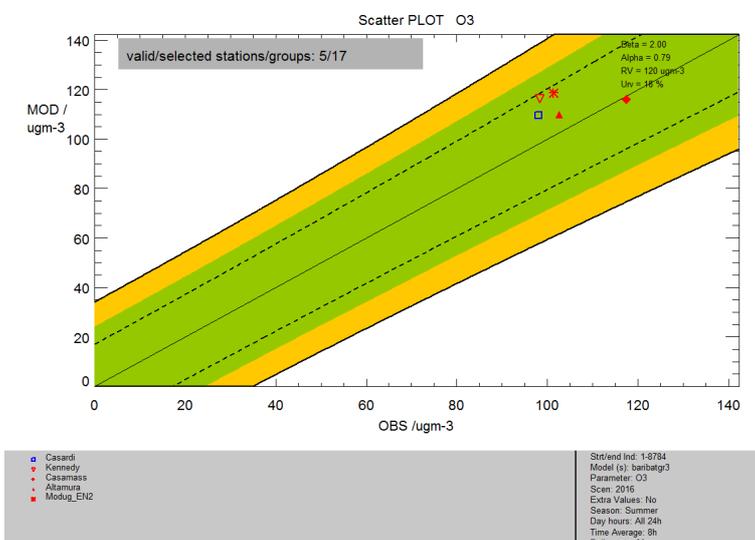


Figura 7 - Scatter plot (in alto) e target plot (in basso) annuale prodotto dal Delta Tool per O₃ sul dominio comprendente le province Bari e BAT



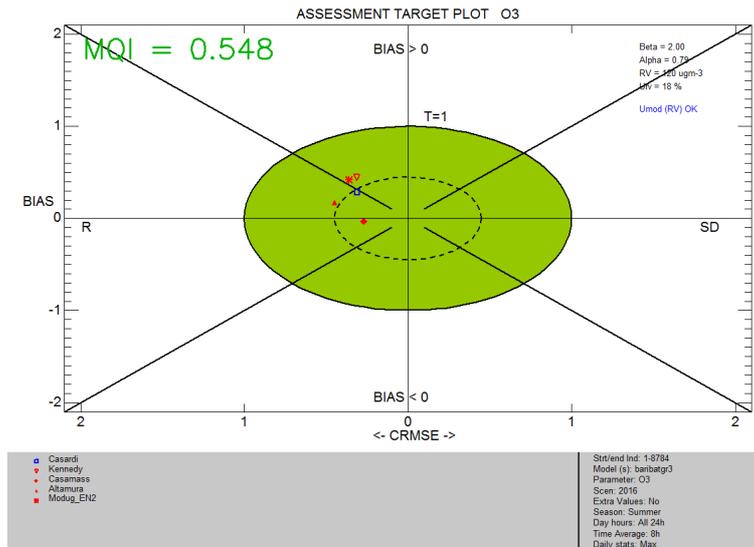
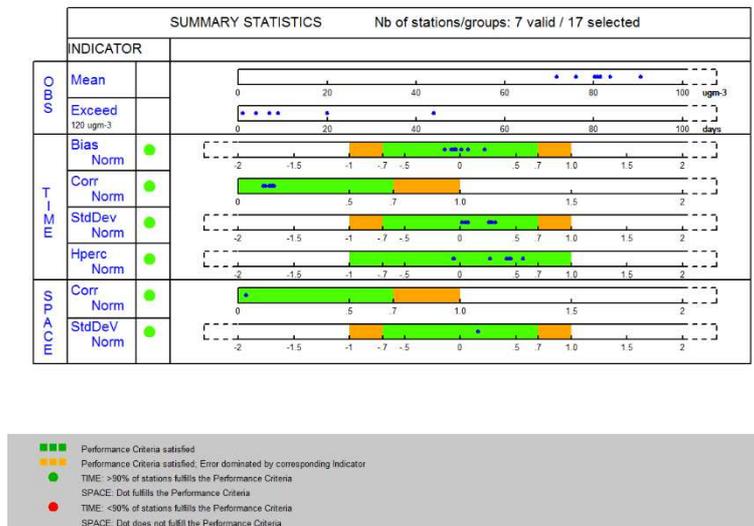


Figura 8 - Scatter plot (in alto) e target plot (in basso) estivo prodotto dal Delta Tool per O₃ sul dominio comprendente le province Bari e BAT

I *summary plots* (Figura 9) prodotti per O₃, rispettivamente sull'anno e sul periodo estivo, mostrano, infine, il soddisfacimento di tutti i criteri di performance previsti dal DELTA TOOL in corrispondenza di tutte le centraline.



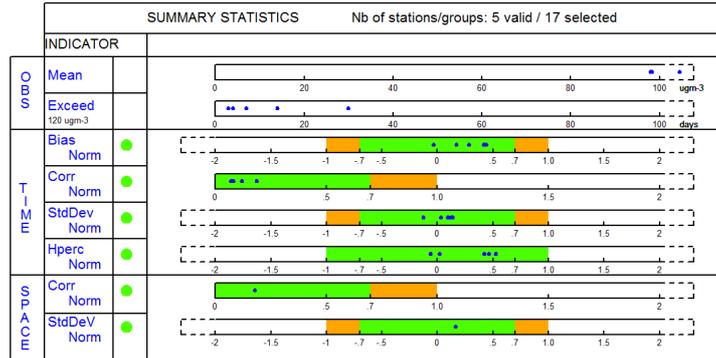


Figura 9 – Summary plots prodotti dal Delta Tool per O₃ nel periodo annuale (in alto) e nel periodo estivo (in basso) sul dominio comprendente le province Bari e Bat.

Per le altre specie normate si mostrano i relativi *scatter plot*.

Per quanto riguarda il monossido di carbonio (CO) ed il benzene (C₆H₆), osservando le figure 10 e 11 risulta evidente una sottostima generale del dato misurato. Tale sottostima è attribuibile potenzialmente a vari fattori (non corretta stima delle emissioni, presenza di sorgenti emmissive locali (traffico), la cui emissione è diluita sull'intero volume di cella, ecc.). Non si esclude, d'altro canto, per alcune postazioni di monitoraggio la presenza di anomalie sperimentali.

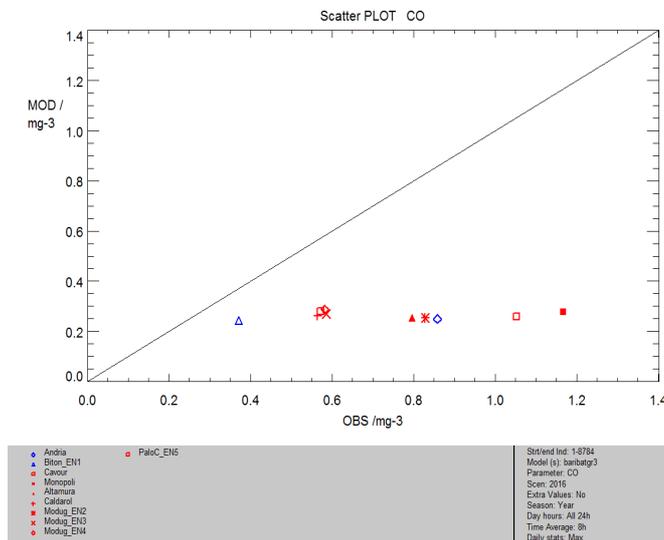


Figura 10 - Scatter plot prodotto dal Delta Tool per CO sul dominio comprendente le province Bari e BAT

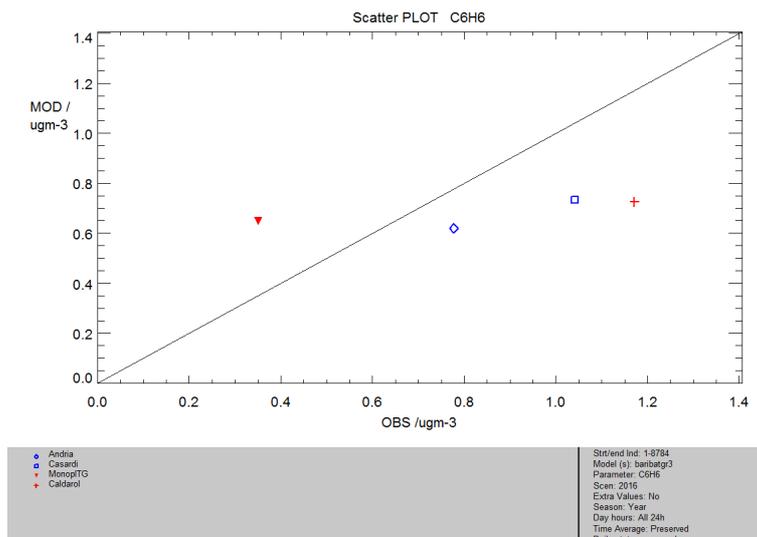


Figura 11 - Scatter plot prodotto dal Delta Tool per CO sul dominio comprendente le province Bari e BAT

In definitiva la valutazione statistica condotta con il DELTA TOOL ha evidenziato per gli inquinanti PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ e O₃ la capacità del modello di ricostruire adeguatamente le concentrazioni misurate province Bari e BAT, poiché il criterio di qualità risulta essere sempre soddisfatto.

