

QUALITÀ DELL'ARIA

Introduzione

L'aria, di cui si tratta nel presente capitolo, è quella presente nello strato inferiore dell'atmosfera terrestre, denominato **troposfera**; più precisamente si tratta dell'aria presente nella parte più bassa della troposfera a diretto contatto con la superficie terrestre.

L'aria è spesso definita anche "aria ambiente" o "*outdoor*": con questo termine si intende indicare l'aria esterna con l'esclusione di quella presente nei luoghi di lavoro e negli ambienti domestici e pubblici (aria *indoor*) che, avendo specificità e, limitatamente ai luoghi di lavoro, normativa dedicata¹, non è oggetto del presente capitolo.

L'aria è inquinata quando in essa sono presenti sostanze che alterano la sua composizione naturale.

Una definizione esauriente di inquinamento atmosferico che tiene conto delle conseguenze sull'uomo e sull'ambiente intero è riportata nel DPR 203/88² ed è la seguente "ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati".

L'aria non inquinata non è una realtà facilmente misurabile in quanto l'uomo da sempre, con il suo operare, ha immesso nell'aria sostanze in qualità e quantità tali da alterare la sua composizione originale: l'aria che più si avvicina a un'aria non inquinata è quella presente in aree remote come i poli o ad alta quota, nel mezzo degli oceani o nei deserti.

Lo sviluppo economico, industriale e demografico avvenuto nel corso degli ultimi due secoli, oltre a un indubbio miglioramento della qualità della vita dell'uomo, ha provocato profondi e rapidi mutamenti nell'ambiente.

Enormi quantità di sostanze inquinanti provenienti principalmente da processi di combustione (trasporto, riscaldamento domestico, produzioni industriali, ecc.) continuano a essere riversate nell'atmosfera; quando la capacità di diluizione degli inquinanti in atmosfera è superata dalla capacità emissiva si genera un accumulo di inquinanti che raggiungono concentrazioni pericolose per la salute dell'uomo e per l'equilibrio degli ecosistemi.

L'aria è inquinata quando in essa sono presenti sostanze che alterano la sua composizione naturale.

Grandi quantità di sostanze inquinanti continuano a essere riversate nell'atmosfera.

¹ D.Lgs. 9 aprile 2008, n.81

² DPR 203/88 del 24 maggio 1988, G.U. 16 giugno 1988, n. 140, S.O. Attuazione delle Direttive CEE numeri 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi dell'art.15 della legge 16 aprile 1987, numero 183

L'inquinamento atmosferico è un fenomeno estremamente complesso e determinato, oltre che dal carico emissivo conseguente all'antropizzazione del territorio che ne è ovviamente la causa prima, da interazioni chimico-fisiche che avvengono tra sostanze in atmosfera e dalle condizioni meteorologiche che hanno un ruolo fondamentale nella dinamica degli inquinanti atmosferici.

L'inquinamento atmosferico è un fenomeno estremamente complesso.

Le emissioni di inquinanti nel corso degli ultimi vent'anni in Europa e in Italia sono fortemente diminuite.

La qualità dell'aria, seppur migliorata (il biossido di solfo, l'ossido di carbonio, il benzene e il piombo non costituiscono attualmente un problema, se non a livello locale e in specifiche circostanze), continua a essere un'emergenza per gli elevati livelli di alcuni inquinanti che si continuano a registrare in atmosfera e per la conseguente esposizione a essi della popolazione.

L'inquinamento atmosferico è un'emergenza ambientale, nonostante le emissioni inquinanti siano diminuite negli ultimi vent'anni, in Europa e in Italia.

L'inquinamento atmosferico è riconosciuto come uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute umana.

Durante i lavori della V Conferenza Ministeriale su Ambiente e Salute che ha coinvolto i Ministri della salute e dell'ambiente dei 53 Stati della regione europea dell'OMS (Parma, 2010), l'inquinamento atmosferico è stato indicato tra i temi prioritari insieme alle emissioni di gas serra, al riscaldamento globale e all'impatto del cambiamento climatico.

L'inquinamento atmosferico è uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute umana.

Nel rapporto finale della Conferenza viene evidenziato che, in molte aree europee, l'attesa di vita è ridotta di un anno, a causa dell'inquinamento atmosferico e che il 90% della popolazione che vive in aree urbane è esposta a livelli non sicuri di inquinamento atmosferico.

L'emergenza riguarda, dunque, in particolar modo le grandi aree urbane, dove è massima l'antropizzazione del territorio, dove sono elevati i livelli di inquinanti e più elevata è l'esposizione della popolazione agli inquinanti atmosferici.

L'emergenza riguarda in particolar modo le grandi aree urbane.

Gli inquinanti che continuano ad essere un problema in Italia e in Europa, sono il particolato atmosferico, PM₁₀ e PM_{2,5}, l'ozono, entrambi riconosciuti come i maggiori responsabili degli effetti sulla salute umana, e il biossido di azoto (NO₂).

Particolato atmosferico, ozono e biossido di azoto sono gli inquinanti più critici.

In questo quadro, i risultati dei programmi di **Valutazione dell'Impatto Sanitario (VIS)** dell'inquinamento atmosferico forniscono importanti strumenti di valutazione, evidenziando i benefici economici, oltre che sanitari, derivanti da uno sviluppo sostenibile.

La VIS fornisce importanti strumenti di valutazione sanitaria e anche economici.

Per contribuire al raggiungimento di uno sviluppo sostenibile, negli strumenti di pianificazione e di programmazione ambientale e sanitaria è fondamentale la presenza e l'integrazione di competenze multidisciplinari sul tema dell'inquinamento atmosferico.

A tal fine è auspicabile, a livello nazionale, che si intensifichino ad esempio le interazioni collaborative sulle tematiche ambiente e salute tra l'ISPRA e l'Istituto Superiore di Sanità.

La constatazione della difficoltà di rispettare gli obiettivi normativi nei tempi previsti da parte di molti Stati europei, ha portato alla possibilità di chiedere una deroga all'applicazione dei valori limite del PM₁₀, del biossido di azoto e del benzene (Direttiva 2008/50/CE). Tra i principali motivi che non hanno consentito, alla quasi totalità degli Stati europei, il rispetto degli obiettivi normativi sono stati indicati: l'aumento del numero di veicoli circolanti, il ricambio del parco veicolare più lento del previsto e le maggiori emissioni dei veicoli rispetto ai limiti prescritti dagli *standard* di omologazione più recenti (Euro 3, 4 e 5).

Verso il settore della mobilità, che resta tra le principali cause dell'inquinamento atmosferico in particolare nelle aree urbane, sono indirizzate la gran parte delle misure di risanamento della qualità dell'aria.

I principali strumenti legislativi a tutela della qualità dell'aria sono le Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, recepite in Italia con il D.Lgs. 155/2010, che pongono limiti alle concentrazioni degli inquinanti in aria e obbligano Stati e regioni/province autonome a predisporre piani per il risanamento della qualità dell'aria in caso di non conformità, il Protocollo di Gothenburg, nato nell'ambito della *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* e la Direttiva 2001/81/CE (la cosiddetta Direttiva NEC - *National Emission Ceiling*), recepita con il D.Lgs. 171/2004, che pongono limiti alle emissioni nazionali.

Esiste, poi, una specifica normativa che regola l'emissione dei principali inquinanti da sorgenti e settori specifici. Alcuni dei principali riferimenti sono:

- le direttive che introducono dei limiti alle emissioni da veicoli, inclusi i Regolamenti (CE) 692/2008 e 595/2009 che introducono i più recenti Euro *standard* (5 e 6);
- la Direttiva 94/63/CE che regola l'emissione di Composti Organici Volatili (COV) nelle fasi di stoccaggio e distribuzione della benzina;
- la Direttiva 1999/13/CE che limita l'emissione dei COV dai solventi;
- la Direttiva 1999/32/CE sulla riduzione di zolfo nei combustibili liquidi;
- la Direttiva 2003/17/CE sulla qualità di benzina e gasolio;
- la Direttiva 2010/75/UE (IPPC) che regola le emissioni industriali.

E' in corso, in Europa, un processo di revisione della strategia tematica per la qualità dell'aria che, alla luce della situazione attuale (segnali di diminuzione delle concentrazioni di inquinanti in aria assenti o troppi deboli, efficacia delle misure intraprese non sempre soddisfacente, tetti alle emissioni superati, evidenze dell'impatto degli inquinanti sulla salute umana e sull'ambiente), risulta caratterizzato dall'urgenza di imprimere un'accelerazione al processo di miglioramento della qualità dell'aria.

Alcuni dei principali criteri e punti su cui si basa il suddetto processo di revisione sono i seguenti:

- cooperazione con gli Stati membri: valutazione dei motivi della

Possibilità di richiedere deroghe all'applicazione dei valori limite di PM₁₀ e NO₂.

Principali strumenti legislativi: Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, recepite in Italia con il D.Lgs. 155/2010, il Protocollo di Gothenburg e la Direttiva 2001/81/CE recepita in Italia con il D.Lgs. 171/2004.

È in corso un processo di revisione della strategia tematica per la qualità dell'aria caratterizzato dall'urgenza di imprimere un'accelerazione al processo di miglioramento della qualità dell'aria.

non conformità, incoraggiamento di scambi e esperienze, miglioramento del *reporting*, messa in campo di attività di supporto compreso quello finanziario;

- PM₁₀, PM₁, microinquinanti: revisione dei valori limite e obiettivo ed eventuale introduzione di nuovi limiti, alla luce delle più recenti evidenze scientifiche;
- PM_{2,5}: revisione dei limiti, con l'obiettivo di definire un obbligo nazionale di riduzione giuridicamente vincolante, alla luce delle indicazioni dell'OMS, dello stato di implementazione e dei potenziali di riduzione;
- *carbon black*: recenti studi e indagini sollecitano attenzione verso questo componente del particolato atmosferico. Il *carbon black* sembra essere un indicatore della sorgente traffico migliore e più immediato del PM₁₀, di cui è un componente minore e probabilmente uno dei più tossici. È, inoltre, un *climate forcer* in quanto, assorbendo la radiazione solare, può contribuire al riscaldamento dell'atmosfera. In particolare, depositandosi sulla superficie può cambiare la capacità di riflessione della terra (albedo) e provocare un'accelerazione dello scioglimento di neve o ghiaccio.
- introduzione di nuove misure di riduzione alle emissioni da diverse sorgenti. L'attenzione è posta in particolare su: limiti al contenuto di zolfo in combustibili marittimi, veicoli e trasporto su strada, traffico marittimo e aereo, macchinari, piccole sorgenti stazionarie, combustione delle biomasse, agricoltura;
- tetti alle emissioni: revisione degli inquinanti e dei limiti alle emissioni nazionali;
- integrazione con le tematiche riguardanti la biodiversità e gli ecosistemi, l'inquinamento a scala globale, il rumore, i trasporti e l'energia e, in particolare, sinergia con le politiche su cambiamenti climatici. L'impatto che l'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici possono avere l'uno sull'altro richiede una forte sinergia tra le rispettive politiche, per evitare che le iniziative intraprese nell'ambito di una tematica possano poi avere effetti negativi sull'altra come sta avvenendo, ad esempio, per l'utilizzo di biomassa per il riscaldamento civile che, promosso dalle politiche per la riduzione dei gas serra e destinato a essere ulteriormente incentivato nel prossimo futuro, è caratterizzato da elevati coefficienti di emissione di particolato e di benzo(a)pirene.

Particolato atmosferico

Con il termine particolato atmosferico (PM) si intende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria ambiente.

Il PM₁₀ identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10 µm; con PM_{2,5} si indica il cosiddetto particolato fine, con diametro aerodinamico inferiore o uguale a 2,5 µm.

Il particolato ha una natura chimica particolarmente complessa e variabile ed è in grado di penetrare nell'albero respiratorio umano, tanto più profondamente quanto più piccole sono le sue dimensioni, e quindi avere effetti negativi sulla salute.

Il particolato è in parte emesso come tale (PM primario) e in parte si forma in atmosfera attraverso reazioni chimiche fra altre specie di inquinanti (PM secondario).

Il PM può avere sia un'origine naturale (l'erosione dei venti sulle rocce, le eruzioni vulcaniche, l'autocombustione di boschi e foreste) sia antropica (combustioni e altro).

Di origine antropica sono anche molte delle sostanze gassose che contribuiscono alla formazione di PM, come gli ossidi di zolfo e di azoto, i Composti Organici Volatili e l'ammoniaca.

Lo stato della qualità dell'aria: livelli atmosferici del particolato

La situazione in Europa dei livelli atmosferici del PM₁₀, per il 2009, è illustrata in Figura 3.1³.

La mappa, oltre a mostrare i superamenti del valore limite annuale (40 µg/m³), fornisce anche informazioni rispetto al valore limite giornaliero (50 µg/m³ da non superare per più di 35 volte in un anno) poiché, sulla base di consolidate analisi statistiche sui dati di monitoraggio, il valore limite giornaliero corrisponde a una media annuale⁴ di 31 µg/m³.

Entrambi i valori limite, annuale (punti rossi) e giornaliero (punti arancioni), sono superati in molti Paesi.

In Europa, nel 2009, i dati di PM_{2,5} (595 sono le stazioni di monitoraggio caratterizzate da una copertura temporale di almeno il 75% in ambito **EoI**), anche se in aumento rispetto al 2008 (331) sono ancora insufficienti per valutazioni accurate.

Nel periodo 1999-2009 si osserva in Europa, per il PM₁₀ un debolissimo *trend* negativo nell'83% delle stazioni (significativo solo nel 42% delle stazioni considerate).

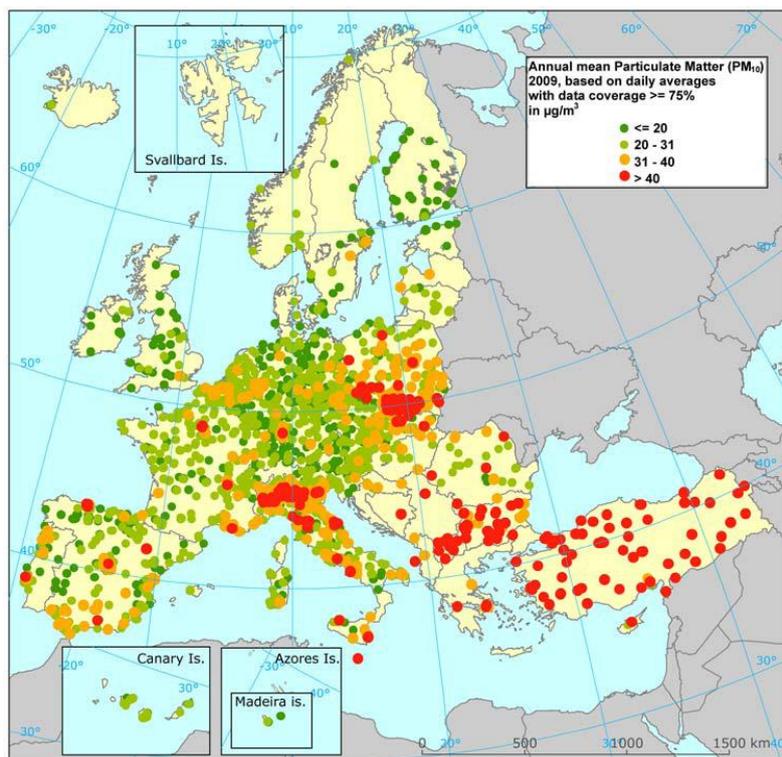
PM₁₀, 2009, Europa: i valori limite annuale e giornaliero sono superati in molti Paesi.

PM_{2,5}, nel 2009, la copertura spaziale europea delle stazioni di monitoraggio è ancora insufficiente.

PM₁₀, 1999-2009, debole trend negativo in Europa.

³ Dati di monitoraggio comunicati dai paesi europei nell'ambito di *Exchange of Information*, Decisione 97/101/CE attualmente ripresa dal D.Lgs. 155/2010 (art. 19, comma 17)

⁴ ETC/ACM, *The state of the air quality in 2009*, Technical paper 2011/1



*PM₁₀, 2009,
Europa: oltre il
32% delle stazioni
orientate al traffico
superano il valore
limite giornaliero.*

Figura 3.1: PM₁₀ - Concentrazione media annuale (valore limite 40 µg/m³) (2009)⁵

L'Italia, come è evidente dalla precedente mappa europea, non è in una posizione rassicurante.

L'area padana con la città di Milano è una delle aree critiche dell'Europa⁶, dove è riconosciuta la difficoltà del rispetto dei valori limite anche nel caso di estensione dei termini temporali fissati per il raggiungimento della conformità.

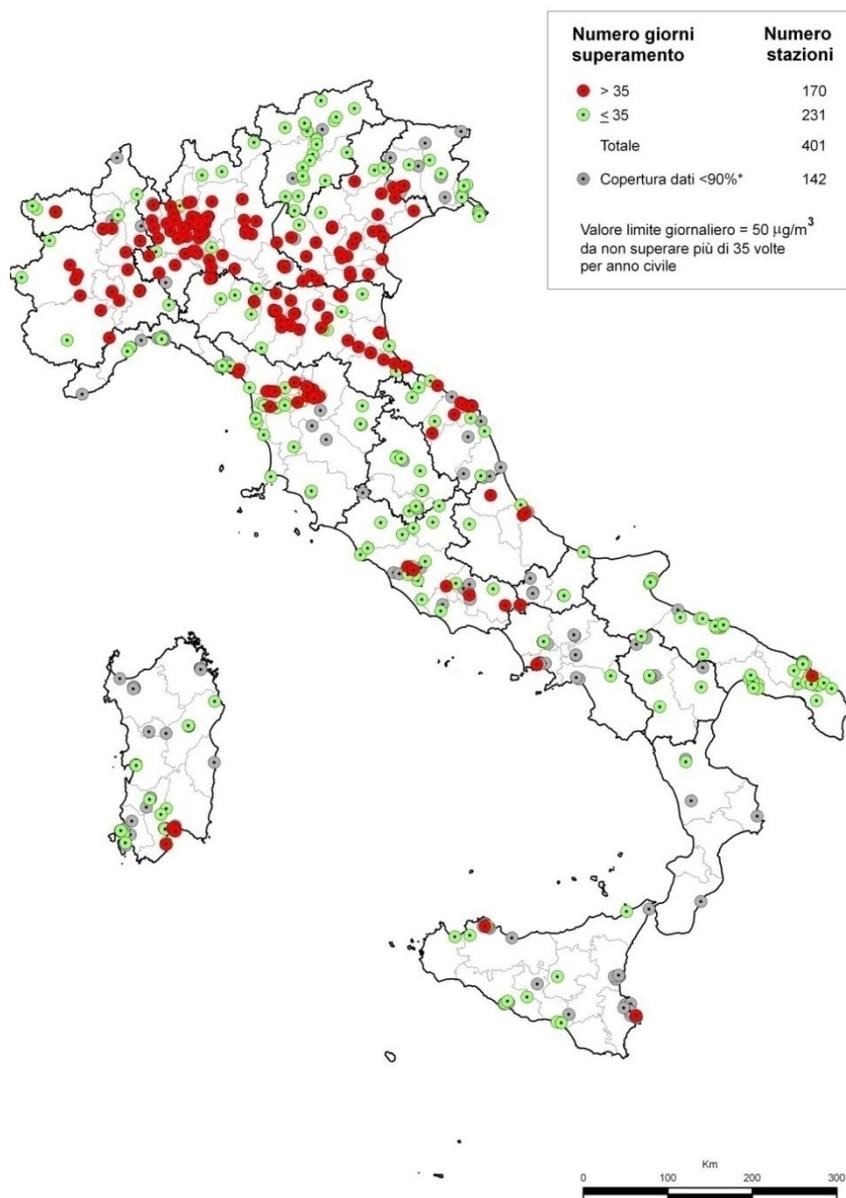
La specificità dell'area padana risiede nelle avverse condizioni di dispersione degli inquinanti atmosferici che dominano l'area e che determinano livelli di fondo, sia rurale sia urbano, piuttosto elevati ai quali si vanno ad aggiungere i contributi dovuti al traffico e ad altre sorgenti locali.

La criticità delle grandi città italiane, soprattutto dell'area padana, risulta evidente dalla Figura 3.2. Il valore limite giornaliero, più stringente rispetto a quello annuale, nel 2010 è stato superato nel 42% delle stazioni.

*PM₁₀, 2009, l'area
padana con la città
di Milano è una
delle aree critiche
dell'Europa.*

⁵ Fonte: ETC/ACM, *The state of the air quality in 2009*, Technical paper 2011/1

⁶ *Identification of critical areas for PM₁₀ and NO₂*, Umweltbundesamt, Service Request N.3 under contract ENV.C.3/FRA/2009/2008, AEA. Secondo il rapporto, le altre aree critiche sono: Athens, Greece; Kosice, Slovak Republic; Krakow, Southern Poland, Poland; Lisbon, Portugal; London, United Kingdom; Paris, France; Sofia, Bulgaria; Stuttgart, Germany



*PM₁₀, 2010, Italia:
il 42% delle stazioni
di monitoraggio
supera il valore
limite giornaliero.*

Legenda:

*la copertura dei dati al 90% è riferita al netto delle perdite di dati dovute alla taratura periodica o alla manutenzione ordinaria

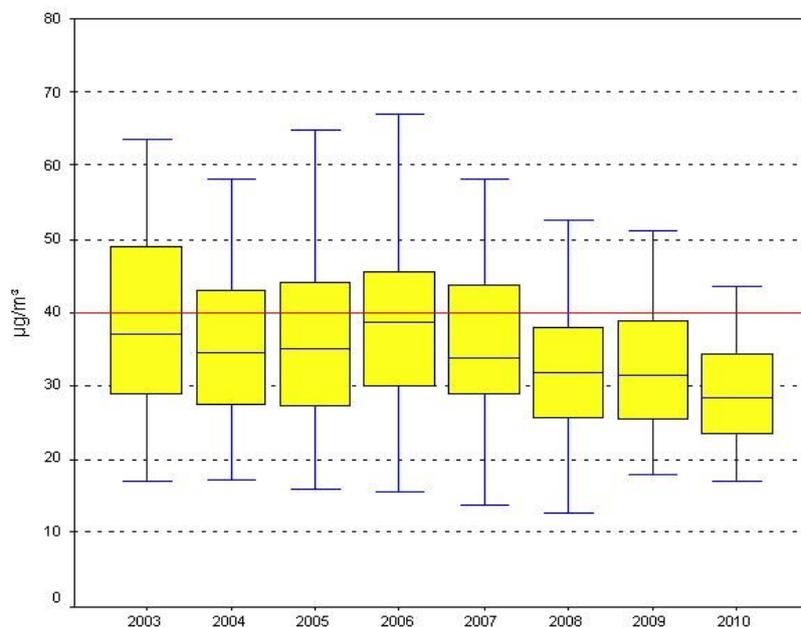
Figura 3.2: PM₁₀ - Stazioni di monitoraggio e superamento del valore limite giornaliero (2010)⁷

Nella Figura 3.3, che mostra per il PM₁₀ l'andamento dal 2003 al 2010 di alcune statistiche descrittive calcolate sulle medie annuali di un *set*⁸ di stazioni di monitoraggio distribuite su tutto il territorio nazionale, si possono cogliere deboli indicazioni di un *trend* decrescente, in particolare si osserva una netta diminuzione dei livelli massimi soprattutto a partire dal 2006 e un compattamento della gran parte dei dati misurati verso valori bassi. Per interpretare correttamente un grafico di questo tipo è importante tenere presente il ruolo fondamentale che le condizioni meteorologiche e la loro variabilità interannuale hanno nel determinare le concentrazioni degli inquinanti e le differenze che si possono registrare nel corso degli

⁷ Fonte: ISPRA

⁸ Il *set* di stazioni è selezionato sulla base di criteri omogenei di copertura temporale.

anni successivi; conseguentemente per verificare il reale miglioramento della qualità dell'aria occorre determinare la significatività del *trend* al di là dell'oscillazione interannuale dovuta alla variabilità delle condizioni meteorologiche.



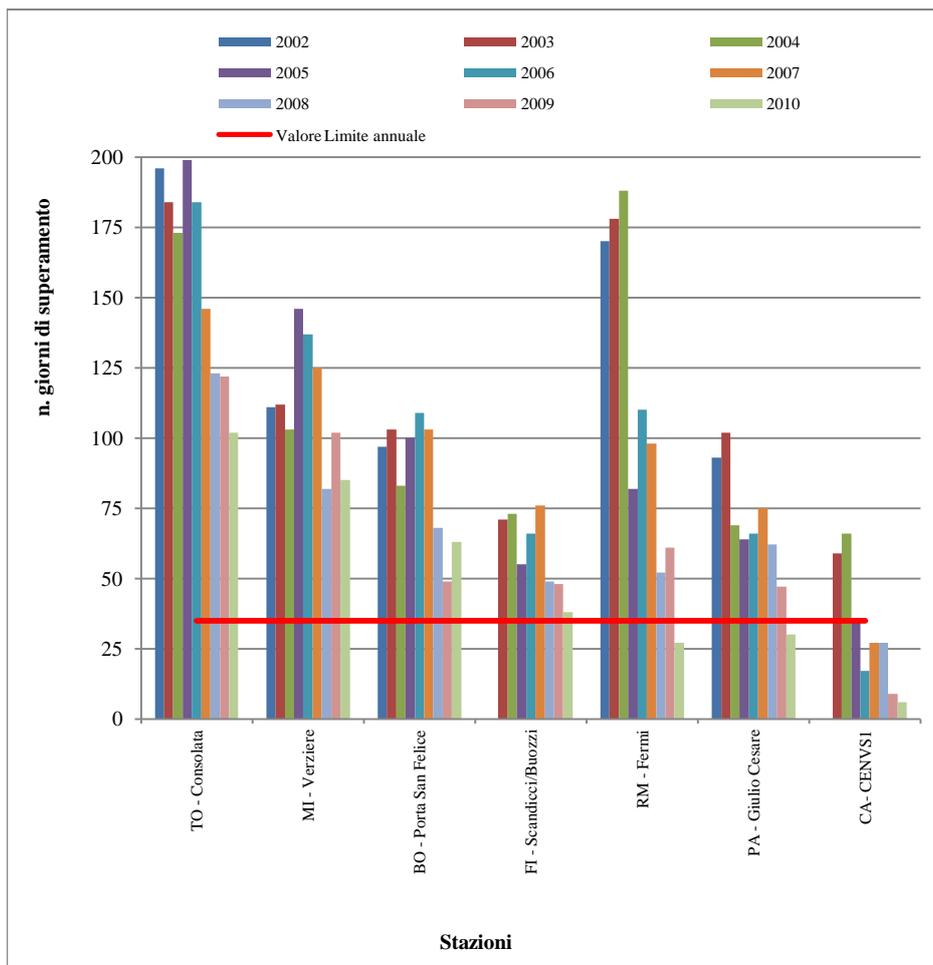
PM₁₀: dal 2003 al 2010 segnali di trend decrescente.

Figura 3.3: PM₁₀ - media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 56 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale^{9 10}

A differenza del grafico precedente, che descrive una situazione mediata su tutto il territorio nazionale, in Figura 3.4 è riportato l'andamento del numero dei giorni di superamento di alcune singole stazioni (estratte dal *set* precedentemente utilizzato) localizzate in grandi città italiane del Nord, Centro, Sud e Isole: l'andamento decrescente registrato in tutte le città esaminate è evidente.

⁹ Fonte: ISPRA

¹⁰ Il *box plot* è un metodo grafico compatto per rappresentare una distribuzione statistica. Nel grafico, la linea interna al rettangolo rappresenta la mediana, gli estremi del rettangolo rappresentano il primo quartile (25° percentile) e il terzo quartile (75° percentile). Gli estremi delle righe che si allungano dai bordi del rettangolo rappresentano rispettivamente il valore adiacente inferiore e il valore adiacente superiore. La maggior parte delle osservazioni cade all'interno dell'intervallo compreso tra questi due valori. È possibile che esistano valori al di fuori dell'intervallo delimitato dai due valori adiacenti. Questi dati sono definiti anomali o estremi e vanno analizzati separatamente per valutare le ragioni che hanno determinato tale anomalia rispetto alla distribuzione dei dati



L'andamento decrescente registrato nelle città esaminate è evidente.

Figura 3.4: PM₁₀ - andamento del numero dei giorni di superamento in alcune stazioni di monitoraggio

I dati riferiti al PM_{2,5} per il 2010 (108 stazioni di monitoraggio caratterizzate da una copertura temporale di almeno il 75%), anche se in aumento rispetto al 2009 (83), sono ancora insufficienti in termini di copertura spaziale per valutazioni accurate; comunque, nel 2010, la gran parte (82%) delle 94 stazioni con copertura temporale del 90% rispettano il valore obiettivo di 25 µg/m³ attualmente in vigore.

PM_{2,5}, Italia: informazioni in aumento.

Le principali cause dell'inquinamento atmosferico: le emissioni di PM e precursori

Per comprendere il fenomeno dell'inquinamento atmosferico, è fondamentale conoscere il carico emissivo che è la sua causa prima; per il PM è necessario considerare le emissioni e il *trend* del PM e dei suoi precursori: ossidi di zolfo e di azoto (NO_x), COV (Composti Organici Volatili) e ammoniaca.

In Europa, nel 2009, per PM₁₀ e PM_{2,5} il principale settore emissivo è il riscaldamento civile (34% e 44% rispettivamente) seguito dai trasporti su strada (14% e 16%, rispettivamente)¹¹.

PM, 2009, Europa: il principale settore emissivo è il riscaldamento civile.

¹¹ EEA, *European Union emission inventory report 1990–2009 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*, Technical report n. 9/2011

In Italia, dalle informazioni riportate nell'Inventario nazionale delle emissioni del 2009, elaborato da ISPRA¹², risulta che il settore civile è la prima sorgente di inquinamento per il PM₁₀, con un contributo del 35% sul totale; seguono i trasporti, con il 29% di cui poco più dei 2/3 provenienti da quello stradale, l'industria (16%) e l'agricoltura (11%). In particolare, circa il 91% delle emissioni di PM₁₀ da riscaldamento civile proviene dalla combustione delle biomasse.

Emissioni di PM₁₀, 2009, Italia: settore civile 35%, trasporti 29%.

Anche per il PM_{2,5} il settore civile è la principale fonte di emissione, con un contributo del 42%; segue il trasporto con il 32% (2/3 circa proviene dal trasporto stradale), l'industria (12%) e il settore relativo al trattamento e smaltimento dei rifiuti (7%).

PM_{2,5}, 2009, Italia: il principale settore emissivo è il riscaldamento civile.

Per quanto riguarda i precursori del particolato in Europa¹³ nel 2009, i trasporti, in particolare quelli stradali, sono la principale sorgente di emissione, responsabile del 42% di NO_x e del 17% dei composti organici volatili non metanici (COVNM). Le altre sorgenti principali di emissione di NO_x sono la produzione di energia elettrica e teleriscaldamento (17%), la combustione nell'industria (13%) e il settore civile (7%). Oltre ai trasporti stradali, le principali sorgenti di COVNM sono l'uso dei solventi (40%) e il settore civile (12%). Per quel che riguarda gli ossidi di zolfo (SO_x), la principale sorgente emissiva è la produzione di energia elettrica e calore, pari a circa il 52% del totale, seguita dalla combustione nell'industria (10%), dal settore civile (8%) e dalle emissioni da combustione in raffineria (7%). Le emissioni di ammoniaca (NH₃) sono invece attribuibili per circa il 94% al settore dell'agricoltura, e in particolare all'allevamento di bovini, vacche da latte e suini (56%) e all'utilizzo di fertilizzanti sintetici (20%).

Precursori di PM, 2009, Europa: i trasporti sono la principale sorgente di emissione per NO_x(42%); la produzione di energia elettrica e calore per SO_x(52%) e il settore dell'agricoltura per NH₃(94%).

Anche in Italia nel 2009 la principale fonte di emissione degli ossidi di azoto è rappresentata dai trasporti (71%), di cui quelli stradali costituiscono poco meno dei 3/4; l'industria contribuisce per il 12%; la produzione di energia e il settore civile contribuiscono entrambi per l'8%. Per i composti organici volatili non metanici, il 41% proviene dall'uso dei solventi; i trasporti contribuiscono per il 35%; il resto proviene dal settore civile (11%), industria (6%) e da altri settori minori. Le principali fonti di emissione degli ossidi di zolfo sono la produzione di energia elettrica e calore (20%), la combustione nell'industria (19%), le raffinerie (16%) e il trasporto marittimo (16%). Per quel che riguarda l'ammoniaca, il settore agricolo emette oltre il 94% delle emissioni nazionali, seguito dai trasporti su strada (3%) e dalla gestione dei rifiuti (2%).

Precursori di PM, 2009, Italia: i trasporti sono la principale sorgente di emissione per NO_x (71%) e COVNM; la produzione di energia elettrica e calore per SO_x(20%) e il settore dell'agricoltura per NH₃(94%).

L'andamento delle emissioni in Europa dal 1990 al 2009 è stato caratterizzato da forti diminuzioni. Nei Paesi dell'EU27, le emissioni di PM₁₀ e PM_{2,5} dal 2000 al 2009 sono diminuite, rispettivamente, del 14% e 20%; le diminuzioni più consistenti sono riferite alle emissioni dei precursori: NO_x -44%, COVNM -55%, SO_x -80%, NH₃ -26%.

Dal 1990 al 2009, nei Paesi EU27 sono diminuite le emissioni di NO_x, COVNM, SO_x, PM₁₀ e PM_{2,5} e NH₃.

¹² http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sinanet/serie_storiche_emissioni

¹³ EEA, *European Union emission inventory report 1990–2009 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*, Technical report n. 9/2011

In Italia sono state registrate forti riduzioni delle emissioni di PM₁₀, di SO_x di NO_x e COVNM soprattutto dalla metà degli anni '90¹⁴. Come si osserva in Figura 3.5, per gli inquinanti PM₁₀ e NO_x il maggior contributo alla diminuzione delle emissioni viene dal settore energetico e in parte dal trasporto stradale, mentre per i COVNM è il trasporto stradale che contribuisce maggiormente alla riduzione delle emissioni.

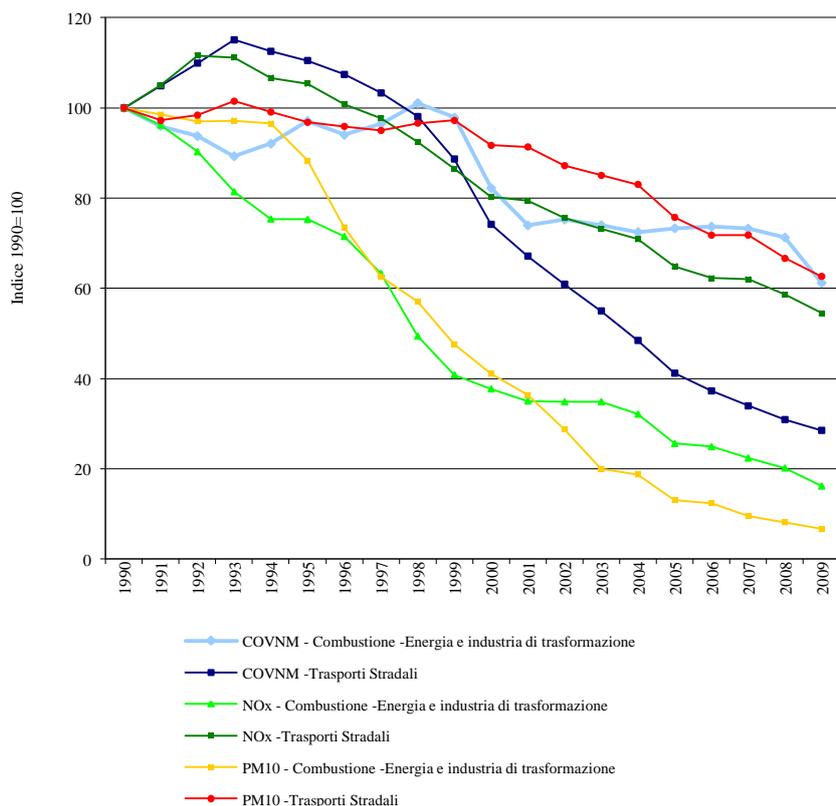
Per la riduzione delle emissioni di PM₁₀ da trasporto stradale, l'adozione nei nuovi veicoli di *standard* emissivi¹⁵, sempre più stringenti, non è stata determinante tanto quanto per gli NO_x e i COVNM poiché il rinnovo del parco automobilistico ha comportato un forte incremento di autovetture a gasolio, caratterizzate da maggiori emissioni di PM₁₀ rispetto a quelle a benzina.

Nel nostro Paese la riduzione nelle emissioni del PM₁₀ dei suoi precursori, dal 1990 al 2005, è stata registrata in tutte le regioni e province autonome, in modo più o meno elevato in considerazione della presenza o meno dei grandi impianti industriali, per i quali sono stati introdotti negli anni '90 limiti stringenti alle emissioni al camino di SO_x, NO_x e PM₁₀¹⁶.

In Italia, le forti riduzioni delle emissioni di PM₁₀ e NO_x sono dovute al settore energetico mentre per i COVNM al trasporto stradale.

Il rinnovo del parco automobilistico è stato decisivo per la riduzione delle emissioni di NO_x e COVNM.

In Italia, dal 1990 al 2005, le emissioni di PM₁₀, SO_x e NO_x sono diminuite in tutte le regioni.



Il maggior contributo alla diminuzione delle emissioni per PM₁₀ e NO_x viene dal settore energetico, per i COVNM viene dal trasporto stradale.

Figura 3.5: Andamento delle emissioni nazionali di COVNM, NO_x e PM₁₀ nel settore energetico e trasporto stradale¹⁷

¹⁴ http://www.sinanet.isprambiente.it/sinanet/serie_storiche_emissioni

¹⁵ Tali *standard* sono stati introdotti in Europa a cominciare dal 1° gennaio 1993 con la Direttiva 91/441/CE (Euro 1) fino al regolamento del 7 maggio 2007 della CE che introduce *standard* e date per Euro 5 e Euro 6

¹⁶ DM 12/07/1990, "Linee guida per il contenimento delle emissioni inquinanti degli impianti industriali e la fissazione dei valori minimi di emissione"

¹⁷ Fonte: ISPRA

Il trasporto stradale, che è stato negli ultimi tre decenni la principale risposta alla crescente richiesta di mobilità, è il maggior responsabile delle elevate concentrazioni di particolato atmosferico. Questo soprattutto nelle grandi città, dove la densità di popolazione e il trasporto raggiungono i livelli più elevati.