D'altro canto, al fine di migliorare la ricostruzione modellistica dei livelli di concentrazione e la relativa distribuzione spaziale, il D.Lgs 155/2010 prevede l'integrazione/combinazione dei campi simulati dal modello con i dati misurati. Tale integrazione, denominata assimilazione, rappresenta la modalità migliore per giungere ad una valutazione realistica dello stato di qualità dell'aria (nel senso di conoscenza della distribuzione nello spazio e nel tempo degli inquinanti di interesse), valorizzando al massimo ogni tipo di misura, ciascuno col proprio grado di precisione e di affidabilità. Nei successivi paragrafi verrà, quindi, descritto il processo di assimilazione e verranno mostrati i risultati della valutazione dello stato della QA sulle province Bari e BAT ad 1km di risoluzione spaziale relativamente al 2016. Per gli inquinanti normati dal D.Lgs 155, per i quali sono disponibili le misure per il 2016, la corrispondente valutazione sarà il risultato di tale processo di assimilazione.

4. Assimilazione delle misure sperimentali nella valutazione modellistica

Il risultato della simulazione modellistica è connotato da un certo grado di incertezza, che risulta dalla composizione dell'incertezza intrinseca al modello (dovuta all'incapacità di descrivere perfettamente i fenomeni fisici) e di quella associata ai dati di ingresso, in particolare alle emissioni e ai parametri meteorologici. Di conseguenza, le concentrazioni dei diversi inquinanti ricostruite dal sistema modellistico risultano essere in alcuni casi distanti dalle concentrazioni misurate dalla rete di monitoraggio della qualità dell'aria.

Per ovviare a ciò risulta molto importante assimilare i dati misurati dalle stazioni di monitoraggio nei campi di concentrazione al suolo, prodotti dal modello fotochimico, al fine di ottenere campi di "analisi" di qualità dell'aria più realistici rispetto a quelli prodotti dal solo modello di simulazione.

Nelle tecniche di assimilazione il campo bidimensionale di concentrazione, prodotto dal modello chimico, rappresenta il campo di *background* con il quale viene inizializzata la procedura di interpolazione; tale campo viene successivamente modificato con l'introduzione delle osservazioni nella griglia del modello attraverso uno specifico schema di interpolazione.

Nel presente lavoro l'assimilazione dei dati misurati dalle stazioni di monitoraggio della rete, gestita da ARPA, nei campi di concentrazione al suolo, prodotti dal modello FARM per il 2016, è stata effettuata mediante l'utilizzo del modulo ARpMEAS (ARchive plus MEASurements), sviluppato da Arianet, che implementa metodi basati sia su tecniche cosiddette di "observational nudging" (Stauffer e Seaman, 1990) che di "objective analysis" (es. "Optimal Interpolation").

Nello specifico è stato utilizzato il metodo dell'*Optimal Interpolation* (OI), che permette di interpolare le osservazioni localizzate su un dominio, utilizzando, come prima approssimazione, il campo di fondo (o di *background*) prodotto dal modello. Dal momento che sia le osservazioni che il campo di fondo possono contenere errori, l'OI costruisce il campo di analisi minimizzando le varianze degli errori delle osservazioni e del campo di fondo. Il campo ottenuto è ottimale nel senso che ha la varianza minima¹⁰.

L'assimilazione ha coinvolto gli inquinanti NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO e C₆H₆, monitorati dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria gestite da ARPA e ubicate nelle province di Bari e Barletta – Andria - Trani. In particolare, l'assimilazione è avvenuta su base oraria per le specie NO₂, O₃, CO e C₆H₆; mentre per le specie PM₁₀ e PM_{2.5} l'assimilazione è avvenuta su base giornaliera. Si fa presente che per la centralina, sita a Bari in Via Cavour, si è scelto di non assimilare le misure di NO₂, perché ritenute condizionate da emissioni molto locali, tali da rendere la rappresentatività della centralina di molto inferiore alla risoluzione del modello¹¹.

Infine, si fa presente che dal processo di assimilazione sono state escluse le misure di PM₁₀ e PM_{2.5} acquisite nei giorni in cui si sono registrati superamenti del valore limite per effetto delle avvezioni sahariane, dal momento che la normativa prevede lo scorporo di tali superamenti per la valutazione della conformità dello stato della qualità dell'aria per il valore limite giornaliero.

¹⁰ La messa a punto di tale metodo richiede innanzitutto la definizione/ottimizzazione dei parametri che gestiscono l'assimilazione, come la rappresentatività/raggio di influenza dei punti di misura e la correlazione orizzontale e correlazione verticale, definiti in base alle caratteristiche dei singoli inquinanti e delle singole centraline di monitoraggio. Non esiste infatti un criterio standard di assegnazione del raggio di influenza ad ogni punto di misura, ma la scelta va fatta per ogni caso specifico in funzione quindi della cosiddetta rappresentatività del punto di misura stesso; quest'ultima è stata assegnata in base alla tipologia del punto di misura (ad esempio traffico, industriale o di fondo) e alla caratteristica della zona (ad esempio urbana, rurale, suburbana).

¹¹ A riguardo si rimanda per ulteriori dettagli alla relazione "Valutazione modellistica del biossido di azoto (NO₂) sul comune di Bari - Anno 2016" disponibile all'indirizzo <http://www.arpa.puglia.it/web/guest/modellistica>.

L'assimilazione è stata effettuata sui campi di concentrazione al suolo simulati dal modello fotochimico FARM sul dominio comprendente le province Bari e BAT ad una risoluzione spaziale pari ad 1km.

In tabella 3 si indicano con il simbolo x le specie chimiche assimilate per ciascuna centralina.

Tabella 3 - Elenco delle centraline e delle relative specie chimiche assimilate nel modello

Provincia	nome	tipo zona	tipo stazione	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	C ₆ H ₆
BAT	Casardi	Urbana	Fondo	x	x	x	x		x
BAT	Andria	Urbana	Traffico		x	x		x	x
BAT	Bitonto_EN1	Suburbana	Industriale	x	x	x	x	x	
BA	CUS	Suburbana	Traffico		x	x	x		
BA	Carbonara	Suburbana	Fondo		x	x		x	
BA	Kennedy	urbana	Fondo		x	x	x		
BA	Casamass	Suburbana	Fondo		x	x	x		
BA	Monopoli	Suburbana	Traffico	x				x	
BA	Altamura	Suburbana	Fondo		x	x	x	x	
BA	MonopITG	Suburbana	Traffico	x	x	x			x
BA	Molf_Ver	urbana	traffico		x	x			
BA	C_Cavour	urbana	traffico	x	x			x	x
BA	Caldarol	urbana	traffico	x	x	x		x	x
BA	Modug_EN2	Suburbana	Industriale	x	x	x	x	x	
BA	Modug_EN3	Urbana	Industriale			x		x	
BA	Modug_EN4	Suburbana	Industriale		x	x		x	
BA	PaloC_EN5	Suburbana	Industriale		x	x		x	

5. Valutazione dello stato della Qualità dell'Aria sulle province Bari e BAT – Anno 2016

In questo paragrafo si mostrano i risultati della valutazione dello stato della qualità dell'aria, riferita all'anno 2016, sulle province Bari e BAT ad 1 km di risoluzione spaziale. Tale valutazione è stata condotta ai sensi del D.Lgs 155/2010 assimilando le misure degli inquinanti (NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO e C₆H₆), monitorati dalle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria gestite da ARPA, sui corrispondenti campi di concentrazione al suolo prodotti dal modello fotochimico FARM.

Per l'inquinante SO₂, per il quale non sono presenti postazioni di monitoraggio, la valutazione dello stato della qualità dell'aria è stata condotta con l'ausilio del solo modello fotochimico FARM.

Per gli inquinanti As, Cd, Ni, Pb e B(a)P la valutazione dello stato della qualità dell'aria è stata condotta con l'ausilio del solo modello fotochimico FARM.

Al fine, quindi, di valutare ai sensi del D. Lgs 155/2010 la conformità dello stato della qualità dell'aria delle province di Bari e BAT, verranno di seguito mostrate per ogni inquinante normato le mappe dei relativi indicatori prescritti. Tali mappe saranno confrontate con i corrispondenti valori limite previsti per la protezione della salute umana dallo stesso decreto.

Di seguito nella Tabella 4 si riportano i relativi limiti prescritti per ogni inquinante normato dal D.Lgs 155/2010. In particolare, in presenza di una non conformità per i suddetti indicatori, verranno

identificati i corrispondenti comuni interessati dal superamento e per ognuno di essi verrà fornito il valore massimo dell'indicatore, calcolato sulle celle che ricoprono il relativo territorio.