Nel periodo 1990-2000 la domanda di trasporto passeggeri è aumentata del 2,4% media annua (m.a.), a un tasso superiore all'incremento del PIL (+1,6% m.a., misurato a valori concatenati con anno di riferimento 2005). Nel periodo 2000-2010 tale domanda è rimasta stabile, mentre il PIL è cresciuto dello 0,4% m.a. La domanda di trasporto passeggeri è stata soddisfatta in modo preponderante dalle automobili e motocicli, che nel 2010 costituiscono l'80,6%, il cui parco circolante è in continuo aumento (2000-2010 +19,7%). Nel 2000 la sua quota era di circa l'82,2%. Nel periodo 2000-2010, le varie modalità di trasporto sono evolute in modo diverso: è diminuita la domanda del trasporto su ferro dell'1,7%, quella su automobili dell'1,9%, mentre è incrementata la domanda del trasporto delle autolinee del +10,7% e il numero degli atterraggi e decolli totali (51,6%).

Per quanto riguarda il trasporto merci, il cui andamento è più direttamente correlato a quello economico, nel periodo 1990-2000, le t-km trasportate su distanze superiori a 50 km da vettori nazionali sono cresciute dell'1,4% m.a., a un tasso leggermente inferiore a quello del PIL, includendo tutti i veicoli >3,5t l'aumento è stato del 2,9%. Nel periodo 2000-2010, le t-km trasportate da vettori nazionali su distanze > 50 km sono rimaste invariate. Se si includono i vettori esteri e tutti i veicoli >3,5t si registra un aumento dello 0,97%, un tasso più che doppio rispetto al PIL.

Nonostante le diverse revisioni nella metodologia di rilevamento dei dati, intervenute nel periodo considerato, possano aver condizionato la coerenza dei dati, i mutamenti avvenuti nella struttura dei processi di produzione (*just in time*, delocalizzazione/ frammentazione della produzione nei paesi UE27) e nei modelli di consumo hanno sicuramente influito sull'aumento, superiore alla crescita del PIL, del traffico merci negli ultimi anni. Nel 2010, il trasporto su strada (distanze superiori ai 50 km) ha assorbito il 63,3% della domanda nazionale, la ferrovia l'8,4% e il cabotaggio il 23,1%. A queste stime va aggiunta la distribuzione delle merci (trasporti su distanze inferiori a 50 km) che si svolge esclusivamente su strada. L'unica stima disponibile per valutare l'impatto della distribuzione sono le percorrenze dei veicoli leggeri, pari a circa 3 volte quelle dei veicoli che trasportano le merci su distanze >50km.

Deroga all'applicazione dei valori limite di PM₁₀

La constatazione della difficoltà nel rispettare gli obiettivi normativi nei tempi previsti da parte di molti Stati europei, ha portato all'inserimento nella Direttiva 2008/50/CE (art.22) della possibilità di chiedere una deroga all'applicazione dei valori limite del PM₁₀, (in vigore già dal 1° gennaio 2005) fino all'11 giugno 2011.

Il trasporto stradale è il maggior responsabile degli elevati livelli di PM.

2000-2010: la domanda di trasporto passeggeri è rimasta stabile. Il trasporto privato soddisfa l'80,6% della domanda.

Tra il 2000 e il 2010 il traffico merci, soprattutto su strada, è aumentato dello 0,73% m.a. (PIL +0,39%).

La deroga riguarda singole zone o agglomerati dello Stato. La concessione della deroga prevede la dimostrazione di avere già adottato *tutte le misure del caso a livello nazionale, regionale e locale* e di raggiungere i valori limite entro la nuova scadenza, eventualmente attraverso misure aggiuntive sia di carattere locale sia nazionale. La deroga per il PM₁₀ è possibile se il superamento dei valori limite è imputabile alle condizioni climatiche avverse, alle caratteristiche di dispersione specifiche del sito o all'apporto di inquinanti transfrontalieri.

In Tabella 3.1 sono riportati, per ciascuno Stato, il numero di zone in superamento per il PM₁₀ per le quali è stata richiesta la deroga e il numero di quelle a cui è stata concessa. Come si osserva, la deroga è stata accordata solo a un esiguo numero di zone in Europa¹⁸.

Tabella 3.1: Zone in superamento e in deroga¹⁹

In Europa la deroga è stata concessa solo a un esiguo numero di zone.

Stato	Totale zone in superamento	Totale zone in deroga
Austria	11	7
Belgio	11	0
Bulgaria	6	0
Cipro	1	1
Danimarca	3	0
Estonia	2	Non richiesta deroga
Finlandia	0	–
Francia	28	1
Germania	20	19
Grecia	4	0
Irlanda	0	–
Italia	79	6
Lettonia	1	0
Lituania*	2	Non richiesta deroga
Lussemburgo	0	–
Malta	1	n.d.
Paesi Bassi	9	13
Polonia	91	5
Portogallo	6	0
Regno Unito	9	1
Repubblica Ceca	13	2
Romania	11	0
Slovacchia	9	4
Slovenia	5	Non richiesta deroga
Spagna	13	1
Svezia	2	Non richiesta deroga
Ungheria	8	7

Legenda:

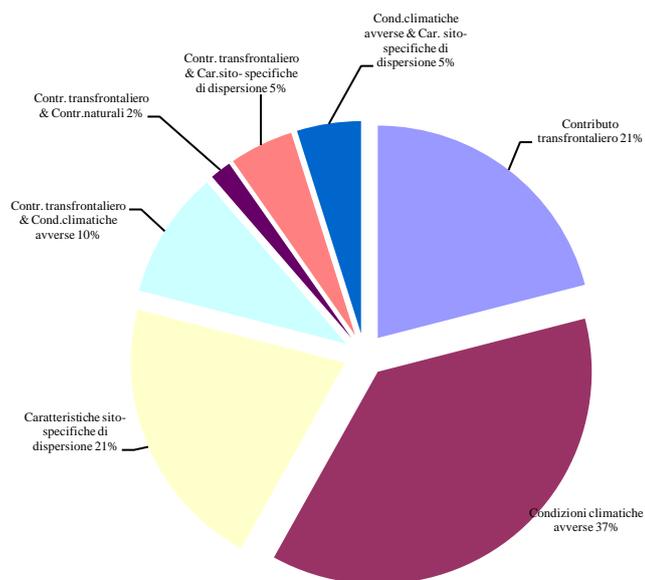
* Il superamento del VL è stato attribuito alla salatura invernale;

n.d.: dato non disponibile

¹⁸ Bonanni P., Cusano M.C., De Santis A., Sarti C., 2011. *PM₁₀ - Deroga all'applicazione dei valori limite*. Rapporti 145/2011 ISPRA

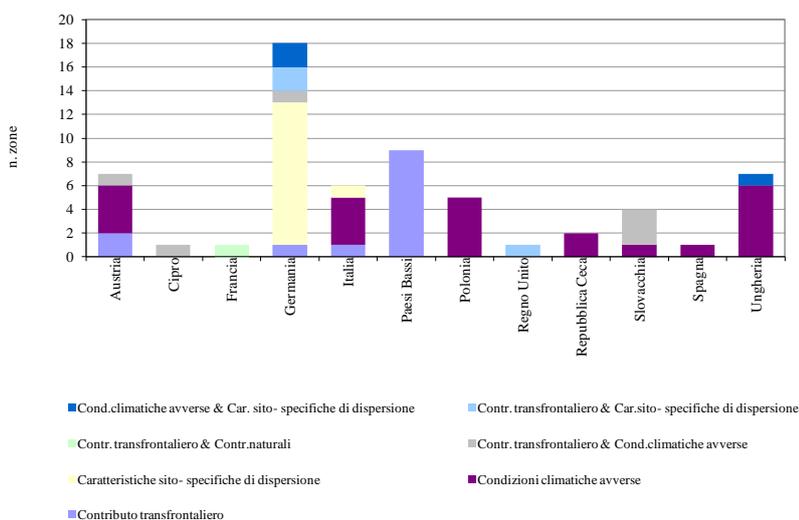
¹⁹ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati disponibili alla data del 13/04/2012 sul sito http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/time_extensions.htm

Nella gran parte delle zone in deroga (37%), i superamenti dei limiti del PM₁₀ sono stati attribuiti al persistere di condizioni meteo climatiche sfavorevoli e, a seguire, all'inquinamento transfrontaliero (21%) e alle caratteristiche di dispersione specifiche del sito (21%) (Figura 3.6a). Dal dettaglio dei singoli Stati (Figura 3.6b), si rileva che l'Italia per le zone in deroga ha individuato come cause di superamento il persistere di condizioni climatiche avverse, le caratteristiche di dispersione sito-specifiche e il contributo transfrontaliero.



Nella gran parte delle zone in deroga (37%), i superamenti dei limiti per il PM₁₀ sono stati attribuiti al persistere di condizioni climatiche sfavorevoli.

Figura 3.6a: Cause dei superamenti dei valori limite del PM₁₀ per le zone in deroga²⁰



Anche nelle zone italiane in deroga, i superamenti dei limiti per il PM₁₀ sono stati attribuiti al persistere di condizioni meteo climatiche sfavorevoli, alle caratteristiche di dispersione sito-specifiche e al contributo transfrontaliero.

Figura 3.6b: Cause dei superamenti dei valori limite del PM₁₀ nelle zone in deroga per Stato membro²¹

²⁰ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati disponibili alla data del 13/04/2012 sul sito http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/time_extensions.htm

²¹ Fonte: *Ibidem*

Il fatto che la quasi totalità degli Stati membri non sia riuscita a rispettare, nei tempi stabiliti, i limiti fissati per il PM₁₀ dimostra che le politiche attuate, sia a livello europeo sia nazionale, non hanno prodotto i risultati attesi.

Alcuni dei principali motivi che non hanno consentito il rispetto dei limiti fissati per il PM₁₀²² sono: l'aumento del numero di veicoli circolanti, il ricambio del parco veicolare più lento del previsto e le maggiori emissioni dei veicoli rispetto ai limiti prescritti dagli *standard* di omologazione (Euro 3, 4 e 5).

Altro elemento che ha ostacolato il rispetto dei limiti è stata la mancata integrazione fra le azioni in materia di inquinamento atmosferico e di cambiamenti climatici.

Un esempio è la promozione delle biomasse come combustibili per la riduzione delle emissioni di gas serra, che sono un'importante fonte di PM₁₀ primario.

Come già mostrato in Tabella 3.1, per l'Italia la deroga, su un totale di 79 richieste, è stata concessa per 6 zone.

In Figura 3.7 sono rappresentati i comuni italiani interessati dai superamenti dei valori limite del PM₁₀ nel 2005 (anno di entrata in vigore dei nuovi limiti) e in Figura 3.8 sono riportate le 6 zone (situate in Valle d'Aosta, Umbria, Marche, Lazio e Campania) per le quali è stata concessa la deroga all'applicazione dei valori limite del PM₁₀.

La superficie delle zone a cui è stata concessa la deroga è pari a circa il 3% della superficie in superamento.

L'Italia ha ottenuto la deroga solo per 6 zone su 79 richieste.

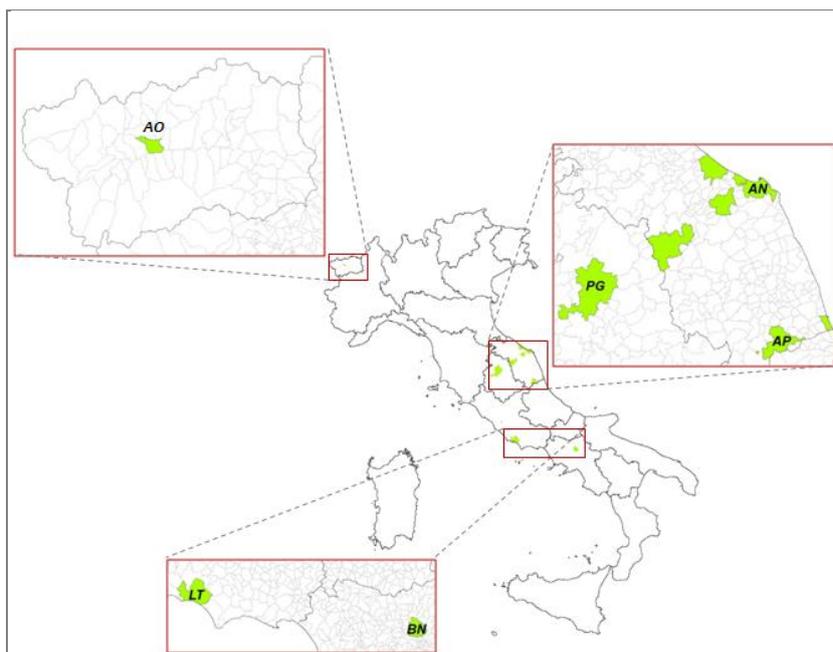


Comuni interessati dai superamenti.

Figura 3.7: Comuni del territorio nazionale in cui sono stati registrati superamenti dei valori limite fissati per il PM₁₀ (2005)²³

²² Commission staff working paper on the implementation of EU Air Quality Policy and preparing for its comprehensive review, SEC (2011) 342

²³ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome



Le 6 zone per le quali è stata concessa la deroga sono in Valle d'Aosta, Umbria, Marche, Lazio e Campania.

Figura 3.8: Zone per le quali è stata concessa la deroga all'applicazione dei valori limite per il PM₁₀²⁴

Al fine di predisporre la richiesta di deroga è stato necessario fare una serie di valutazioni, tra cui individuare le sorgenti di inquinamento all'origine delle concentrazioni registrate, stimare le concentrazioni previste alla nuova data di scadenza senza e con misure aggiuntive, che ha visto impegnati amministratori ed esperti a livello regionale e nazionale.

Di seguito verranno illustrati i risultati di tali valutazioni, trasmessi dall'Italia alla Commissione Europea nel formato stabilito²⁵.

La Figura 3.9 mostra la stima²⁶ dei contributi transfrontaliero, nazionale e naturale, ai livelli di fondo regionale²⁷ di PM₁₀ utilizzata dalle regioni nell'ambito della pianificazione regionale delle politiche di risanamento e della richiesta di deroga (le voci Altro e Naturale²⁸ sono state estrapolate dal contributo nazionale).

²⁴ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati disponibili alla data del 13/04/2012 sul sito http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/time_extensions.htm

²⁵ Staff working paper accompanying the communication from the Commission on notifications of postponements or attainment deadlines and exemptions from the obligation to apply certain limit values pursuant to article 22 of directive 2008/50/ec on ambient air quality and cleaner air for Europe (COM(2008)403final)

²⁶ Per tale stima è stato utilizzato il sistema modellistico sviluppato dall'ENEA su mandato del Ministero dell'Ambiente sviluppato nell'ambito del progetto MINNI, Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'inquinamento atmosferico

²⁷ Il livello di fondo regionale è il livello stimato in assenza di fonti di emissione in un raggio di circa 30 km. Per i siti all'interno di una città, questo livello corrisponde al livello di fondo esistente in assenza della città. (Notes on the Form 3A _staff working paper accompanying the Bruxelles, 26/06/2008 SEC(2008) 2132)

²⁸ Ai sensi della Direttiva 2008/50/CE (art. 20) nei casi in cui sia adeguatamente dimostrato che un superamento dei valori limite per un determinato inquinante sia imputabile a fonti naturali, detto superamento non è considerato tale ai fini della direttiva stessa

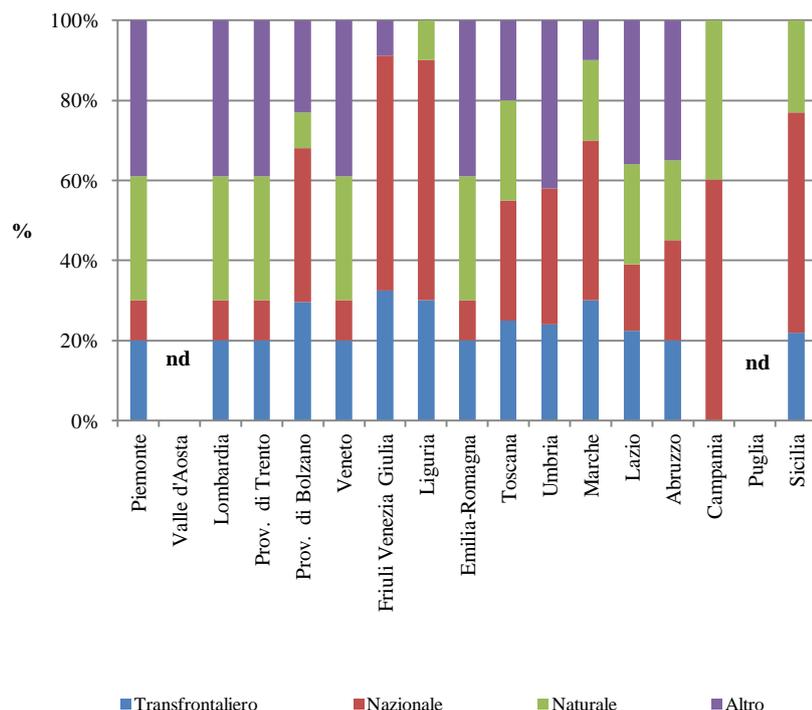


Figura 3.9: Contributo transfrontaliero, nazionale e naturale alle concentrazioni di PM_{10} ²⁹

Dalla Figura 3.10, che mostra i contributi dei diversi settori³⁰ ai livelli di fondo urbano³¹ di PM_{10} , risulta evidente l'impatto su scala urbana dei trasporti, delle attività produttive e del settore residenziale e commerciale, che contribuiscono in media alle emissioni totali regionali di PM_{10} per il 75%.

²⁹ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

³⁰ Regioni e province autonome hanno utilizzato i dati degli inventari regionali delle emissioni relativi al 2005 per il PM_{10} (in mancanza di un inventario regionale, è stato utilizzato l'inventario nazionale elaborato da ISPRA, disaggregato a livello provinciale, relativo all'anno 2005) e al 2010 per l' NO_2

³¹ Il livello di fondo urbano o totale, che comprende il livello di fondo regionale, è il livello che si prevede in assenza di fonti locali

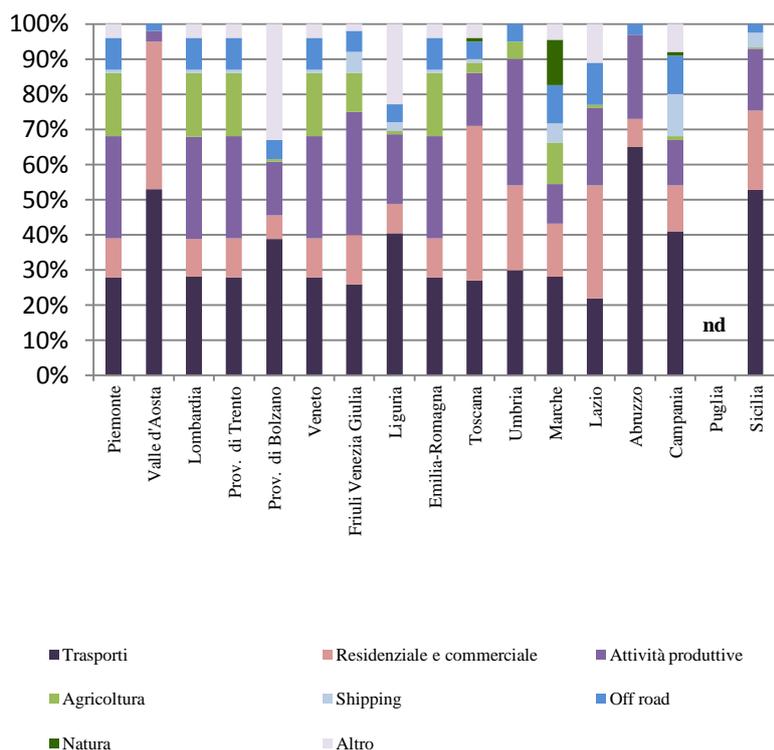
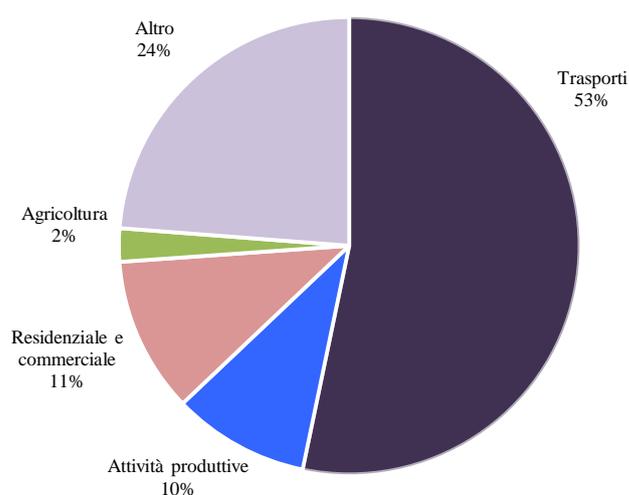


Figura 3.10: Contributi su scala urbana per settore alle concentrazioni di PM₁₀³²

Oltre alle misure previste nei piani di risanamento della qualità dell'aria, regioni e province autonome hanno dovuto individuare un set di misure aggiuntive ai fini del raggiungimento dei valori limite di PM₁₀ entro la nuova scadenza. In Figura 3.11 si riporta la distribuzione settoriale delle misure aggiuntive suddette.



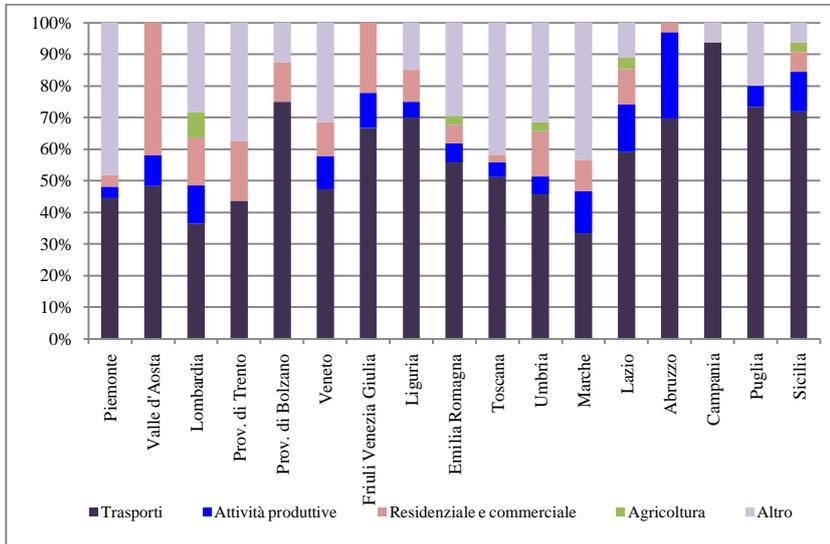
La maggior parte delle misure individuate ai fini del raggiungimento dei Valori Limite di PM₁₀ interessa il settore dei trasporti.

Figura 3.11: Ripartizione settoriale delle misure aggiuntive previste per il raggiungimento dei valori limite del PM₁₀³³

³² Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

³³ Fonte: *Ibidem*

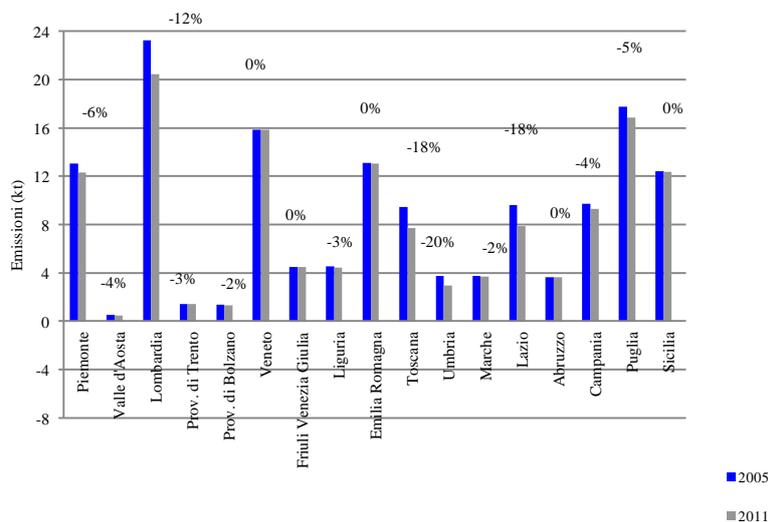
La maggior parte delle misure aggiuntive, analogamente alle misure previste nei piani di risanamento, ha interessato il settore dei trasporti (promozione e diffusione di mezzi di trasporto pubblico e privato a basso impatto ambientale ed interventi a favore della mobilità alternativa). Il dettaglio regionale è in Figura 3.12.



L'analisi delle misure aggiuntive a livello regionale evidenzia una preponderanza di interventi che riguardano il settore trasporti.

Figura 3.12: Ripartizione settoriale delle misure di risanamento previste, per regione/provincia autonoma³⁴

La riduzione delle emissioni di PM₁₀ prevista per il 2011 rispetto al 2005 a seguito dell'applicazione di tali misure si riporta in Figura 3.13.



Stima della riduzione delle emissioni di PM₁₀ prevista al 2011.

Figura 3.13: Stima della riduzione delle emissioni di PM₁₀ prevista al 2011³⁵

³⁴ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

³⁵ Fonte: *Ibidem*

Impatto sulla salute

L'evidenza scientifica relativa agli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana si è fortemente consolidata negli ultimi anni. Numerosi studi epidemiologici hanno documentato un ampio spettro di esiti sanitari, acuti e cronici, che vanno dai sintomi respiratori alla morbosità e mortalità per cause cardiologiche, respiratorie e tumorali. Gli effetti sulla salute sono inoltre coerentemente osservati in relazione ai livelli di concentrazione di inquinanti ai quali sono esposte popolazioni urbane in diverse parti del mondo, sia in paesi sviluppati sia in via di sviluppo. Nel contempo, i risultati di molteplici studi clinici e tossicologici hanno fornito informazioni rilevanti sui possibili meccanismi d'azione attraverso cui gli inquinanti espletano i loro effetti sulla salute umana, rafforzando la plausibilità biologica delle associazioni osservate in ambito epidemiologico.

La crescente disponibilità e ricchezza di informazioni sui livelli di contaminanti ambientali, su stime di esposizione umana, sui dati sanitari e sulle relazioni esposizione-risposta per le associazioni di interesse, consente oggi di quantificare impatti sanitari di entità notevole. Risultato, d'altra parte, non sorprendente viste le caratteristiche di ampia diffusione dell'inquinamento atmosferico e le dimensioni delle popolazioni esposte. L'Organizzazione Mondiale della Sanità³⁶ già nel 2006 ha evidenziato che la riduzione dei livelli atmosferici medi annuali di PM₁₀ da 70 a 20 µg/m³ (o di PM_{2,5} da 35 a 10 µg/m³) permetterebbe di ridurre del 15% il numero di decessi dovuti all'inquinamento atmosferico (Tabella 3.2).

OMS, 2006: la riduzione dei livelli atmosferici medi annuali di PM₁₀ da 70 a 20 µg/m³ (o di PM_{2,5} da 35 a 10 µg/m³) permetterebbe di ridurre del 15% il numero di decessi dovuti all'inquinamento atmosferico.

Tabella 3.2: Valori obiettivo ed obiettivi intermedi per il particolato atmosferico (livelli medi annuali) delle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità sulla qualità dell'aria³⁷

	PM₁₀ (µg/m³)	PM_{2,5} (µg/m³)	Razionale per la scelta del livello
Obiettivo intermedio 1	70	35	Questi livelli sono associati con un aumento di rischio di mortalità a lungo termine circa il 15% più alto rispetto ai valori obiettivo WHO-AQG
Obiettivo intermedio 2	50	25	In aggiunta agli altri benefici sanitari, questi livelli abbassano il rischio di mortalità prematura di circa il 6% (2-11%) rispetto all'obiettivo intermedio 1
Obiettivo intermedio 3	30	15	In aggiunta agli altri benefici sanitari, questi livelli riducono il rischio di mortalità di circa il 6% (2-11%) rispetto all'obiettivo intermedio 2
Valori obiettivo WHO-AQG	20	10	

³⁶ WHO-AQG, 2006, *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005*. WHO Press, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland © World Health Organization 2006

³⁷ Fonte: WHO-AQG, 2006

L'inquinamento atmosferico è dunque uno dei principali fattori di rischio ambientale di origine antropica e deve la sua importanza sanitaria oltre che alla tossicità di molti dei suoi costituenti, anche alle caratteristiche di elevata diffusione che lo rendono un tema rilevante a livello locale, regionale e planetario. A causa del grande numero di persone esposte agli inquinanti atmosferici, soprattutto in ambiente urbano, l'impatto sanitario può essere elevato anche quando i rischi per l'insorgenza di specifici effetti sulla salute sono di modesta entità.

Con "impatto sanitario" di un inquinante atmosferico si intende, dunque, la proporzione di effetti (sintomi respiratori, eventi di mortalità o di morbosità) osservati nella popolazione di una determinata area che si riuscirebbe a prevenire se i livelli attuali dell'inquinante fossero ridotti a un *livello di riferimento* (es. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} , la riduzione del 10% delle concentrazioni medie del PM_{10} in una città).

Il PM_{10} e il $\text{PM}_{2,5}$, tra gli inquinanti di interesse sanitario (gli altri sono il monossido di carbonio, il biossido di azoto e l'ozono) rappresentano gli indicatori sintetici maggiormente impiegati per la stima dell'impatto sanitario dell'inquinamento atmosferico, in quanto fortemente correlati a molti altri composti gassosi e sono, tuttora, tra gli inquinanti più frequentemente associati a una lunga serie di esiti sanitari, che vanno dai sintomi respiratori acuti alla mortalità per effetti cronici. Queste associazioni sono verosimilmente dovute anche alla specifica composizione chimica del particolato, che può contenere sia sostanze organiche sia inorganiche quali idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e metalli, le cui proprietà chimico-fisiche, tossicologiche, ed in alcuni casi cancerogene, le rendono particolarmente pericolose per la salute.

Nel 2002 l'OMS³⁸, su mandato del Ministero dell'ambiente, ha stimato per la prima volta l'impatto sanitario dell'inquinamento atmosferico sulla popolazione delle 8 maggiori città italiane (circa 8 milioni di abitanti), basato sui dati di monitoraggio delle centraline urbane del biennio 1998-1999. Usando il PM_{10} come inquinante di riferimento, lo studio ha stimato che circa 3.500 decessi e 31.000 casi di bronchite cronica nell'infanzia si sarebbero potuti prevenire se la media annua delle concentrazioni di PM_{10} non avesse superato il valore di 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, quando invece la media di PM_{10} pesata sulla popolazione risultava pari a 52,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'inquinamento atmosferico è uno dei principali fattori di rischio ambientale di origine antropica.

L'impatto sanitario di un inquinante è la proporzione di effetti osservati nella popolazione di una determinata area che si riuscirebbe a prevenire se i livelli dell'inquinante fossero ridotti a un livello di riferimento.

PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$, sono tra gli inquinanti più frequentemente associati a una lunga serie di esiti sanitari.

Nel biennio 1998-1999, in 8 città italiane l'OMS ha stimato la riduzione di decessi e di casi di bronchite cronica nell'infanzia se la media annua di PM_{10} non avesse superato i 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

³⁸ Martuzzi M, Galassi C, Ostro B, Forastiere F, Bertollini R. (2002). *Health impact assessment of air pollution in the eight major Italian cities*. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, (EURO/02/5040650)

Un aggiornamento del precedente studio è stato condotto nel 2006³⁹ è stato condotto in 13 principali città italiane su una popolazione totale di circa 9 milioni di abitanti, il 16% della popolazione nazionale. L'indagine si è basata sui dati di monitoraggio relativi al periodo 2002–2004, con una media pesata sulla popolazione delle 13 città pari a 45,3 µg/m³.

Lo studio ha stimato che il solo rispetto del valore medio annuale di concentrazione di 40 µg/m³ per il PM₁₀, fissato dalla direttiva del 1999, avrebbe potuto comportare una riduzione di 3.321 decessi attribuibili al PM₁₀ e, inoltre, consentire una riduzione del 9,5% delle ospedalizzazioni per bronchiti acute nei bambini sotto i 15 anni.

La quantificazione degli effetti è notevolmente maggiore se si considera come valore di riferimento 20 µg/m³. In particolare, una media di 8.220 decessi l'anno risultavano attribuibili a concentrazioni di PM₁₀ superiori ai 20 µg/m³.

Tale stima equivale al 9% della mortalità per tutte le cause, escludendo gli incidenti, nella popolazione oltre i 30 anni.

L'impatto a lungo termine sulla mortalità includeva anche il tumore polmonare (742 casi l'anno), l'infarto (2.562 casi l'anno) e l'ictus (329 casi l'anno).

Per quanto concerne gli effetti a breve termine (entro una settimana dopo l'esposizione), l'impatto del PM₁₀ superiore ai 20 µg/m³ era di 1.372 decessi equivalenti all'1,5% della mortalità nell'intera popolazione studiata.

Da uno studio ISPRA volto alla valutazione dell'esposizione a PM₁₀ in alcune città italiane, risulta che la popolazione esposta a concentrazioni inferiori al valore limite annuale (40 µg/m³) è passata dal 66% nel 2006 all'83% nel 2009, raggiungendo il 100% nel 2010.

Se si considera il valore obiettivo raccomandato dalle linee guida dell'OMS per la qualità dell'aria (20 µg/m³), circa il 91% della popolazione presa in esame risulta comunque esposta a livelli superiori.

Dai risultati dell'indagine (circa il 44% della popolazione analizzata risulta esposta a concentrazioni superiori ai 30 µg/m³) si può stimare che circa il 40% della popolazione è esposta a concentrazioni superiori al valore limite giornaliero.

L'andamento dell'esposizione al PM₁₀ della popolazione al di sotto dei 20 anni è analogo a quello della popolazione totale⁴⁰.

A livello europeo, il programma *Clean Air For Europe* (CAFE) dell'Unione Europea, ha stimato, per il 2000, circa 348.000 morti premature attribuibili alle emissioni antropogeniche di particolato primario e dei suoi precursori⁴¹.

Lo studio, convertendo i valori di concentrazione del PM₁₀ e del particolato totale sospeso (TSP) nella metrica del PM_{2,5}, ha stimato

Dal 2002 al 2004, in 13 città italiane l'OMS ha stimato che il rispetto del valore medio annuale di 40 µg/m³ di PM₁₀, avrebbe potuto comportare una riduzione di 3.321 decessi.

Da uno studio ISPRA svolto su alcune città italiane, risulta che la quasi totalità della popolazione indagata è stata esposta nel 2010 a livelli superiori ai 20 µg/m³ (valore obiettivo raccomandato dall'OMS).

Il programma CAFE ha stimato nell'UE, per il 2000, circa 348.000 morti premature attribuibili alle

³⁹ Martuzzi M. Mitis F. Iavarone I. Serinelli M., *Health impact of PM₁₀ and ozone in 13 Italian cities*, World Health Organization-Regional Office for Europe. Copenhagen 2006. Disponibile presso: www.euro.who.int/document/e88700.pdf

⁴⁰ Per dettagli e approfondimenti sullo studio: ISPRA, *Annuario dei Dati Ambientali*, Capitolo Ambiente e benessere, ed. 2011

⁴¹ Amann M. et al. (2005). *Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme*

nel 2000 una perdita di 9 mesi di vita attribuibile alle polveri fini in Italia (paragonata a una perdita di 8,6 mesi in Europa).

Le stime effettuate mostrano, inoltre, che se fossero attuate le politiche previste dalla Comunità Europea per ridurre le emissioni di polveri sospese, entro il 2020 potrebbero essere risparmiati 3,2 mesi di vita per ogni cittadino europeo e 3,4 mesi di vita per un Italiano.

Ciò consentirebbe di risparmiare 80.000 morti premature e più di un milione di anni di vita nei Paesi della UE, in Italia questo significa circa 12.000 morti premature in meno e 170.000 anni di vita in più.

L'implementazione delle politiche per la riduzione delle emissioni determinerebbe anche importanti risparmi economici.

Nell'UE si è stimato un vantaggio monetario annuo compreso tra i 58 e i 161 miliardi di euro evitando la mortalità prematura, mentre con la diminuzione delle malattie dovute al particolato atmosferico si risparmierebbero intorno ai 29 miliardi di euro l'anno.

In Italia le cifre relative oscillerebbero da 9 a 23 miliardi di euro l'anno e fino a 5 miliardi di euro l'anno, rispettivamente⁴².

Nel 2009, nei Paesi dell'Unione Europea circa il 20% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori al valore limite giornaliero per il PM₁₀. Nel periodo 1997-2008 la percentuale di popolazione urbana esposta varia tra il 18 e il 49% mentre in riferimento al valore riportato nelle linee guida dell'OMS (20 µg/m³) la percentuale di esposizione cresce per lo stesso periodo all'80-90%⁴³. In particolare, nel 2005 è stato stimato⁴⁴ che circa il 28% della popolazione europea è stata esposta, per più di 35 giorni, a concentrazioni di PM₁₀ superiori a 50 µg/m³. La probabilità di superamenti del limite giornaliero di 50 µg/m³ è risultata maggiore del 75% nei Paesi dell'Europa dell'Est e nell'intera Pianura padana, mentre è compresa tra il 50 e il 75% nelle aree urbanizzate della Spagna, Portogallo, Grecia, Italia, in alcuni Paesi balcanici, Belgio e Olanda. Nel complesso dei Paesi dell'Unione Europea è stato stimato un numero medio di morti premature pari a 830 per milione di abitanti, che corrisponde a un totale di 373.000 decessi prematuri.

Due recenti programmi di valutazione di impatto sanitario a livello europeo, i cui risultati sono stati resi disponibili nel 2011 e alla cui realizzazione ha partecipato anche l'Italia, sono il progetto APHEKOM (Approfondimento della conoscenza e della comunicazione per i processi decisionali su inquinamento atmosferico

emissioni antropogeniche di particolato primario e precursori.

Nel 2009, nei Paesi dell'UE il 20% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori al valore limite giornaliero per il PM₁₀. Nel periodo 1997-2008, la percentuale di popolazione urbana esposta a livelli superiori al valore limite giornaliero, varia tra il 18 e il 49%; mentre in riferimento al valore riportato nelle linee guida dell'OMS (20 µg/m³) cresce all'80-90%.

⁴² Comunicato Stampa OMS, EURO/08/05. L'Italia può risparmiare fino a 28 miliardi di euro l'anno riducendo le morti per inquinamento atmosferico. Berlino, Copenhagen, Roma, 22 giugno 2005.

⁴³ EEA, *Air quality in Europe – 2011 report*, Technical report 12/2011

⁴⁴ EEA, 2009, *Spatial assessment of PM₁₀ and ozone concentrations in Europe (2005)*. EEA Technical report 1/2009

e salute in Europa)⁴⁵ e il progetto EBoDE (Carico ambientale di patologie nella regione europea)⁴⁶. Questi progetti hanno messo in luce l'elevato impatto economico e sanitario dell'esposizione umana ai contaminanti emessi nell'atmosfera.