Tabella 4 – Valori limite prescritti dal D. Lgs 155/2010

Inquinante	Limite	Periodo di mediazione	Limite	Superamenti in un anno
PM10 (µg/m3)	Valore limite sulle 24 ore per la protezione della salute umana	Media giornaliera	50 µg/m3	massimo 35
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	40 µg/m3	
PM2.5 (µg/m3)	Valore Limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	25 µg/m3	
NO2 (µg/m3)	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima oraria	200 µg/m3	massimo 18
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	40 µg/m3	
O3 (µg/m3)	Soglia d'informazione	Media massima oraria	180 µg/m3	
	Soglia d'allarme	Media massima oraria	240 µg/m3	
	Valore obiettivo	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	120 µg/m3	<= 25 volte/anno come media su 3 anni
CO (mg/m3)	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	10 mg/m3	
SO2 (µg/m3)	Valore limite giornaliero	Media giornaliera	125 µg/m3	massimo 3
	Valore limite su 1 ora per la protezione della salute umana	Media massima oraria	350 µg/m3	massimo 24
Benzene(µg/m3)	Valore limite su base annua	anno civile	5 µg/m3	
Benzo(a)pirene(ng/m3)	Concentrazione presente nella frazione PM10 del materiale particolato, calcolato come media su un anno civile	anno civile	1 ng/m3	
Metalli pesanti(ng/m3)	Arsenico	anno civile	6 ng/m3	
	Cadmio	anno civile	5 ng/m3	
	Nichel	anno civile	20 ng/m3	
	Piombo	anno civile	0,5 µg/m3	

5.1 Biossido di azoto (NO₂)

Di seguito nella Figura 12 si mostrano, per gli indicatori statistici che il D.Lgs 155/2010 prescrive per l'NO₂, le relative mappe di analisi, ovvero le mappe ottenute dall'assimilazione delle misure, svolte dalle reti di monitoraggio gestite da ARPA, sui campi di concentrazione elaborati ad 1km dal sistema modellistico FARM sulle province Bari e BAT.

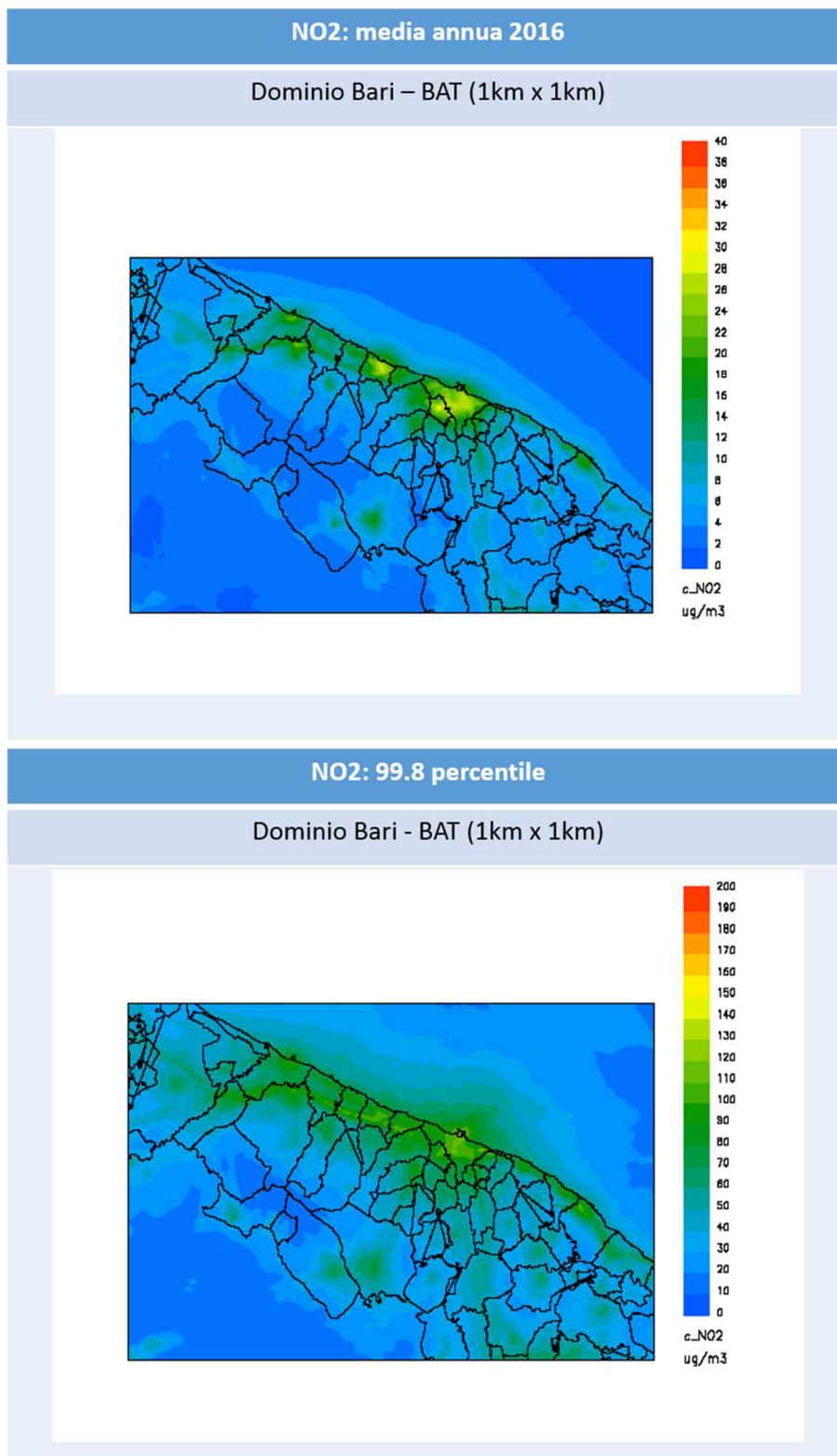


Figura 12 – Mappe di analisi per NO₂ (µg/m³) relative alla concentrazione media annuale (in alto) e al 99.8 percentile (in basso) calcolato sulla serie annuale delle concentrazioni orarie

Le mappe di analisi non mostrano alcun superamento dei valori limite prescritti. Ciò è in accordo con quanto osservato per il 2016 dalle centraline di monitoraggio di QA, ad eccezione della postazione di monitoraggio da traffico “Corso Cavour - Bari”, dove per il 2016 si è verificato il superamento del valore limite annuale per la protezione della salute umana. Come già detto, nelle mappe di analisi non sono state assimilate le misure di NO₂ rilevate presso questa centralina, perché ritenute condizionate da emissioni molto locali¹², tali da rendere la rappresentatività della centralina di molto inferiore alla risoluzione del modello.

Dalle mappe presentate risulta evidente come le concentrazioni di NO₂ più elevate si verificano in corrispondenza delle aree urbane. Emergono inoltre abbastanza chiaramente le più importanti arterie stradali.

¹² La centralina “Via Cavour” è situata in prossimità di un incrocio stradale semaforizzato interessato da importanti volumi di traffico.

5.2 Biossido di zolfo (SO₂)

Di seguito nella Figura 13 si mostrano, per gli indicatori statistici che il D.Lgs 155/2010 prescrive per l'SO₂, le relative mappe previste dal solo modello fotochimico FARM sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