Lo studio APHEKOM, che ha riguardato 25 grandi città, per una popolazione complessiva di circa 39 milioni, utilizzando la metodologia propria della Valutazione di Impatto Sanitario (VIS), ha mostrato che il rispetto dei valori guida della qualità dell'aria proposti dall'OMS per il PM₁₀ (20 µg/m³ come media annuale) consentirebbe di prevenire ogni anno più di 2.500 ricoveri ospedalieri per malattie cardiache, più di 5.300 per patologie respiratorie e di evitare 2.200 morti premature.

La diminuzione fino a 10 µg/m³ nella concentrazione del PM_{2,5} (livello medio annuale delle linee guida OMS) potrebbe, inoltre, produrre un aumento fino a 22 mesi nell'aspettativa di vita delle persone sopra i 30 anni evitando circa 19.000 decessi per anno, dei quali più di 15.000 dovuti a malattie cardiovascolari.

Dal punto di vista economico, i benefici complessivi risultanti dalla conformità ai valori guida dell'OMS ammonterebbero a circa 31,5 miliardi di euro annui, includendo i risparmi sulle spese sanitarie, sulle assenze sul lavoro e i costi immateriali quali il benessere e la qualità della vita.

Per quanto riguarda la situazione italiana, se in una città come Roma, ad esempio, la concentrazione media annuale di PM_{2,5} venisse ridotta a 10 µg/m³, sarebbe possibile scongiurare 1.278 decessi (di cui 997 per cause cardiovascolari) e la popolazione di 30 anni guadagnerebbe un anno di vita, con un beneficio economico complessivo superiore ai 2 miliardi di euro.

Secondo un'ulteriore stima di impatto, calcolata sempre nell'ambito dello studio APHEKOM per 10 città europee, risiedere in prossimità di strade ad alta densità di traffico potrebbe essere responsabile del 15% di casi di asma nei bambini e, verosimilmente, della stessa percentuale, o più alta, di altre patologie croniche comuni negli adulti di 65 anni e oltre, quali le malattie coronariche e polmonari.

A Roma il 23% dei residenti vive a meno di 75 metri da una strada ad alto traffico. I risultati dello studio mostrano che l'11% dei casi di aggravamento di asma nei bambini, il 18% di problemi acuti negli anziani affetti da bronco pneumopatia cronico ostruttiva e il 23% di problemi acuti negli anziani malati di malattie coronariche possono essere attribuiti al forte inquinamento dell'area di residenza.

Lo studio APHEKOM (25 grandi città europee) ha mostrato che il rispetto dei valori guida OMS per il PM₁₀ consentirebbe una riduzione dei ricoveri ospedalieri per malattie cardiache, delle patologie respiratorie e delle morti premature.

La conformità ai valori guida OMS comporterebbe notevoli benefici economici.

A Roma, una media annuale di PM_{2,5} di 10 µg/m³ eviterebbe 1.278 decessi, con l'aumento di un anno di vita per la popolazione di 30 anni e un beneficio economico sopra i 2 miliardi di euro.

A Roma il 23% dei residenti vive a meno di 75 metri da una strada ad alto traffico.

⁴⁵ APHEKOM, 2011, - *Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe* - www.aphekom.org. Summary report of the Aphekom project 2008-2011 (disponibile presso: http://www.invs.sante.fr/presse/2011/communiqués/cp_aphekom_010311/Aphekom_summary_report.pdf)

⁴⁶ EBoDE, 2011, *Environmental Burden of Disease in European Region*. Jantunen M, Kollanus V, Leino O et al., 2011. *European perspectives on Environmental Burden of Disease: Estimates for nine stressors in six countries*. THL Reports 1/2011, Helsinki, Finland. 86 pp + 2 appendixes. - <http://en.opasnet.org/w/Ebode> (disponibile presso: <http://www.thl.fi/thl-client/pdfs/b75f6999-e7c4-4550-a939-3bccb19e41c1>)

Il processo di stima del carico di patologie associato all'esposizione a inquinanti ambientali (*Environmental Burden of Disease*, EBD⁴⁷) sviluppato nell'ambito del progetto europeo EBoDE, si inserisce nel quadro delle attività previste dalla VIS.

Gli obiettivi del progetto sono l'aggiornamento dei precedenti studi volti a stimare il carico di malattie (EBD) dovuto all'esposizione a inquinanti ambientali, individuando alcuni contaminanti più rilevanti per la regione europea e l'impiego di una metodologia per la stima del carico di patologie armonizzata nei paesi partecipanti, per renderla disponibile e, quindi, favorire la futura inclusione di altre nazioni.

Il progetto ha riguardato 6 Paesi (Belgio, Finlandia, Francia, Germania, Italia e Paesi Bassi) e 9 fattori di rischio (benzene *indoor*, fumo passivo, formaldeide, piombo e diossine ematici, rumore, radon, ozono e particolato atmosferico), selezionati in base alla rilevanza per la salute pubblica, al potenziale elevato rischio a essi associato, al grado di attenzione e/o al possibile elevato impatto in termini economici.

I risultati mostrano che il PM_{2,5} è associato al peso più alto di carico sanitario (seguito da fumo passivo, rumore e radon).

Prendendo come riferimento i dati ambientali del 2005, al PM_{2,5} risultano attribuibili tra 6.000 e 10.000 anni di *vita sana* persi per milione di abitanti l'anno nei sei Paesi partecipanti, con una stima di più di 9.000 anni persi per l'Italia.

Il carico di malattia riguarda un ampio spettro di effetti, dalla mortalità cardio-polmonare e per tumore del polmone, alla bronchite cronica (BPCO) e ai giorni di ridotta attività (Rad).

I risultati del progetto europeo EBoDE mostrano che il fattore di rischio PM_{2,5} è associato al peso più alto di carico sanitario.

Ozono

L'ozono (O₃) troposferico⁴⁸ è un inquinante secondario che si forma attraverso processi fotochimici in presenza di inquinanti primari quali gli ossidi d'azoto e i composti organici volatili. È il principale rappresentante della complessa miscela di sostanze denominata "*smog fotochimico*". L'inquinamento fotochimico, oltre che locale, è un fenomeno transfrontaliero che si dispiega su ampie scale spaziali. Le concentrazioni di ozono più elevate si registrano nei mesi più caldi dell'anno e nelle ore di massimo irraggiamento solare. Nelle aree urbane l'ozono si forma e si trasforma con grande rapidità, con un comportamento molto complesso e diverso da quello degli altri inquinanti.

⁴⁷ L'*Environmental Burden of Disease* (EBD) viene adottato per quantificare il ruolo dei fattori ambientali come determinanti dello stato di salute delle popolazioni e per orientare le azioni di sanità pubblica in campo ambientale.

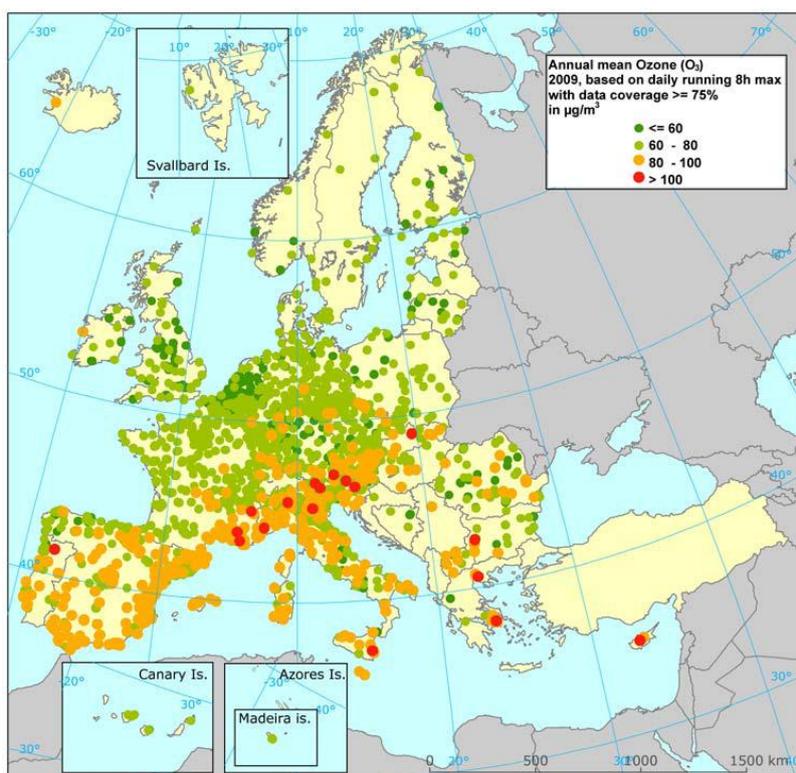
L'OMS nell'ambito del Programma di stima dell'impatto dell'ambiente sulla salute umana ha predisposto linee guida *ad hoc* e ha calcolato l'EBD per molteplici fattori di rischio (http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/en/). L'EBD è uno strumento che consente di confrontare con la stessa unità di misura il peso di effetti sanitari diversi, associati a molteplici fattori ambientali, in popolazioni diverse. L'EBD è infatti stimato attraverso un parametro, il DALY (*Disability Adjusted Life Years*), che prescinde dal tipo di effetto studiato e dal determinante ambientale, in quanto misura gli anni di *vita sana* persi a causa di diverse condizioni patologiche per specifici livelli di esposizione. Il DALY unisce due indicatori: gli anni di vita persi a causa di morte prematura e gli anni vissuti con disabilità. Un DALY equivale a un anno di *vita sana* perso.

⁴⁸ L'ozono troposferico è un inquinante presente nella troposfera, da confondere con l'ozono stratosferico, presente nella stratosfera come componente naturale.

Le principali fonti di emissione dei composti precursori dell'ozono sono: il trasporto su strada, il riscaldamento civile e la produzione di energia. L'ozono può causare seri problemi alla salute dell'uomo e all'ecosistema, nonché all'agricoltura e ai beni materiali.

Lo stato della qualità dell'aria: livelli atmosferici di ozono

La Figura 3.14, che descrive la situazione europea dei livelli atmosferici di ozono aggiornata al 2009⁴⁹, mostra chiaramente un gradiente Nord-Sud con le concentrazioni più elevate nei Paesi mediterranei. A differenza degli altri inquinanti, le concentrazioni più elevate di ozono si registrano generalmente nelle stazioni rurali⁵⁰, e anche nelle stazioni ad alta quota.



*Ozono, 2009,
Europa: le
concentrazioni più
elevate si
riscontrano nei
Paesi mediterranei.*

Figura 3.14: O₃ - Valore medio annuale delle medie massime giornaliere su 8 ore (2009)⁵¹

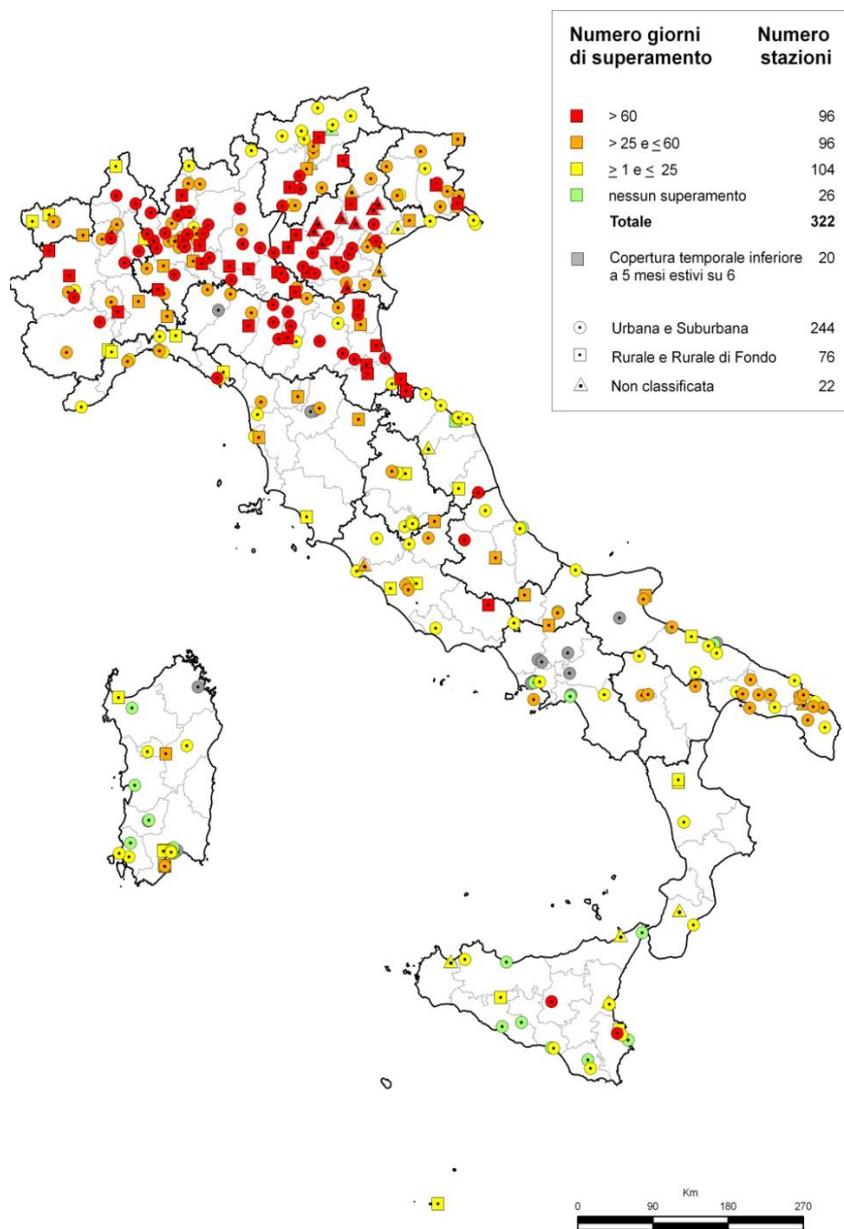
In Europa per l'ozono non si riscontra alcun *trend* significativo. Per l'ozono, l'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana (120 µg/m³), che tra i parametri definiti dalla normativa è quello che meglio descrive situazioni di inquinamento e di esposizione della popolazione mediate nel tempo, nel periodo estivo

⁴⁹ Dati di monitoraggio comunicati dai Paesi europei nell'ambito di *Exchange of Information*, Decisione 97/101/CE ripresa nella Direttiva 2008/50/CE

⁵⁰ Nelle stazioni urbane e da traffico, l'ozono è chimicamente consumato dall'NO_x emesso a breve distanza

⁵¹ Fonte: ETC/ACM, *The state of the air quality in 2009*, Technical paper 2011/1

2011 (da aprile a settembre compresi) risulta superato nella gran parte delle stazioni: solo nell'8% delle stazioni (26 stazioni sulle 322 che hanno fornito informazioni per almeno cinque mesi estivi su sei) non sono stati registrati superamenti dell'obiettivo (Figura 3.15).

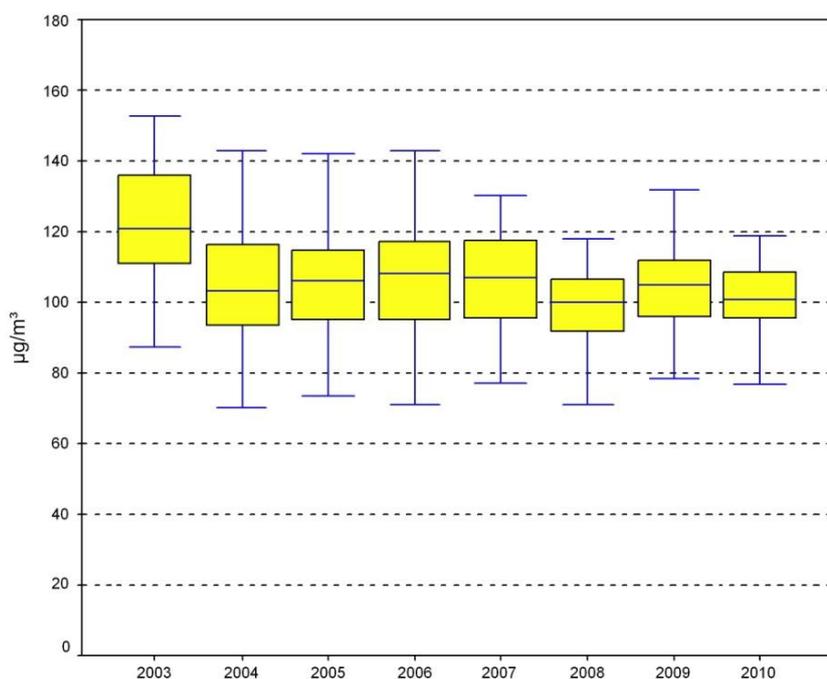


Ozono, periodo estivo 2011, Italia: il 92% delle stazioni di monitoraggio supera l'obiettivo a lungo termine. La situazione più critica è nel Nord.

Figura 3.15: O₃ estivo - Stazioni di monitoraggio per classi di giorni di superamento dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana (120 µg/m³) (2011)⁵²

L'andamento temporale dell'ozono presenta una situazione di stabilità. Ciò è quanto emerge dalla Figura 3.16 che illustra, per il periodo estivo dal 2003 al 2010, alcune statistiche descrittive dell'indicatore **SOMO0** calcolato per un set di stazioni di monitoraggio selezionato sulla base di criteri omogenei per tipologia di stazione e copertura temporale.

⁵² Fonte: ISPRA



Ozono estivo, Italia: l'andamento temporale presenta una situazione di stabilità.

Figura 3.16: O₃ estivo, SOMO0 - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 72 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale^{53 54}

Le principali cause dell'inquinamento atmosferico: le emissioni dei precursori dell'ozono

Per quanto riguarda l'ozono, essendo un inquinante completamente secondario è necessario considerare le emissioni dei suoi precursori: gli ossidi d'azoto e i composti organici volatili. In Europa⁵⁵, nel 2009, la principale sorgente di emissione dei precursori dell'ozono sono i trasporti, in particolare quelli stradali, responsabili del 42% di NO_x e del 17% di composti organici volatili non metanici (COVNM). Le altre sorgenti principali di emissione di NO_x sono la produzione di energia elettrica e riscaldamento (17%), la combustione nell'industria (13%) e il settore civile (7%). Le altre principali sorgenti di COVNM sono l'uso dei solventi (40%) e il settore civile (12%).

Nel nostro Paese, dalle informazioni riportate nell'Inventario nazionale delle emissioni del 2009, elaborato da ISPRA⁵⁶, risulta che la principale fonte di emissione degli ossidi di azoto è rappresentata dai trasporti con il 71%, di cui quelli stradali costituiscono poco meno dei 3/4; l'industria contribuisce per il 12%, la produzione di energia e il settore civile entrambi per l' 8%. Per i COVNM, il 41% proviene dall'uso dei solventi; i trasporti contribuiscono per il 35%; il resto proviene dal settore civile (11%), industria (6%), e da altri settori minori.

Nei Paesi dell'EU27, le emissioni di NO_x sono diminuite del 44%,

Europa, 2009: i trasporti sono la principale sorgente di emissione dei precursori.

Italia, 2009: i trasporti sono la principale fonte di ossidi di azoto; l'uso dei solventi è la principale fonte di COVNM.

Nei Paesi dell'EU27 le emissioni di NO_x e di COVNM sono diminuite.

⁵³ Fonte: ISPRA

⁵⁴ Vedi nota 10

⁵⁵ EEA, *European Union emission inventory report 1990–2009 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*, Technical report n. 9/2011

⁵⁶ http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sinanet/serie_storiche_emissioni

quelle dei COVNM del 55%.

Anche in Italia, come si può osservare in Figura 3.5, per l'NO_x sono state registrate forti riduzioni delle emissioni il cui maggior contributo viene dal settore energetico, seguito da quello del trasporto stradale; per i COVNM è il trasporto stradale che contribuisce maggiormente alla riduzione delle emissioni.

In particolare, il rinnovo del parco automobilistico è stato decisivo per i significativi tassi di riduzione registrati per gli NO_x e COVNM nel periodo successivo al 1995.

Nel nostro Paese la riduzione delle emissioni dei precursori dell'ozono troposferico, dal 1990 al 2005 è stata registrata in tutte le regioni, in modo più o meno elevato in considerazione della presenza o meno dei grandi impianti industriali, per i quali sono stati introdotti negli anni '90 limiti stringenti alle emissioni al camino⁵⁷.

Impatto sulla salute

Stime di impatto sulla salute umana rilevanti, sebbene inferiori a quelle del particolato atmosferico, riguardano anche l'esposizione all'ozono.

Nell'ambito del già citato studio condotto in Italia, relativamente al periodo 2002-2004⁵⁸, e che ha riguardato 13 principali città italiane, è stato stimato che oltre 500 decessi, pari allo 0,6% del totale e corrispondenti a circa 6.000 anni di vita persi, sono attribuibili a concentrazioni di ozono superiori a 75 µg/m³.

Da uno studio ISPRA volto alla valutazione, in alcune città italiane, dell'esposizione all'ozono attraverso l'utilizzo dell'indicatore **SOMO35** risulta che, dal 2004 al 2009, la percentuale di popolazione esposta ai valori di concentrazione più elevati (superiori a 7.000 µg/m³ * giorno⁵⁹), scende dal 73% al 45% (-28, punti percentuali); il decremento maggiore si registra nel 2008 con solo il 22%.

Analoga situazione per la popolazione sotto i 20 anni, per cui la percentuale esposta ai valori di concentrazione più elevati passa dal 76% al 45% (-31 punti percentuali) e il decremento maggiore si presenta nel 2008 col 21%⁶⁰.

Il programma CAFE ha stimato complessivamente che l'applicazione delle politiche di riduzione delle emissioni dei precursori di ozono ridurrebbero, nell'UE tra il 2000 e il 2020, il numero di morti premature da 22.000 a circa 16.500 per anno.

Nello stesso periodo in Italia si eviterebbero più di 1.000 decessi prematuri l'anno.

Anche in Italia le emissioni di NO_x e di COVNM sono diminuite; in particolare nell'ambito del settore stradale è stato decisivo il rinnovo del parco auto. In Italia la riduzione delle emissioni dei precursori dell'ozono, dal 1990 al 2005, è stata registrata in tutte le regioni.

In Italia, dal 2002 al 2004, in 13 grandi città è stato stimato che oltre 500 decessi sono attribuibili a livelli di ozono superiori a 75 µg/m³.

Da uno studio ISPRA svolto su alcune città italiane risulta che, dal 2004 al 2009, la percentuale di popolazione esposta ad alti livelli di O₃ scende dal 73% al 45%.

CAFE: le politiche di riduzione delle emissioni dei precursori di O₃ ridurrebbero, nell'UE, il numero di morti premature da 22.000 a circa 16.500 per anno tra il 2000 e il 2020.

⁵⁷ DM 12/07/1990, "Linee guida per il contenimento delle emissioni inquinanti degli impianti industriali e la fissazione dei valori minimi di emissione"

⁵⁸ Martuzzi M. Mitis F., Iavarone I., Serinelli M., *Health impact of PM₁₀ and ozone in 13 Italian cities*. World Health Organization-Regional Office for Europe. Copenhagen 2006. Disponibile presso: www.euro.who.int/document/e88700.pdf.

⁵⁹ Il valore di (7.000 µg/m³ * giorno) si riferisce alla soglia più alta della scala colorimetrica adottata dall'OMS (*Risks Of Ozone From Long-Range Transboundary Air Pollution. OMS-Europe 2008*) per la valutazione del rischio di esposizione all'ozono della popolazione ed è quindi una soglia dei valori a più elevato rischio per la salute umana

⁶⁰ Per dettagli e approfondimenti sullo studio: ISPRA, *Annuario dei Dati Ambientali, Capitolo Ambiente e benessere*, ed 2011

Nel 2009, in riferimento all'ozono, nei Paesi dell'Unione Europea circa il 17% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori all'obiettivo a lungo termine ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di un anno civile).

Nel periodo 1997-2008 la percentuale di popolazione urbana esposta varia tra il 13 e il 61%, la percentuale di esposizione sale per lo stesso periodo oltre il 95% in riferimento al valore riportato nelle linee guida dell'OMS ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)⁶¹.

In Italia, le stime di impatto associate all'esposizione a ozono, valutate di circa un ordine di grandezza inferiori a quelle per il PM, per il 2005 corrispondono a circa 75 casi di morti premature per milione di abitanti⁶².

Il progetto europeo APHEKOM⁶³ ha mostrato che il rispetto delle linee guida OMS per O_3 permetterebbe di evitare 156 ricoveri ospedalieri ogni anno e 200 morti premature⁶⁴.

Nell'ambito del progetto EBoDE⁶⁵, già citato nel capitolo relativo al particolato (e a cui si rimanda per dettagli sul progetto), gli effetti sulla salute presi in considerazione in relazione all'esposizione all'ozono sono la mortalità totale (escluse cause violente), giorni di attività ristretta (Mrad), tosse e sintomi delle basse vie respiratorie (LRS) nei bambini di età compresa tra 5-14 anni.

Nella stima del carico di effetti sanitari, l'ozono risulta responsabile di una quota compresa tra 40 e 200 anni di *vita sana* persi per milione di abitanti nei 6 Paesi in esame, dei quali circa 140 anni per la popolazione italiana.

Biossido di azoto

Il biossido di azoto (NO_2) è un inquinante gassoso a prevalente componente secondaria, in quanto è il prodotto dell'ossidazione del monossido di azoto (NO) in atmosfera; solo in proporzione minore viene emesso direttamente in atmosfera. È un inquinante ad ampia diffusione che ha effetti negativi sulla salute umana e, insieme al monossido di azoto, contribuisce ai fenomeni di *smog* fotochimico (è **precursore** per la formazione di inquinanti secondari come ozono troposferico e particolato fine secondario), di eutrofizzazione e delle piogge acide. La principale fonte di emissione degli ossidi di azoto ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) è il traffico veicolare.

Nel 2009, in riferimento all' O_3 , nei Paesi dell'UE il 17% della popolazione urbana è stata esposta a livelli maggiori all'obiettivo a lungo termine.

Secondo il progetto APHEKOM: il rispetto dei valori guida OMS per O_3 consentirebbe di evitare 156 ricoveri ospedalieri ogni anno e 200 morti premature.

Il Progetto EBoDE: mostra che il fattore di rischio O_3 è responsabile di una quota compresa tra 40 e 200 anni di vita sana persi per milione di abitanti.

⁶¹ EEA, *Air quality in Europe – 2011 report*, Technical report 12/2011

⁶² EEA, *Spatial assessment of PM_{10} and ozone concentrations in Europe (2005)*, Technical report No 1/2009

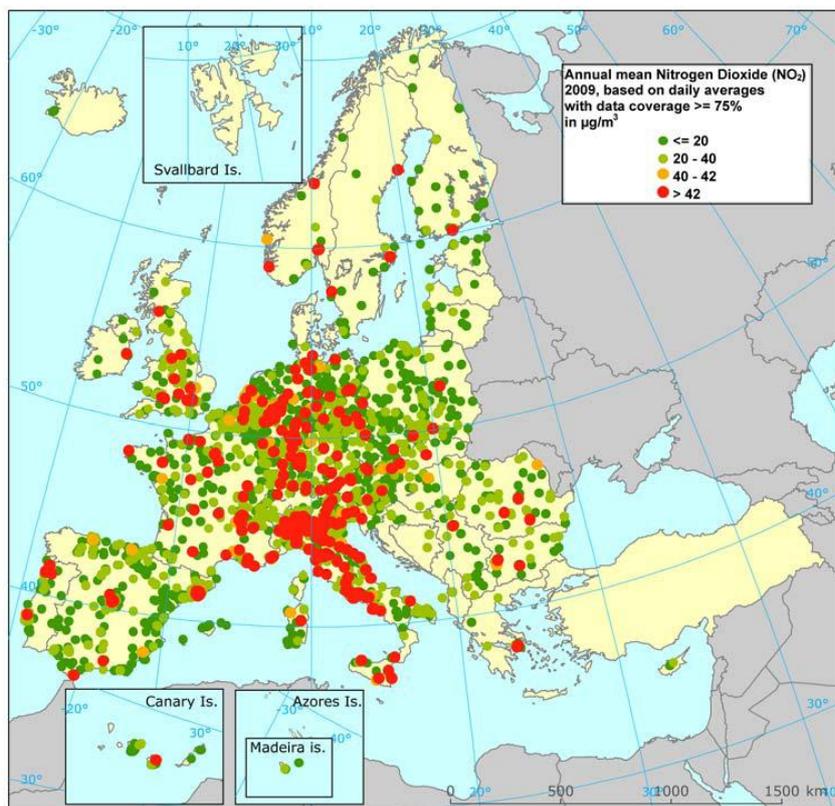
⁶³ APHEKOM, 2011 - *Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe*- www.aphekom.org. Summary report of the Aphekom project 2008-2011 (disponibile presso: http://www.invs.sante.fr/presse/2011/communiqués/cp_aphekom_010311/Aphekom_summary_report.pdf)

⁶⁴ M. Pascal, C. Declercq, M. Corso, C. Badaloni, G. Cesaroni, S. Henschel, K. Meister, K. Eshai, S. Medina on behalf of the Aphekom collaborative network. Health impact assessment of short and long-term exposure to ozone and PM in 25 European cities. *Abstract 727 presented at the 23rd Annual Conference of the International Society of Environmental Epidemiology (ISEE). September 13 - 16, 2011, Barcelona, Spain*

⁶⁵ EBoDE, 2011, Jantunen M, Kollanus V, Leino O et al., 2011. *European perspectives on Environmental Burden of Disease: Estimates for nine stressors in six countries*. THL Reports 1/2011, Helsinki, Finland. 86 pp + 2 appendixes. - <http://en.opasnet.org/w/Ebode> - disponibile presso: <http://www.thl.fi/thl-client/pdfs/b75f6999-e7c4-4550-a939-3bccb19e41c1>

Lo stato della qualità dell'aria: livelli atmosferici di biossido di azoto

Come si può osservare in Figura 3.17 che descrive i livelli atmosferici di biossido di azoto in Europa aggiornati al 2009⁶⁶, il valore limite annuale del NO₂ (40 µg/m³) è superato in molti Paesi. I superamenti sono più frequenti nelle stazioni orientate al traffico: circa il 47% di queste è in superamento.



Biossido di azoto, 2009, Europa: il 47% delle stazioni orientate al traffico supera il valore limite annuale.

Figura 3.17: NO₂ - Concentrazione media annuale (valore limite 40 µg/m³ al 2010) (2009)⁶⁷

Gli ossidi di azoto, per il periodo 1999-2009 mostrano in Europa un *trend* decrescente. Per l'NO₂ l'andamento decrescente è molto meno pronunciato rispetto agli ossidi di azoto totali e meno significativo, soprattutto per le stazioni orientate al traffico: il crescente numero di veicoli *diesel* potrebbe essere il motivo di un aumento di NO₂ primario che ha compensato la riduzione di emissione di NO_x da trasporto.

Sempre nel 2009, nei Paesi dell'Unione Europea circa il 12% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori al valore limite annuale per il NO₂ e al valore riportato nelle linee guida dell'OMS (40 µg/m³).

Nel periodo 1997-2008 la percentuale di popolazione urbana esposta varia tra il 6 e il 41%⁶⁸.

In Europa, nel periodo 1999-2009, gli ossidi di azoto presentano un trend decrescente.

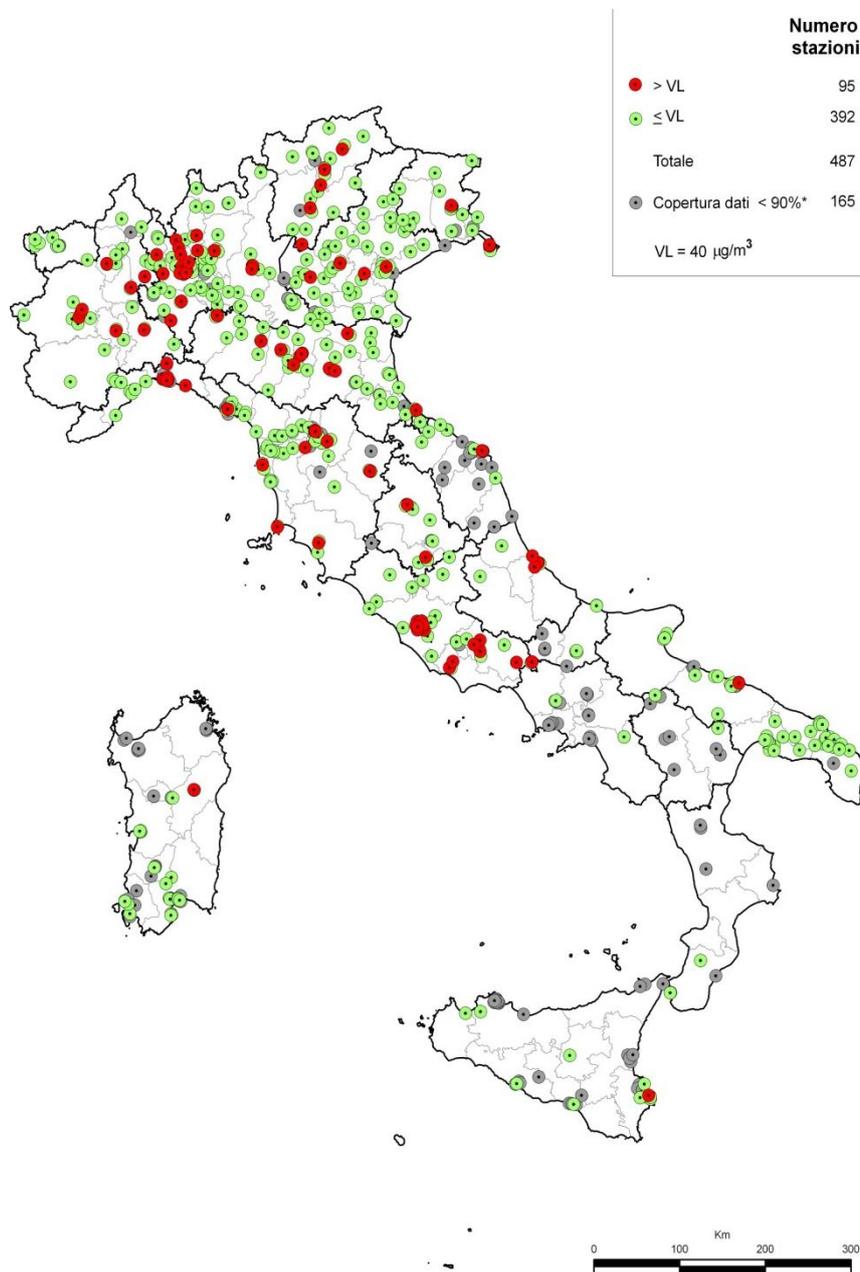
Nel 2009, nei Paesi dell'UE circa il 12% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori ai 40 µg/m³.

⁶⁶ Dati di monitoraggio comunicati dai paesi europei nell'ambito di *Exchange of Information*, Decisione 97/101/CE attualmente ripresa dal D.Lgs. 155/2010 (art. 19, comma 17)

⁶⁷ Fonte: ETC/ACM, *The state of the air quality in 2009*, Technical paper 2011/1

⁶⁸ EEA, *Air quality in Europe – 2011 report*, Technical report 12/2011

Come risulta evidente dalle mappe europee, anche per l'NO₂ il nostro Paese non si trova in una posizione rassicurante; l'Italia, e in particolare l'area padana con la città di Milano è riconosciuta come area critica dell'Europa⁶⁹. Nel 2010, in Italia, il valore limite annuale per la protezione della salute umana entrato in vigore nel 2010, è stato rispettato nell'80% delle stazioni (Figura 3.18).



Biossido di azoto, 2010, Italia: il 20% delle stazioni supera il valore limite annuale.

Legenda:

* la copertura dei dati al 90% è riferita al netto delle perdite di dati dovute alla taratura periodica o alla manutenzione ordinaria

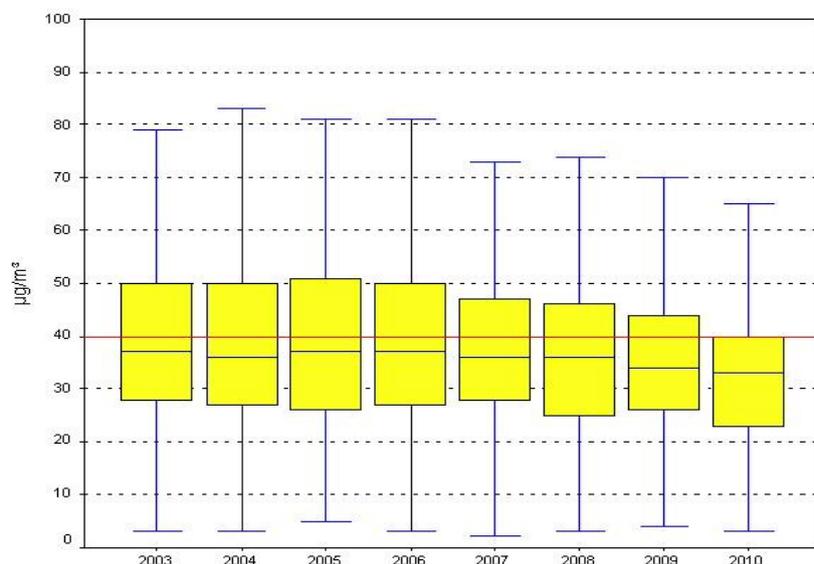
Figura 3.18: NO₂ - Stazioni di monitoraggio e superamento del valore limite annuale (2010)⁷⁰

⁶⁹ Identification of critical areas for PM₁₀ and NO₂, Umweltbundesamt, Service Request N.3 under contract ENV.C.3/FRA/2009/2008, AEA. Secondo il rapporto, le altre aree critiche sono: Athens, Greece; Kosice, Slovak Republic; Krakow, Southern Poland, Poland; Lisbon, Portugal; London, United Kingdom; Paris, France; Sofia, Bulgaria; Stuttgart, Germany

⁷⁰ Fonte: ISPRA

Per il biossido di azoto, il grafico di Figura 3.19 (che riporta alcune statistiche descrittive calcolate su medie annuali di stazioni di monitoraggio, selezionate sulla base di criteri omogenei di copertura temporale e distribuite su tutto il territorio) mostra nel periodo 2003-2010 un andamento in leggera diminuzione.

Le stesse indicazioni espresse in riferimento all'analogo grafico per il PM₁₀, valgono per l'NO₂.



Biossido di azoto, Italia: dal 2003 al 2010 segnali di debole diminuzione.

Figura 3.19: NO₂, media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 121 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale^{71 72}

Le principali cause dell'inquinamento atmosferico: le emissioni di ossidi di azoto

In Europa⁷³ nel 2009 i trasporti, in particolare quelli stradali, sono la principale sorgente di emissione di NO_x, responsabile del 42%.

Le altre principali sorgenti sono la produzione di energia elettrica e il riscaldamento (17%), la combustione nell'industria (13%) e il settore civile (7%).