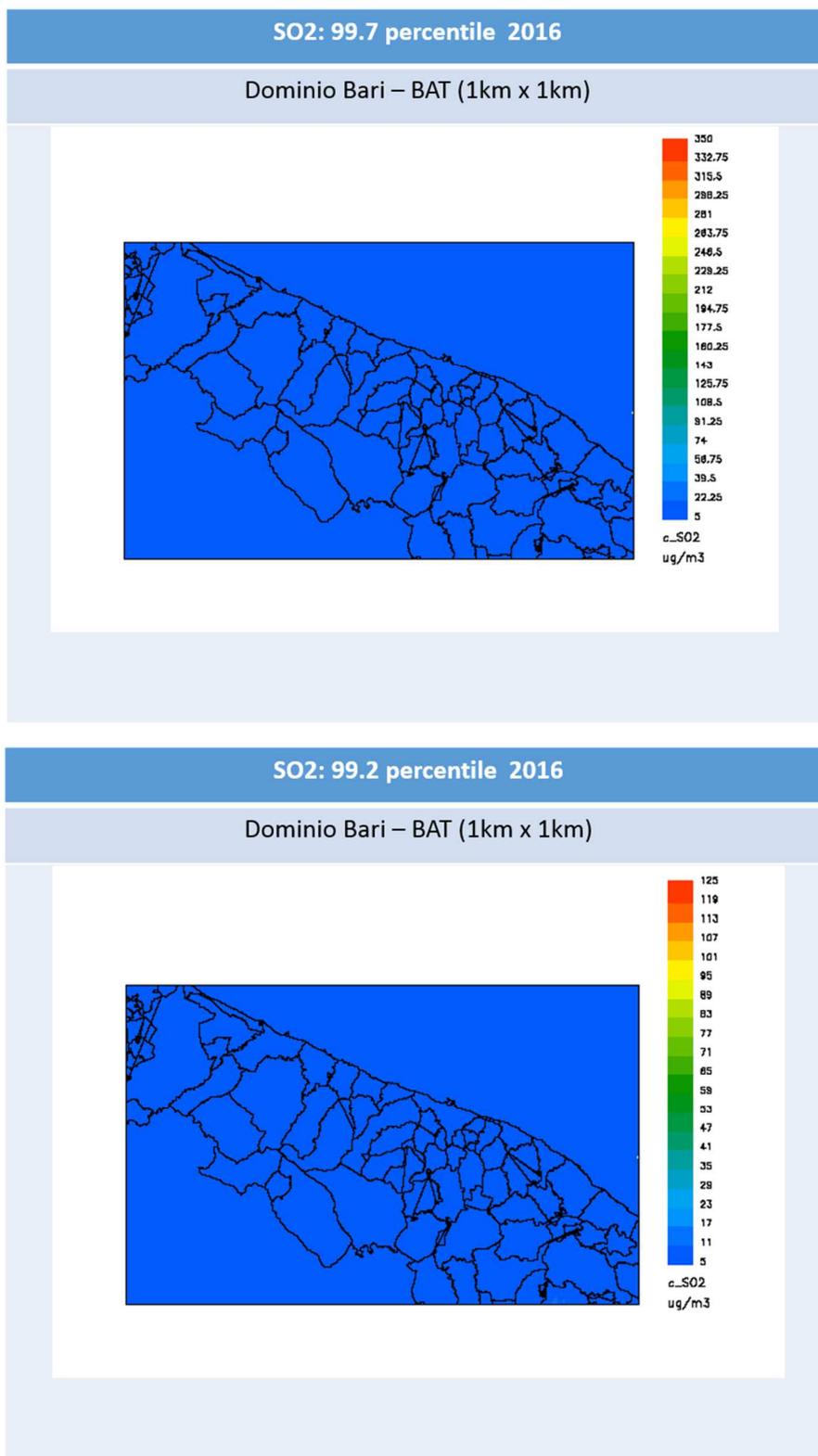


Figura 13 – Mappe prodotte dal modello FARM per SO₂ (µg/m³) relativamente al 99.7° percentile (in alto), calcolato sulla serie annuale delle concentrazioni orarie, e al 99.2 percentile (in basso), calcolato sulla serie annuale delle concentrazioni medie giornaliere

Sul dominio di simulazione non si verifica alcun superamento dei valori limite prescritti per l'SO₂.

5.3 Particolato Fine - PM₁₀

Di seguito nelle Figure 13 e 14 si mostrano per gli indicatori statistici, prescritti dal D.Lgs 155/2010 per il PM₁₀, le relative mappe di analisi sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

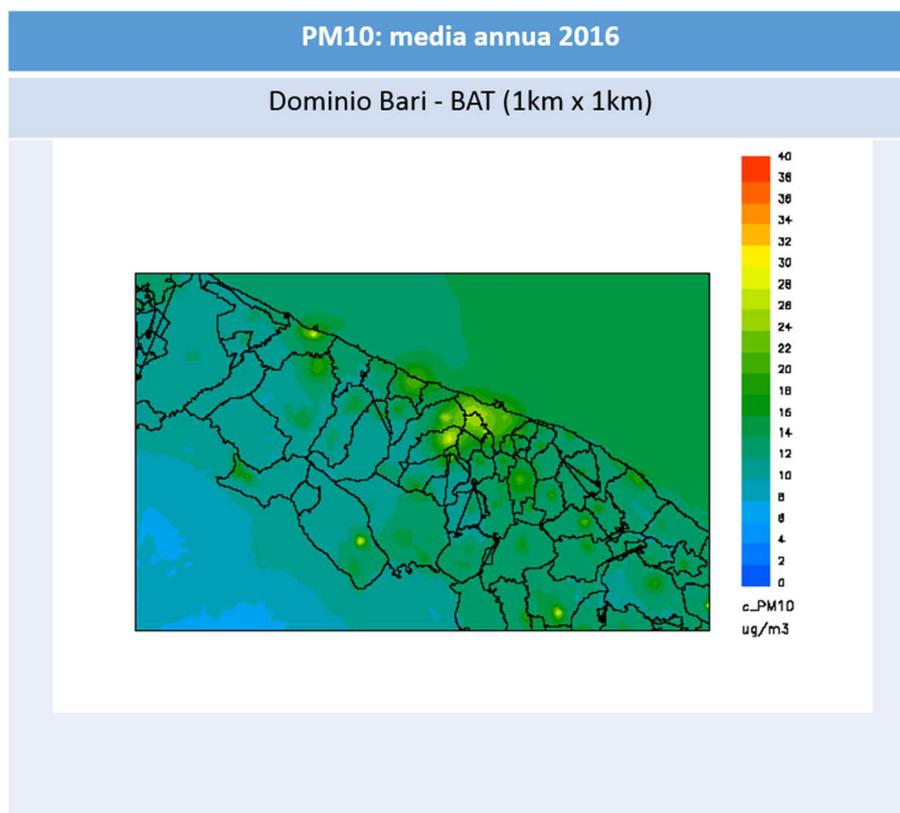


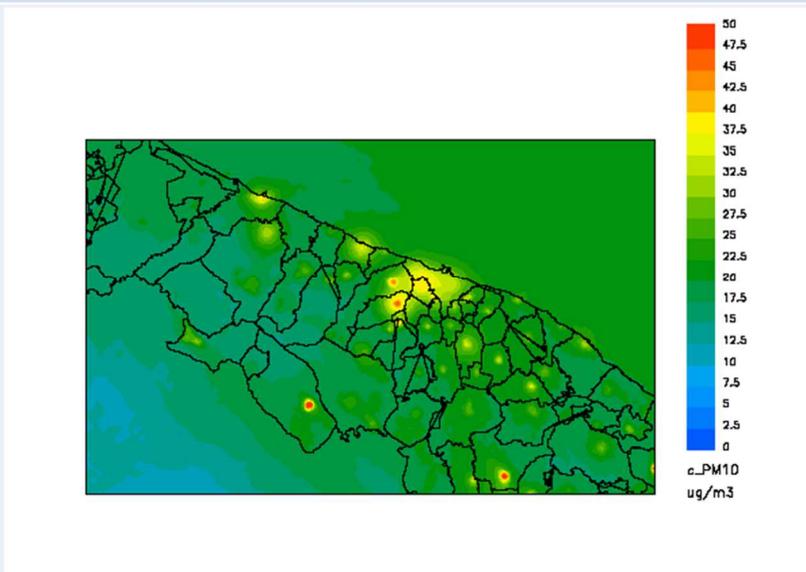
Figura 13 - Mappe di analisi della concentrazione media annuale di PM₁₀ sul dominio Bari-BAT

Per l'indicatore della media annuale non si verifica alcun superamento¹³ del corrispondente valore limite. I valori più elevati si raggiungono nei comuni di Bari, Barletta, Modugno, Palo del Colle, Bitonto e Gravina.

¹³ E' opportuno precisare che si verifica su una cella del dominio di simulazione un superamento del valore limite annuale quando la concentrazione media annuale, ivi stimata, supera il valore di $40.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

PM10: 90.4 percentile

Dominio Bari – BAT (1km x 1km)



PM10: numero superamenti VL 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Dominio Bari – BAT (1km x 1km)

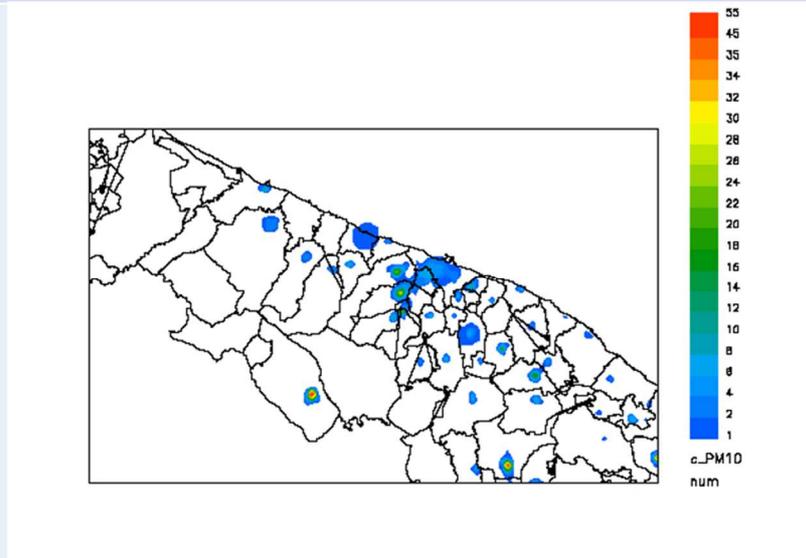


Figura 14 - Mappe di analisi per il PM10 relative al 90.4 percentile (in alto), calcolato sulla serie annuale delle medie giornaliere, e del numero di superamenti del valore limite giornaliero (in basso)

Riguardo al valore limite giornaliero per il PM₁₀, da non superare per più di 35 volte all'anno, le mappe di analisi, mostrate in Figura 14, indicano la presenza di una non conformità. Tale non conformità si rileva nell'area urbana del comune di Gravina, dove il 90.4 percentile per il PM₁₀ è risultato pari a 61 µg/m³(14). Inoltre nelle aree urbanizzate di Palo del Colle e Grumo Appula le mappe indicano un numero annuale di superamenti prossimo al massimo numero ammesso. A Palo del Colle il numero annuale di superamenti del valore limite giornaliero è, infatti, pari a 33¹⁵, mentre presso Grumo Appula a 32.

La causa di tali superamenti è presumibilmente da imputarsi alle emissioni locali, prodotte dal riscaldamento residenziale a legna, che determinano analoghe criticità anche in diversi comuni delle province di Brindisi, Lecce e Taranto. A riguardo si rimanda alle valutazioni modellistiche sullo stato della qualità dell'aria sulla regione Puglia e sul Salento riferite al 2013 e al 2016¹⁶.

¹⁴ Tale valore corrisponde ad un numero annuale di superamenti del valore limite giornaliero, prescritto per il PM₁₀, pari a 49.

¹⁵ Si precisa che in corrispondenza della centralina sita a Palo del Colle le mappe non evidenziano il superamento del valore limite giornaliero per il PM₁₀, coerentemente con quanto misurato dalla stessa centralina

¹⁶ Le relazioni sono disponibili sul sito <http://www.arpa.puglia.it/web/guest/modellistica>.

5.4 Particolato Fine – PM_{2.5}

Nella figura 15 si mostra per l'indicatore statistico media annuale, prescritto dal D.Lgs 155/2010 per il PM_{2.5}, la relativa mappa di analisi.

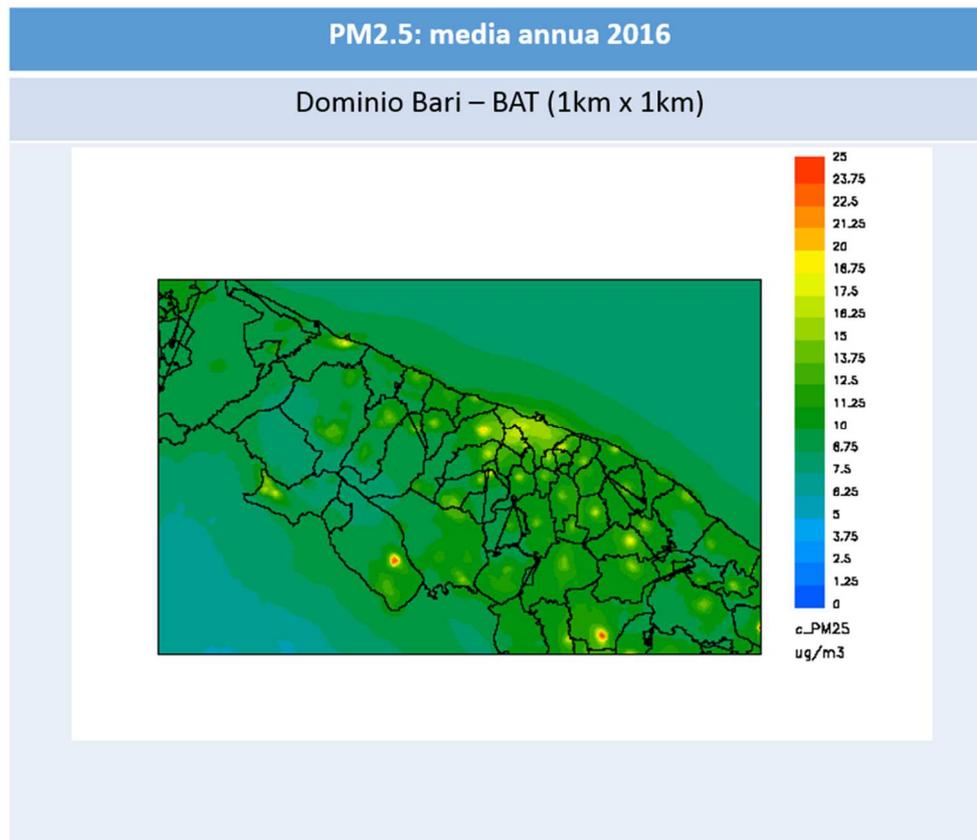


Figura 15 – Mappa di analisi per il PM_{2.5} relativa alla concentrazione media annuale.

Non si verifica alcun superamento del valore limite prescritto dalla normativa per il PM_{2.5}. Il valore più elevato della concentrazione media annuale si rileva all'interno dell'area urbanizzata del comune di Gravina e risulta uguale al valore limite annuale (pari a 25 µg/m³).

5.5 Ozono (O₃)

Di seguito nelle Figure 16 e 17 si mostrano, per gli indicatori prescritti per la protezione della salute umana dal D.Lgs 155/2010 per O₃, le relative mappe di analisi sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

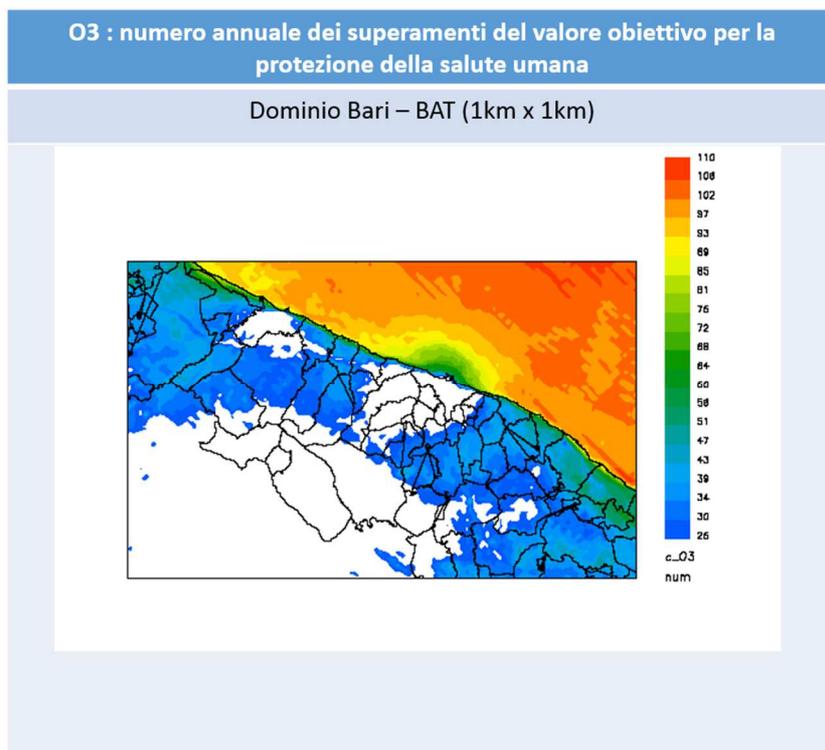


Figura 16 – Mappa di analisi del numero annuale di superamenti del valore obiettivo per la protezione della salute umana per O₃

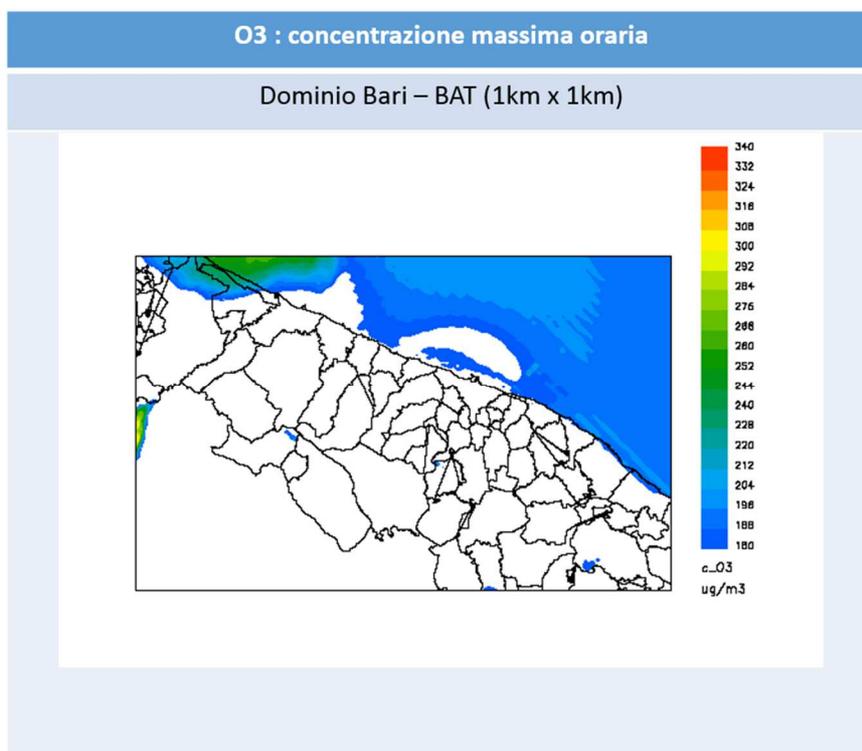


Figura 17 - Mappa di analisi della concentrazione massima oraria di O₃ (µg/m³) sul dominio locale Bari-BAT

Si verifica un numero di superamenti maggiore di quello ammesso in un anno (pari a 25); tali superamenti riguardano sia le coste che parte dell'entroterra. Si riscontrano anche superamenti della soglia di informazione.