Dalle informazioni riportate nell'Inventario nazionale delle emissioni del 2009, elaborato da ISPRA⁷⁴, in Italia la principale fonte di emissione degli NO_x è rappresentata dai trasporti con il 71%, di cui quelli stradali costituiscono poco meno dei 3/4; l'industria contribuisce per il 12%; la produzione di energia e il settore civile contribuiscono entrambi per l' 8%.

Nei paesi dell'EU27 le emissioni di NO_x dal 1990 al 2009 hanno registrato una forte diminuzione pari al 44%.

Europa, 2009: i trasporti, in particolare quelli stradali, sono la principale sorgente di emissione di NO_x.

Anche in Italia nel 2009 i trasporti, in particolare quelli stradali, sono la principale sorgente di emissione di NO_x.

Forte diminuzione delle emissioni di NO_x nei paesi dell'EU27.

⁷¹ Fonte: ISPRA

⁷² Vedi nota 10

⁷³ EEA, *European Union emission inventory report 1990–2009 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*, Technical report n. 9/2011

⁷⁴ http://www.sinanet.isprambiente.it/sinanet/serie_storiche_emissioni

Anche in Italia dal 1990 al 2009, come si può osservare in Figura 3.5, per l' NO_x sono state registrate forti riduzioni delle emissioni il cui maggior contributo viene dal settore energetico, seguito da quello del trasporto stradale.

Nel nostro Paese la riduzione nelle emissioni di NO_x dal 1990 al 2005 è stata registrata in tutte le regioni, in modo più o meno elevato in considerazione della presenza o meno dei grandi impianti industriali, per i quali sono stati introdotti negli anni '90 limiti stringenti alle emissioni al camino⁷⁵.

Forte diminuzione delle emissioni di NO_x anche in Italia. In Italia la riduzione delle emissioni di NO_x dal 1990 al 2005 è stata registrata in tutte le regioni.

Deroga all'applicazione dei Valori Limite per il biossido di azoto

Come per il PM₁₀, a seguito della constatazione di molti Stati europei della difficoltà di rispettare gli obiettivi normativi, è stata inserita nella Direttiva 2008/50/CE (art. 22) la possibilità di chiedere da parte degli Stati membri una deroga all'applicazione dei valori limite del biossido di azoto (già in vigore dal 1° gennaio 2010) fino al 1° gennaio 2015. La deroga riguarda singole zone e agglomerati.

La concessione della deroga prevede la dimostrazione di avere già adottato *tutte le misure del caso a livello nazionale, regionale e locale* e di raggiungere i valori limite entro la nuova scadenza eventualmente attraverso misure aggiuntive sia di carattere locale che nazionale.

L'aumento del numero di veicoli circolanti, il ricambio del parco veicolare più lento del previsto e le maggiori emissioni dei veicoli rispetto ai limiti prescritti dagli *standard* di omologazione (Euro 3, 4 e 5) sono i principali motivi individuati dalla Commissione Europea che hanno portato al mancato rispetto degli obiettivi normativi⁷⁶.

In particolare riguardo all'ultimo punto, le politiche comunitarie in materia di trasporti non sono state in grado di garantire le attese riduzioni delle emissioni inquinanti dai veicoli, soprattutto in riferimento agli ossidi di azoto.

Studi sperimentali effettuati a livello europeo⁷⁷ hanno evidenziato, infatti, che le emissioni medie dei veicoli Euro 3 (soprattutto NO_x), in condizioni reali di guida, non sono inferiori a quelle dei veicoli pre-Euro; analoghi risultati sono stati ottenuti per i veicoli Euro 4 e 5.

Per quanto riguarda l'*iter* della richiesta di deroga per NO₂, a seguito della trasmissione della notifica da parte dello Stato italiano per 47 zone (settembre 2011), la Commissione ha richiesto complementi di informazioni.

L'Italia ha presentato richiesta di deroga per 47 zone.

In Figura 3.20 sono rappresentati i comuni italiani interessati dai superamenti dei valori limite dell'NO₂, nell'anno di entrata in vigore.

⁷⁵ DM 12/07/1990, "Linee guida per il contenimento delle emissioni inquinanti degli impianti industriali e la fissazione dei valori minimi di emissione"

⁷⁶ *Commission staff working paper on the implementation of EU Air Quality Policy and preparing for its comprehensive review*, SEC (2011) 342.

⁷⁷ NO₂ Workshop Brussels - 14-15 April 2010

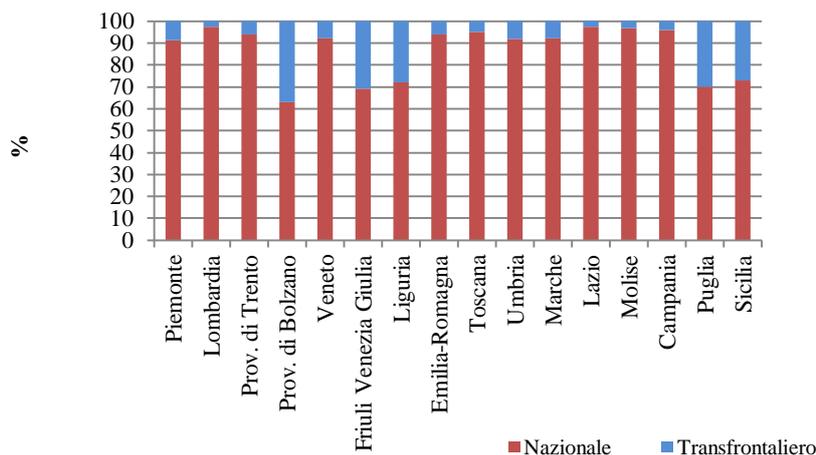


Figura 3.20: Comuni del territorio nazionale in cui sono stati registrati superamenti dei valori limite fissati per l'NO₂ (2010)⁷⁸

Come per la richiesta di deroga all'applicazione dei limiti del PM₁₀, anche in questo caso è stata effettuata una serie di valutazioni come l'individuazione delle fonti emissive responsabili dei superamenti registrati e la stima dei livelli previsti di NO₂ alla nuova data, in seguito alla applicazione delle misure aggiuntive.

La Figura 3.21 mostra la stima⁷⁹ dei contributi transfrontaliero e nazionale ai livelli di fondo regionale⁸⁰ di NO₂ utilizzata dalle regioni nell'ambito della pianificazione regionale delle politiche di risanamento e della richiesta di deroga.

Si può osservare che il contributo transfrontaliero nella gran parte dei casi è inferiore al 10%, fatta eccezione per alcune regioni, come Friuli-Venezia Giulia, Liguria, Puglia, Sicilia e per la provincia autonoma di Bolzano, in cui tale contributo assume valori intorno al 30%.



Stima dei contributi transfrontaliero e nazionale ai livelli di NO₂. Il contributo transfrontaliero alle concentrazioni di NO₂ nella gran parte dei casi è inferiore al 10%.

Figura 3.21: Contributo transfrontaliero e nazionale alle concentrazioni di NO₂⁸¹

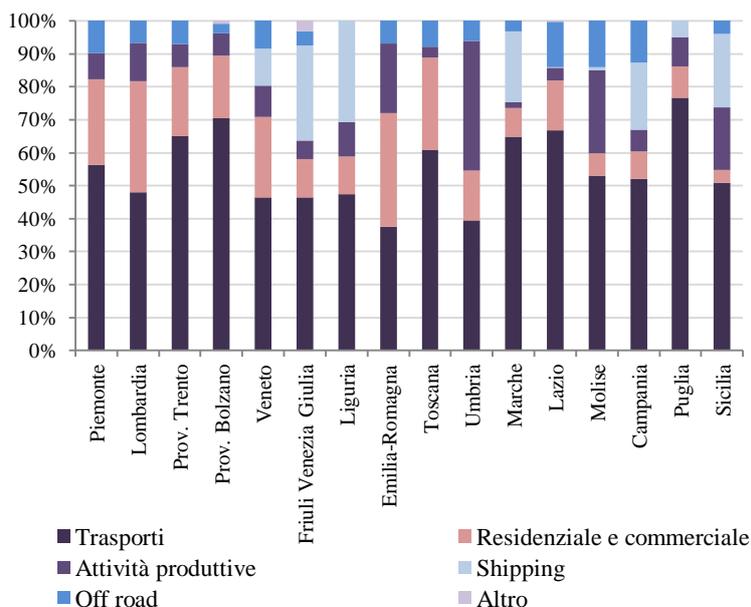
⁷⁸ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

⁷⁹ Per tale stima è stato utilizzato il sistema modellistico sviluppato dall'ENEA su mandato del Ministero dell'ambiente sviluppato nell'ambito del progetto MINNI, Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'inquinamento atmosferico

⁸⁰ Il livello di fondo regionale è il livello stimato in assenza di fonti di emissione in un raggio di circa 30 km. Per i siti all'interno di una città, questo livello corrisponde al livello di fondo esistente in assenza della città. (Notes on the Form 3A _STAFF WORKING PAPER accompanying the Bruxelles, 26.6.2008 SEC(2008) 2132)

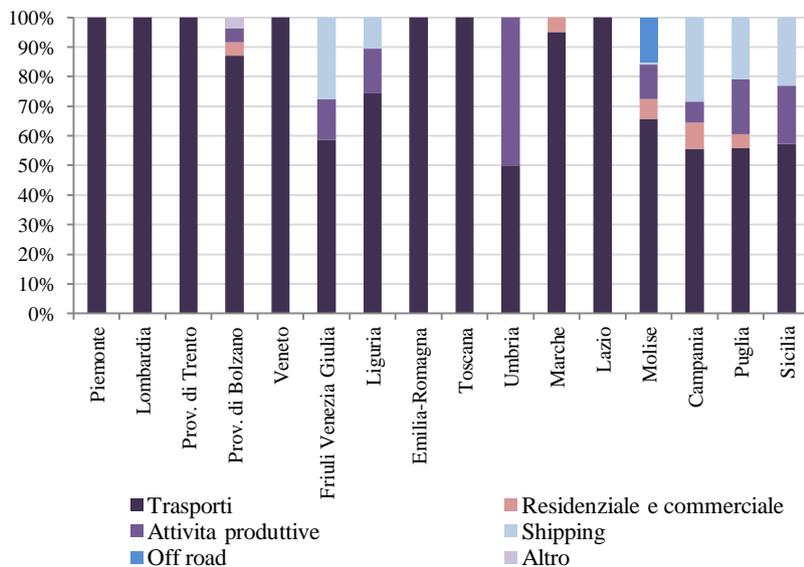
⁸¹ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

Da Figura 3.22, che mostra i contributi dei diversi settori⁸² ai livelli di fondo urbano⁸³ di NO₂, risulta evidente l'impatto su scala urbana dei trasporti, delle attività produttive e del settore residenziale e commerciale, che contribuiscono in media alle emissioni totali regionali di NO₂ per il 91%.



La stima dei contributi dei diversi settori emissivi ai livelli di NO₂, evidenziano che l'impatto su scala urbana dei trasporti, delle attività produttive e del settore residenziale e commerciale contribuiscono in media alle emissioni totali regionali di NO₂ per il 91%.

Figura 3.22: Contributi su scala urbana per settore alle concentrazioni di NO₂⁸⁴



Anche a scala locale il maggior contributo alle concentrazioni di NO₂ è dato dal settore trasporti.

Figura 3.23: Contributi su scala locale per settore alle concentrazioni di NO₂⁸⁵

⁸² Regioni e Province autonome hanno utilizzato i dati degli inventari regionali delle emissioni relativi al 2010

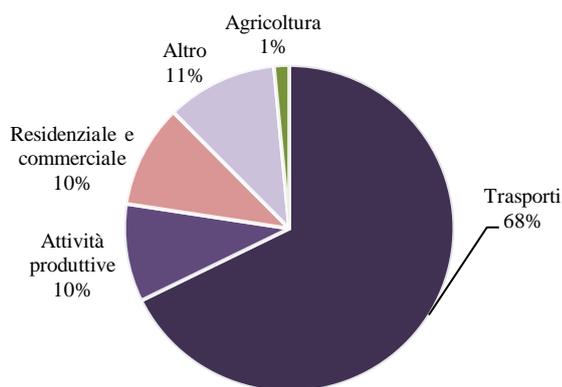
⁸³ Il livello di fondo urbano o totale, che comprende il livello di fondo regionale, è il livello che si prevede in assenza di fonti locali

⁸⁴ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

⁸⁵ *Ibidem*

In Figura 3.23 si mostra il contributo locale⁸⁶ alle concentrazioni di NO₂.

Oltre alle misure previste nei piani di risanamento della qualità dell'aria, regioni e province autonome hanno dovuto individuare un set di misure aggiuntive ai fini del raggiungimento dei valori limite di NO₂. In Figura 3.24 si riporta la distribuzione settoriale di tali misure.



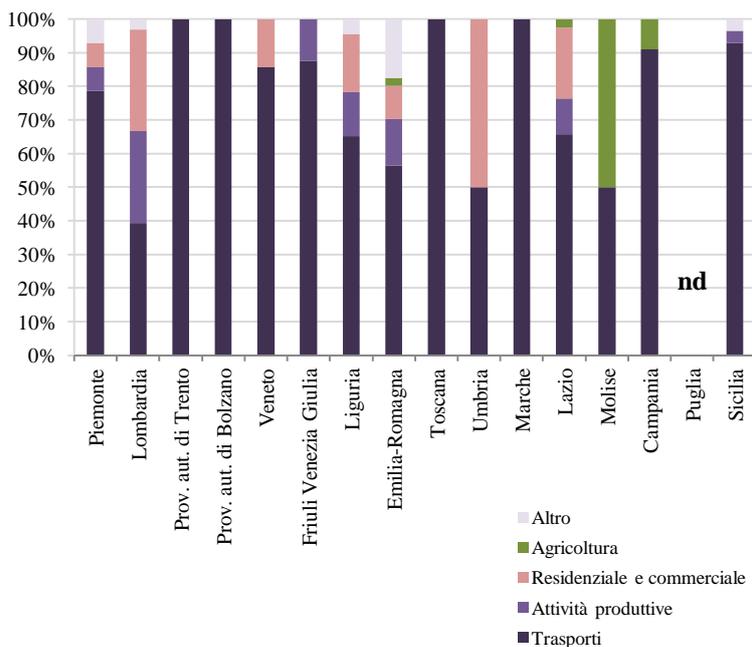
La maggior parte delle misure individuate ai fini della deroga interessano il settore dei trasporti.

Figura 3.24: Ripartizione settoriale delle misure aggiuntive previste per il raggiungimento dei valori limite dell'NO₂⁸⁷

La maggior parte delle misure aggiuntive, analogamente alle misure previste nei piani di risanamento, ha interessato il settore dei trasporti (misure di carattere strutturale per la mobilità e interventi a favore della mobilità alternativa) (Figura 3.25).

⁸⁶ Il contributo locale identifica i contributi delle sorgenti nelle immediate vicinanze

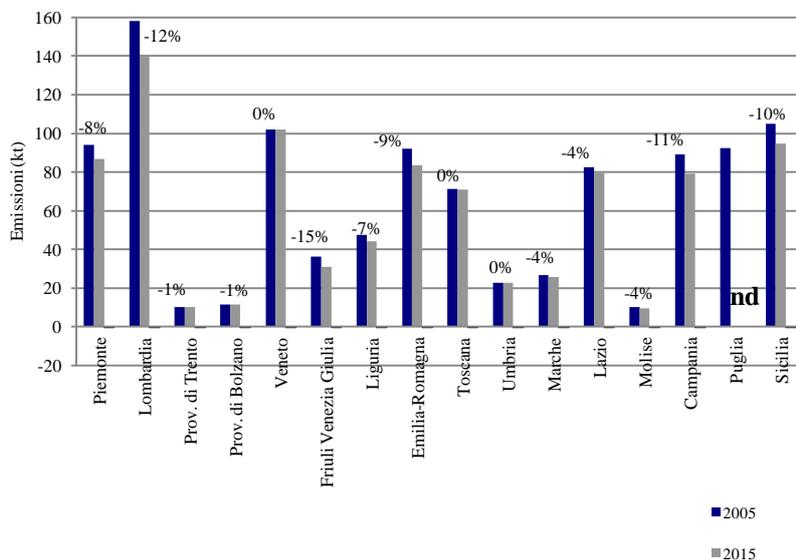
⁸⁷ Fonte: Elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome



Anche la disaggregazione regionale delle misure di risanamento presenta un netto predominio di quelle che interessano il settore trasporti.

Figura 3.25: Ripartizione settoriale delle misure di risanamento previste, per regione/provincia autonoma, ai fini della deroga per NO₂⁸⁸

La stima della riduzione percentuale delle emissioni di NO₂ al 2015, a seguito dell'applicazione di tali misure si riporta in Figura 3.26.



Stima della riduzione delle emissioni di NO₂ previste al 2015 con l'applicazione delle misure aggiuntive.

Figura 3.26: Stima della riduzione delle emissioni di NO₂ tra il 2015 e 2010⁸⁹

⁸⁸ Fonte: *Ibidem*

⁸⁹ Fonte: elaborazione ISPRA su dati dichiarati dalle regioni e province autonome

I microinquinanti

I microinquinanti sono un gruppo di sostanze organiche e inorganiche presenti in atmosfera sotto forma di aerosol in concentrazioni molto piccole rispetto al totale (generalmente con un rapporto di massa inferiore a 1000). Provengono prevalentemente da processi di combustione nell'industria. Alcuni di questi sono oggetto di particolare attenzione in ragione dell'accertata rilevanza igienico-sanitaria. Si tratta di agenti cancerogeni umani genotossici per i quali non esiste una soglia identificabile al di sotto della quale non sussistano rischi per la salute umana in caso di inalazione: il benzo(a)pirene (BaP) (usato come *marker* per il rischio cancerogeno della classe degli idrocarburi policiclici aromatici) e i composti di arsenico, cadmio e nichel.

La normativa vigente fissa un valore obiettivo per il tenore totale medio annuo di queste sostanze nella frazione PM₁₀ da raggiungere entro il 2012: 1 ng/m³ per il B(a)P, 6 ng/m³ per l'arsenico, 5 ng/m³ per il cadmio, 20 ng/m³ per il nichel.

In Europa nel 2009 i dati di monitoraggio disponibili per arsenico, cadmio e nichel (le informazioni sono scarse, anche se in aumento: nel 2009, il numero di stazioni di monitoraggio che misurano i microinquinanti compreso il BaP, sono state 170 mentre nel 2008 120) indicano, a parte qualche situazione industriale, livelli generalmente al di sotto dei valori obiettivo.

Per il BaP, in particolare, i dati disponibili indicano un numero discretamente ampio (37% delle stazioni) di superamenti del valore obiettivo; tali superamenti sono concentrati nell'Europa centrale e dell'Est e in Gran Bretagna.

La verifica del rispetto del valore obiettivo deve essere effettuata annualmente su tutto il territorio nazionale fin dal 2008 (*ex* D.Lgs. 152/2007 oggi incorporato nel D.Lgs. 155/2010); tuttavia, il monitoraggio non viene ancora effettuato in molte regioni del Sud e Isole (Abruzzo, Molise, Campania, Sicilia e Sardegna). Nel resto dell'Italia la valutazione è stata effettuata, nel 2010, sia con misure in siti fissi sia con l'integrazione, combinazione o uso esclusivo di misure indicative, modelli e stima obiettivo.

Per arsenico, cadmio e nichel nel 2010 non si registrano situazioni particolarmente critiche e, nella maggior parte dei casi, le medie annuali rilevate sono ampiamente al disotto dei rispettivi valori obiettivo.