5.6 Monossido di carbonio (CO)

Nella Figura 18 si mostra per il CO la mappa di analisi prodotta sul dominio comprendente le province di Bari e di BAT relativamente alla massima media mobile su 8 ore valutata sull'anno.

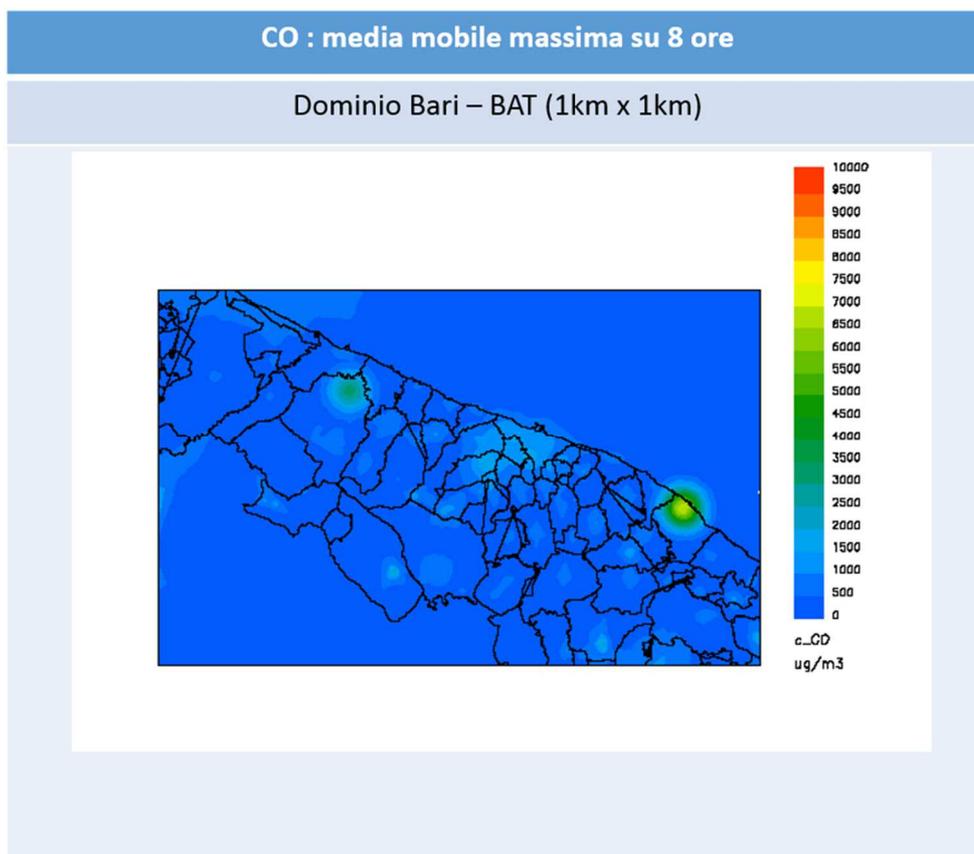


Figura 18 - Mappa di analisi della massima concentrazione media mobile su 8 ore di CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Non si verifica alcun superamento del valore limite prescritto per il CO. E' interessante notare come le massime concentrazioni mobili su 8 ore per il CO si rilevino presso i comuni di Monopoli e di Andria in seguito all'assimilazione dei dati misurate dalle centraline (rispettivamente di tipo suburbano-traffico ed urbano-traffico).

5.7 Benzene(C_6H_6)

Nella Figura 19 si mostra per l'indicatore media annuale del benzene, prescritto dal D.Lgs 155/2010, la mappa di analisi prodotta sul dominio comprendente le province di Bari, Barletta, Andria e Trani.

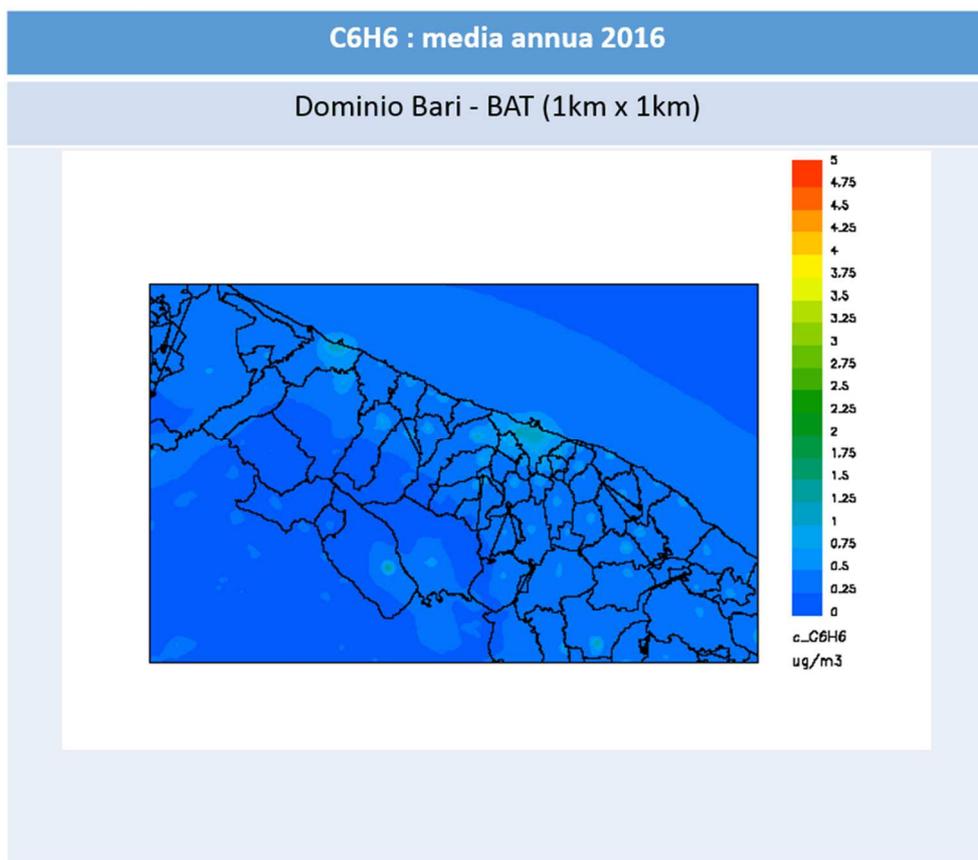


Figura 19 - Mappa di analisi della concentrazione media annuale di C₆H₆ (µg/m³)

Relativamente al benzene non si verificano superamenti del valore limite per la protezione della salute umana.

5.8 Benzo(a)pirene (B(a)P)

Nella Figura 20 si mostra per l'indicatore media annuale, prescritto per il benzo(a)pirene dal D.Lgs 155/2010, la mappa prevista dal solo modello fotochimico.

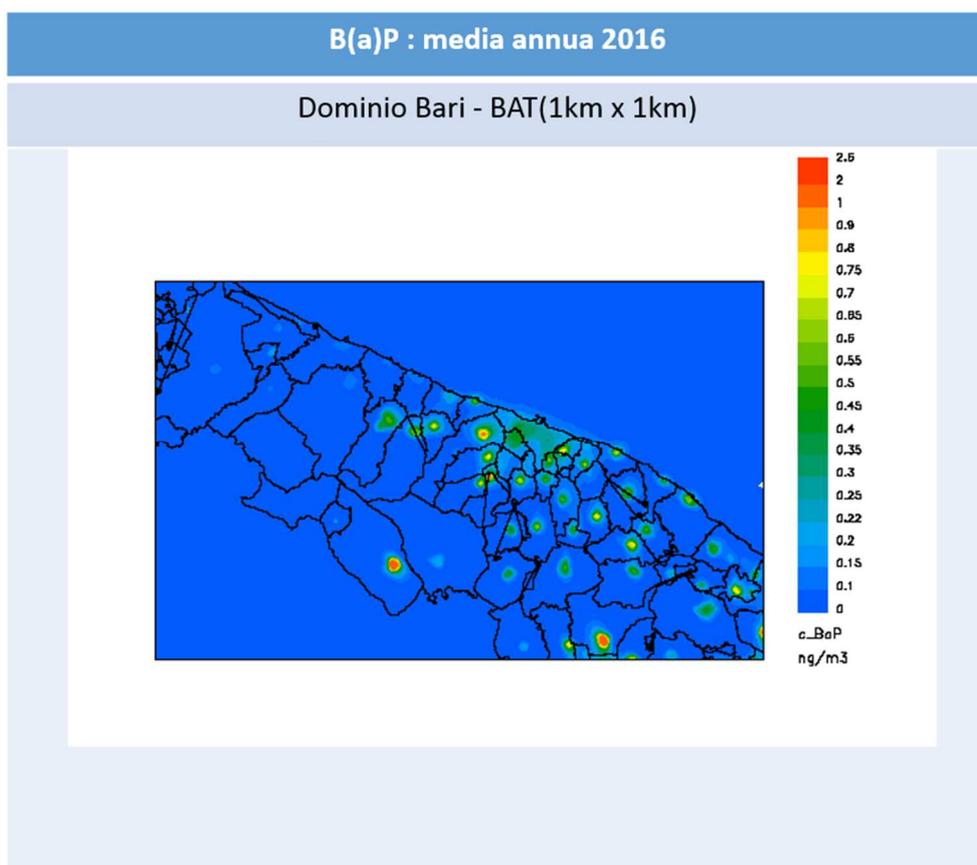


Figura 20 - Mappa della concentrazione media annuale di B(a)P (ng/m³) prevista dal modello fotochimico FARM

Tabella 13 - Comuni sul cui territorio si prevede il superamento del valore limite annuale per il B(a)P

Comune	Provincia	Concentrazione media annuale B(a)P (ng/m ³)
Gravina	BA	1.9
Bitonto	BA	1.1
Grumo Appula	BA	1.4

Nei comuni di Gravina, Bitonto e Grumo Appula il modello fotochimico FARM prevede il superamento del valore obiettivo prescritto per il B(a)P. E' opportuno, inoltre, evidenziare che la concentrazione media annuale risulta prossima¹⁷ al valore obiettivo in diversi comuni della provincia di Bari, quali

¹⁷ Ovvero superiore a 0.8 ng/m³.

Terlizzi, Palo del Colle, Triggiano, Toritto, Turi e Putignano. Tali superamenti sono da attribuirsi presumibilmente alle emissioni prodotte dalla combustione residenziale della biomassa legnosa.

5.9 Arsenico (As)

Nella Figura 21 si mostra per l'indicatore media annuale, prescritto dal D.Lgs 155/2010 per l'arsenico, le mappe simulate dal modello fotochimico sulle province Bari e BAT.

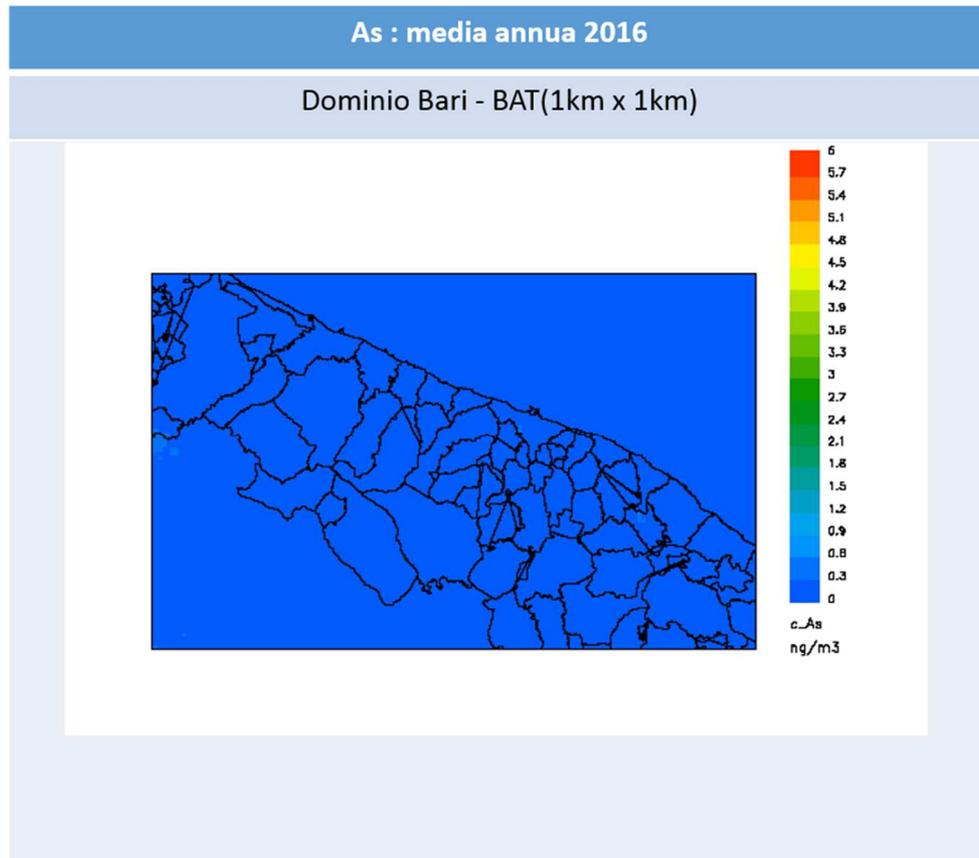


Figura 21 - Mappa della concentrazione media annuale di As (ng/m³) prevista dal modello fotochimico FARM

Relativamente all'arsenico non si verificano superamenti del corrispondente valore obiettivo.

5.10 Cadmio (Cd)

Nella Figura 22 si mostra per l'indicatore media annuale, prescritto dal D.Lgs 155/2010 per il cadmio, la mappa prevista dal solo modello fotochimico sulle province di Bari e BAT.

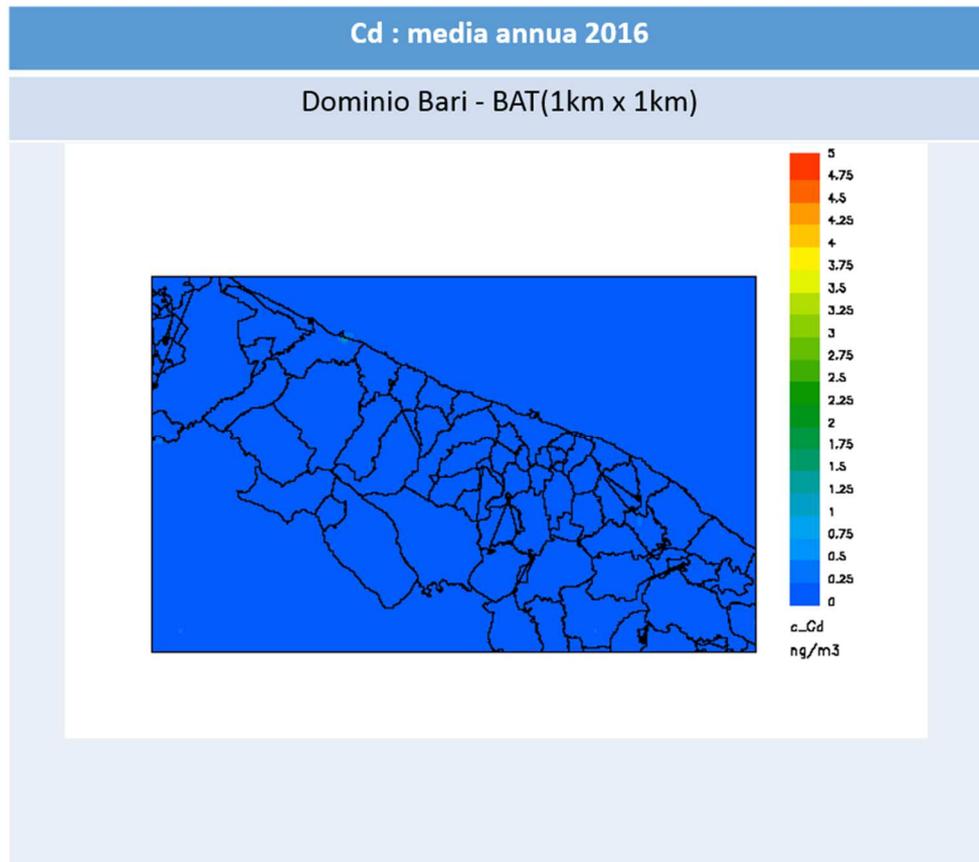


Figura 22 - Mappa della concentrazione media annuale di Cd (ng/m³) prevista dal modello fotochimico FARM
Relativamente al cadmio non si verificano superamenti del valore obiettivo.

5.11 Nichel (Ni)

Nella Figura 23 si mostra per l'indicatore media annuale, prescritto dal D.Lgs 155/2010 per il nichel, la mappa simulata dal solo modello fotochimico sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

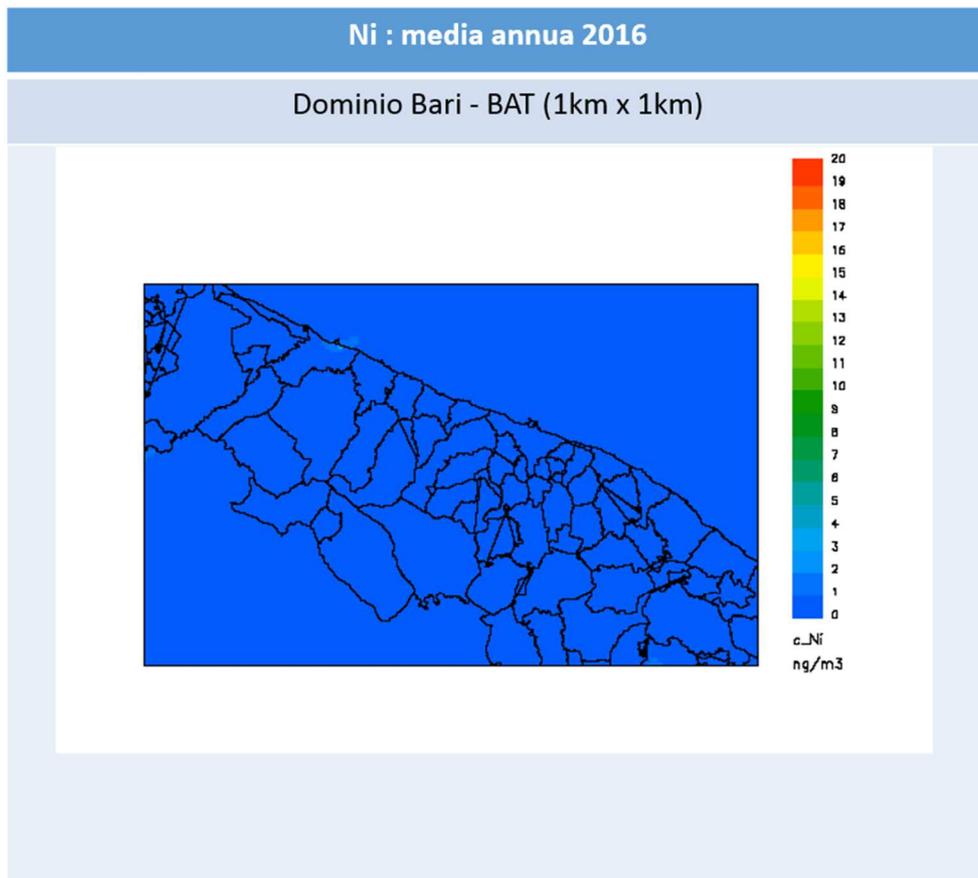


Figura 23 - Mappa della concentrazione media annuale di Ni (ng/m³) prevista dal modello fotochimico FARM

Relativamente al nichel non si rilevano superamenti del valore obiettivo.

5.11 Piombo (Pb)

Nella Figura 24 si mostra per l'indicatore media annuale, prescritto dal D.Lgs 155/2010 per il piombo, la mappa simulata dal solo modello fotochimico sul dominio comprendente le province Bari e BAT.

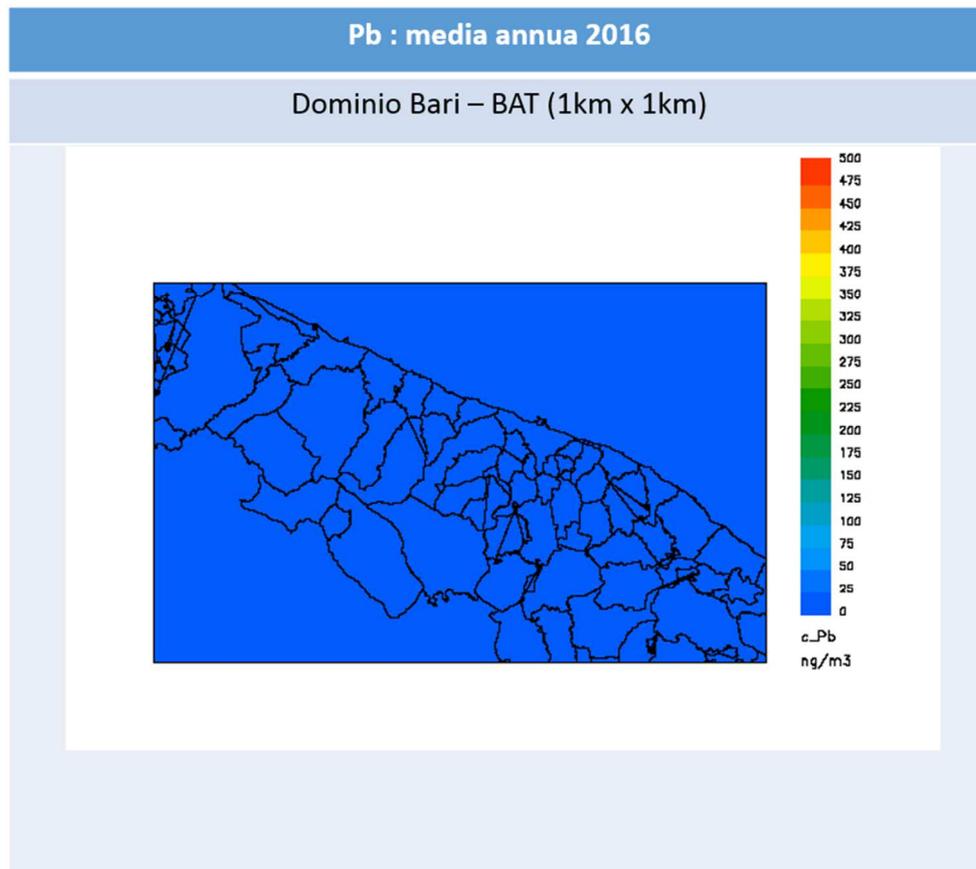


Figura 24 - Mappa della concentrazione media annuale di Pb(ng/m³) prevista dal modello fotochimico FARM

Relativamente al piombo non si verificano superamenti del valore limite per la protezione della salute umana.

Conclusioni

Nel presente rapporto sono stati mostrati i risultati della valutazione modellistica dello stato della qualità dell'aria sulle province di Bari e Barletta-Andria-Trani ad 1km di risoluzione spaziale, relativamente al 2016. Tale valutazione è stata condotta per gli inquinanti NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO e C₆H₆ combinando le relative misure, effettuate nel 2016 dalle reti di monitoraggio di ARPA Puglia, con i campi di concentrazione, ricostruiti sulle province Bari e BAT dal modello fotochimico FARM. Per gli inquinanti SO₂, As, Cd, Ni, Pb e B(a)P la valutazione è stata condotta con l'ausilio del solo modello fotochimico.

Il confronto con i limiti della normativa, prescritti dal D.Lgs 155/2010, ha evidenziato la conformità dello stato della QA per gli inquinanti NO₂, SO₂, CO, C₆H₆, PM_{2.5}, As, Cd, Ni e Pb. D'altro canto per il PM₁₀ e per il B(a)P sono presenti alcune non conformità.

In particolare, riguardo al valore limite giornaliero per il particolato fine – frazione PM₁₀, da non superare per più di 35 volte all'anno, l'analisi condotta per il 2016, assimilando le misure di PM₁₀ delle centraline della rete di monitoraggio sui corrispondenti campi di concentrazione previsti dal modello fotochimico FARM, ha evidenziato la presenza di una non conformità all'interno dell'area urbanizzata del comune di Gravina (BA).

Relativamente al benzo(a)pirene, la valutazione condotta con il solo modello fotochimico ha evidenziato la presenza di superamenti in provincia di Bari nelle aree urbane dei comuni di Gravina, Bitonto e Grumo Appula.

Infine, su buona parte del territorio barese si è verificato il superamento del valore limite obiettivo e della soglia di informazione prescritti per l'ozono.

Bari, 28 Agosto 2018

Simulazioni con modello fotochimico, assimilazione dati, post-elaborazione e predisposizione mappe a cura di:

Ing. Ilenia Schipa

Valutazione performance modello fotochimico a cura di

Dott.ssa Annalisa Tanzarella

P.O. Emissioni

Dott.ssa Angela Morabito



Il Direttore del Centro Regionale Aria

Dott. Roberto Giua