Diversa la situazione per il benzo(a)pirene: si registrano casi di superamento del valore obiettivo in Piemonte, Lombardia, Veneto, Umbria e Puglia, in aree dove le sorgenti industriali stazionarie sono la principale fonte di emissione o in zone dove la principale sorgente è rappresentata dalla combustione di biomasse per il riscaldamento civile.

In Europa nel 2009 livelli di arsenico, cadmio e nichel sono generalmente al di sotto dei valori obiettivo.

In Europa, nel 2009, circa il 37% delle stazioni registra livelli di B(a)P superiori al valore obiettivo.

Monitoraggio scarso, soprattutto nel Sud e Isole.

Italia, 2010: le medie annuali di arsenico, cadmio e nichel sono generalmente al di sotto dei valori obiettivo.

Per il B(a)P, nel 2010, si registrano casi di superamento del valore obiettivo in Lombardia, Veneto, Umbria e Puglia.

Dall'Inventario nazionale delle emissioni del 2009, elaborato da ISPRA⁹⁰, risulta infatti che per gli idrocarburi policiclici aromatici (benzo(a)pirene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene e indeno(1,2,3-cd)pirene) circa il 23% delle emissioni proviene da combustione e processi del settore siderurgico, circa il 39% da combustione di biomassa nel riscaldamento domestico e circa il 27% dall'incenerimento in campo di rifiuti agricoli.

Per gli IPA, nel 2009, il 23% delle emissioni proviene da combustione e processi del settore siderurgico, il 39% da combustione di biomassa nel riscaldamento domestico e il 27% dall'incenerimento in campo di rifiuti agricoli.

GLOSSARIO

Precursore:

Con tale termine ci si riferisce a una sostanza che attraverso processi chimici e fotochimici che avvengono in atmosfera, si trasforma e genera altra/e sostanza/e inquinante/i.

Troposfera:

Ovvero lo strato inferiore dell'atmosfera dove avvengono la gran parte dei fenomeni meteorologici e dove si sviluppa la biosfera e il cui spessore varia dai 10 km (ai poli) ai 18 km (all'equatore).

Smog fotochimico:

Con tale termine si intende la miscela di composti ossidanti presente nei bassi strati della troposfera, ove si forma a seguito di complessi meccanismi di reazione fotochimici che, in presenza di radiazione solare, coinvolgono quali precursori principali gli idrocarburi non metanici (NMCOV) e gli ossidi di azoto (NOx). Lo smog fotochimico contiene un'ampia varietà di sostanze di interesse ambientale: le principali sono l'ozono, il biossido di azoto stesso e altri composti organici reattivi, tutti inquinanti in grado di determinare effetti nocivi sulla salute e sugli ecosistemi.

SOMO0 (Sum of Ozone Means Over 0 ppb):

È un indice di esposizione calcolato come la sommatoria delle medie mobili massime giornaliere su otto ore diviso il numero dei giorni per i quali è disponibile la media su otto ore.

SOMO35 (Sum of Ozone Means Over 35ppm):

È un indice di esposizione cumulata calcolato come la sommatoria delle differenze tra la media massima giornaliera su otto ore e il valore di 35 ppb (70 µg/m³) diviso il numero dei giorni per i quali è disponibile la media su otto ore.

Exchange of Information (EoI):

Con tale termine si intende lo scambio reciproco di informazioni e dati provenienti dalle reti e dalle stazioni di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico negli Stati membri in base alla normativa vigente (Decisione 97/101/EC, Decisione 2001/752/EC e

⁹⁰ http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sinanet/serie_storiche_emissioni

Direttiva 2008/50/CE). La normativa vigente prevede che il flusso informativo sia costituito da metadati e dati orari e giornalieri di concentrazione in aria dei principali inquinanti.

Valutazione dell'Impatto Sanitario (VIS):

È uno strumento di valutazione che aiuta i decisori a indirizzare le risorse disponibili verso politiche finalizzate alla promozione della salute. Tale processo viene, ad esempio, adottato per quantificare il ruolo dei fattori ambientali come determinanti dello stato di salute delle popolazioni e per orientare le azioni di sanità pubblica. L'OMS ha predisposto un sito (<http://www.who.int/hia/en/>) ove vengono illustrati il significato, la metodologia e i campi di applicazione della VIS.

CASO DI STUDIO

L'erosione dei beni architettonici di Roma

L'inquinamento atmosferico e i fattori climatici contribuiscono sinergicamente ad accelerare i naturali processi di deterioramento dei materiali che costituiscono le opere d'arte.

La varietà delle tipologie di degrado riscontrabili sul patrimonio culturale dipende generalmente dalla composizione dei materiali costituenti i monumenti e dalle caratteristiche climatiche, ambientali e topografiche del territorio con cui i beni interagiscono.

In questo studio, realizzato da ISPRA e ISCR (Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro) è stata analizzata l'erosione dei beni di composizione calcarea presenti a Roma.

La perdita di materiale è stata stimata in corrispondenza delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria, utilizzando i parametri meteorologici (precipitazioni e umidità relativa) e ambientali (concentrazione in aria di inquinanti atmosferici) misurati nella città nel 2009.

La sovrapposizione delle mappe di erosione con quelle relative alla distribuzione dei monumenti presenti sul territorio ha consentito di valutare, in prima approssimazione, le aree all'interno della città più aggressive per i monumenti e i beni che possono essere ritenuti potenzialmente più a rischio.

L'erosione dei materiali calcarei

L'erosione dei materiali calcarei è un fenomeno di degrado attribuibile a processi di natura fisica e chimica connessi all'azione dei fattori meteorologici e ambientali.

La perdita di materiale di un bene di composizione lapidea può generalmente essere causato o dall'azione meccanica del vento oppure dal contributo sinergico delle precipitazioni e dell'inquinamento atmosferico.

Gli inquinanti considerati più aggressivi per i manufatti lapidei sono gli ossidi di zolfo, gli ossidi di azoto e il particolato atmosferico. Mentre le concentrazioni di biossido di zolfo in atmosfera negli ultimi anni si sono ridotte, il contributo degli ossidi di azoto e del particolato atmosferico ai processi di deterioramento dei materiali risulta, invece, ancora rilevante.

In particolare il biossido di azoto è coinvolto nella formazione dell'acido nitrico (HNO₃)¹ che esercita un'azione corrosiva, per esempio, sui materiali calcarei, secondo la seguente reazione:



¹ L'acido nitrico si forma in atmosfera durante gli eventi di *smog* fotochimico mediante la reazione tra il biossido di azoto e i radicali ossidrilici (OH)

I nitrati ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) che si formano possono innescare meccanismi di migrazione e cristallizzazione dei sali responsabili, in genere, della disgregazione e della decoesione degli elementi strutturali costituenti il manufatto.

Per quantificare la potenziale erosione di un monumento lapideo sono utilizzati specifici algoritmi presenti in letteratura in grado di stimare la perdita di materiale in funzione delle precipitazioni e delle deposizioni di inquinanti atmosferici.

La relazione utilizzata in questo studio è la formula di Kucera²:

$$R = 4 + 0,0059 \cdot [\text{SO}_2] \cdot Rh_{60} + 0,054 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] + 0,078 \cdot [\text{HNO}_3] \cdot Rh_{60} + 0,0258 \cdot \text{PM}_{10}$$

dove

- R = erosione (espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$);
- $[\text{H}^+]$: concentrazione di H^+ (mg/l);
- $[\text{SO}_2]$: concentrazione di SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- $[\text{HNO}_3]$: concentrazione di HNO_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- PM_{10} : concentrazione di PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- $Rh_{60} = (Rh - 60)$ quando Rh (umidità relativa) è >0 ; $Rh_{60}=0$ quando $Rh < 0$;
- Rain: precipitazioni (mm/anno);

Metodo applicato per il calcolo dell'erosione

Per il calcolo dell'erosione sono stati utilizzati i dati meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti atmosferici considerati, misurati a Roma nel 2009.

La Tabella 1 mostra, per ciascuna stazione, i valori annui della temperatura, dell'umidità relativa e delle precipitazioni.

Tabella 1: Dati meteo climatici a Roma (2009)³

Stazione	T	UR	Pioggia
	°C	%	mm
Francia	16	67	-
L.go Magna Grecia	17	68	-
Saredo	17	63	703
Villa Ada	13	72	731
MEDIA	16	68	717

La Tabella 2 riporta invece i dati di concentrazione degli inquinanti considerati per la stima della perdita di materiale.

In particolare, i dati di biossido di azoto (NO_2), ozono (O_3), biossido di zolfo (SO_2) e particolato atmosferico (PM_{10}) misurati nel 2009 presso le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma e raccolti dall'ISPRA nell'ambito delle procedure europee sullo scambio di informazioni⁴.

² Model For Multi-Pollutant Impact And Assessment Of Threshold Levels For Cultural Heritage (Multiasses) - Report 2005

³ Fonte: ARPA Lazio

⁴ Exchange of Information on air (EoI), Decisioni 97/101/CE e 2001/752/CE

Tabella 2: Concentrazioni medie annue degli inquinanti atmosferici misurati a Roma (2009)⁵

Stazione	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM ₁₀
	µg/m ³			
Arenula	65	-	-	34
L.go Perestrello	51	43	-	35
Francia	82	25	-	40
L.go Magna Grecia	72	30	-	37
Cinecittà	48	42	-	34
Villa Ada	38	37	1,1	27
Castel di Guido	17	56	-	-
Tenuta del Cavaliere	33	36	-	-
Fermi	78	-	-	39
Bufalotta	48	37	1,3	28
Cipro	54	37	-	31
Tiburtina	70	-	-	38

Per poter calcolare la potenziale erosione, non solo nell'intorno delle centraline di monitoraggio ma a livello comunale, i dati registrati nelle stazioni possono essere spazializzati su tutto il territorio mediante tecniche di interpolazione geostatistica.

Per effettuare questo tipo di spazializzazione è necessario avere un numero consistente di dati di *input*. Come si può notare nella Tabella 2, soltanto in due delle dodici centraline considerate sono stati misurati tutti e quattro gli inquinanti necessari per il calcolo dell'erosione (la centralina a Villa Ada e quella situata presso via della Bufalotta); di conseguenza, i dati a disposizione non sono sufficienti a ottenere una spazializzazione statisticamente significativa. Per poter quindi applicare le tecniche di interpolazione, le serie di dati mancanti o incomplete di alcune stazioni sono state ricostruite attraverso un metodo di stima obiettiva⁶. In particolare, sono state stimate le concentrazioni mancanti di biossido di zolfo, particolato atmosferico e ozono. I dati mancanti di PM₁₀ e SO₂ sono stati ricavati utilizzando un modello lineare di stima della variabile dipendente in funzione di una o più variabili indipendenti basato sulla regressione multipla *stepwise* convenzionale⁷. Per quanto riguarda l'ozono, per l'anno di riferimento, i dati presso Corso Francia, Largo Magna Grecia e Fermi sono stati stimati sulla base delle concentrazioni di ozono misurate nella stazione di Tenuta del Cavaliere mediante un modello di regressione lineare semplice⁸.

⁵ Fonte: ISPRA

⁶ G. Cattani, A. Di Menno di Bucchianico, D. Dina, M. Inglessis, C. Notaro, G. Settimo, G. Viviano, A. Marconi, *Evaluation of the temporal variation of air quality in Rome, Italy from 1999 to 2008*, Ann ISS 2010 - Vol. 46, No. 3: 242-253

⁷ La base di dati era costituita dall'insieme delle concentrazioni medie annuali rilevate nelle 12 centraline di monitoraggio della qualità dell'aria di Roma, tra il 2003 e il 2008

⁸ G. Cattani, A. Di Menno di Bucchianico, D. Dina, M. Inglessis, C. Notaro, G. Settimo, G. Viviano, A. Marconi, *Evaluation of the temporal variation of air quality in Rome, Italy from 1999 to 2008*, Ann ISS 2010 - Vol. 46, No. 3: 242-253

Il risultato finale della ricostruzione dei dati mancanti è riportato nella Tabella 3⁹.

Tabella 3: Concentrazioni degli inquinanti atmosferici misurate e ricostruite (in rosso) a Roma (2009)¹⁰

Stazione	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM ₁₀
	µg/m ³			
Arenula	65	35	2,1	34
L.go Perestrello	51	43	1,9	35
Francia	82	25	3,8	40
L.go Magna Grecia	72	30	2,5	37
Cinecittà	48	42	1,7	34
Villa Ada	38	37	1,1	27
Castel di Guido	17	56	0,7	26
Tenuta del Cavaliere	33	36	1,2	30
Fermi	78	21	3,2	39
Bufalotta	48	37	1,3	28
Cipro	54	37	2,5	31
Tiburtina	70	34	2,6	38

Il calcolo dell'erosione nei pressi delle centraline

I dati meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti atmosferici sono stati inseriti nell'algoritmo di Kucera¹¹ per il calcolo dell'erosione (R, espressa in µm/anno) in corrispondenza delle 12 centraline presenti a Roma (Tabella 4).

Tabella 4: Erosione dei materiali calcarei a Roma (2009)¹²

Stazione	R
	µm/anno
Arenula	6,3
L.go Perestrello	6,2
Francia	6,4
L.go Magna Grecia	6,3
Cinecittà	6,1
Villa Ada	5,8
Castel di Guido	5,6
Tenuta del Cavaliere	5,8
Fermi	6,2
Bufalotta	5,9
Cipro	6,1
Tiburtina	6,4

In generale dai risultati ottenuti si può affermare, in prima approssimazione, che l'erosione calcolata nei dodici punti del comune romano, varia da un minimo di 5,6 µm/anno a Castel di Guido (stazione di fondo rurale) a un massimo di 6,4 µm/anno ottenuto presso le centraline di Francia e Tiburtina (stazioni di

⁹ ISPRA, *Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali di Roma*, Rapporto ISPRA 147/2011

¹⁰ Fonte: ISPRA

¹¹ *Model For Multi-Pollutant Impact And Assessment Of Threshold Levels For Cultural Heritage (Multiasses)* - Report 2005

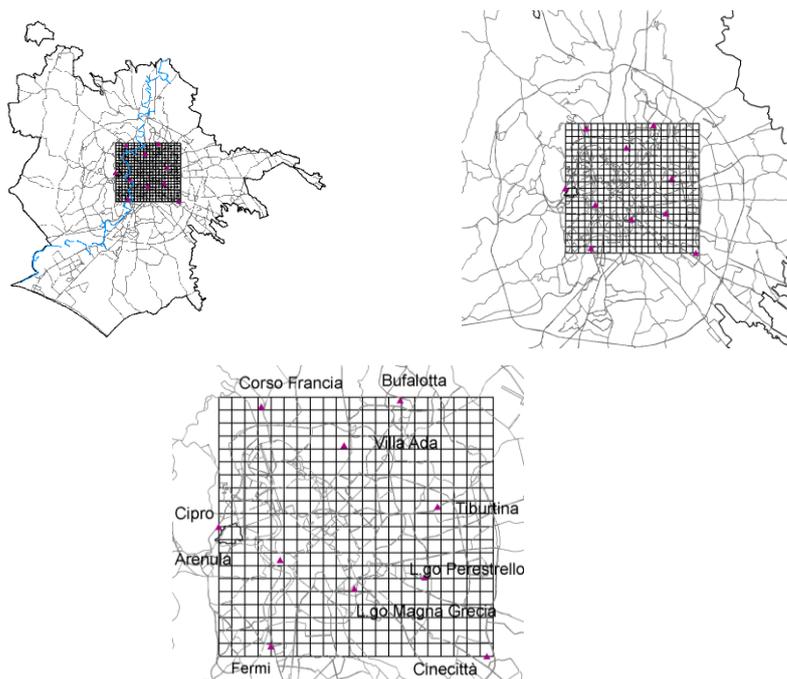
¹² Fonte: ISPRA

traffico urbano). Per un materiale calcareo, secondo quanto stabilito dall'*International Co-operative Programme on Effects on Materials* (UNECE ICP Materials Programme), il valore tollerabile¹³ di erosione è di 8 µm/anno¹⁴. I dati ottenuti utilizzando i valori misurati e ricostruiti presso le centraline mostrano, quindi, che l'erosione dei materiali calcarei risulterebbe inferiore al limite proposto dall'ICP *Materials Programme*.

La spazializzazione

Le concentrazioni misurate dalle 12 centraline sono state spazializzate utilizzando la tecnica di interpolazione geostatistica dell'*Ordinary Kriging*¹⁵. La spazializzazione è stata realizzata considerando una parte del territorio comunale compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (circa 105 km²). Per la spazializzazione sono stati esclusi i dati di concentrazione di Castel di Guido e di Tenuta del Cavaliere e utilizzati i valori misurati/ricostruiti nelle altre 10 centraline. L'area è stata suddivisa in celle, il cui lato è di 500 m (Figura 1).

Figura 1: Area di spazializzazione delle concentrazioni degli inquinanti considerati¹⁶



¹³ La definizione della velocità tollerabile di erosione è stata effettuata sulla base di due componenti: “*the tolerable corrosion before action*” ricavata dallo stadio di deterioramento del materiale quando il restauro deve ancora cominciare e “*the tolerable time between the maintenance*” che indica il tempo accettabile tra una manutenzione/restauro e l'altra

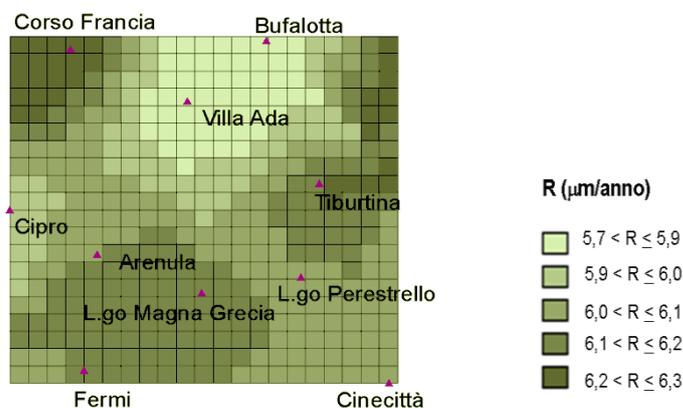
¹⁴ <http://www.corr-institute.se/ICP-Materials/web/page.aspx?refid=12>

¹⁵ R. Beelen, G. Hoek, E. Pebesma, D. Vienneau, Kees de Hoogh, D. J. Briggs, *Mapping of background air pollution at a fine spatial scale across the European Union*, Science of the Total Environment 407 (2009) 1852 – 1867

¹⁶ Fonte: ISPRA

I dati degli inquinanti spazializzati sono stati utilizzati per calcolare la perdita di materiale (Figura 2), con la formula di Kucera, in ognuna delle celle in cui è suddivisa l'area territoriale analizzata.

Figura 2: Recessione superficiale nell'area delimitata dalle centraline¹⁷



I beni di Roma

I beni culturali architettonici e archeologici di Roma presenti nel Sistema Informativo Territoriale (SIT)¹⁸ della Carta del Rischio del Patrimonio Culturale¹⁹ sono attualmente 3.762 (Figura 3).

I monumenti sono principalmente concentrati al centro della città, nell'area compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (GRA).

Tra il 1995 e il 2000, l'ISCR ha realizzato la schedatura conservativa di 77 beni architettonici (Figura 4) elencati nella Tabella 5 che ha consentito il calcolo della vulnerabilità²⁰ del bene (il suo stato di conservazione). Il valore ottenuto (espresso in unità arbitrarie) indica lo stato di conservazione del monumento considerato. I dati di vulnerabilità sono stati suddivisi in 5 classi (alla classe 1 appartengono i monumenti con vulnerabilità più bassa alla classe 5 quelli con vulnerabilità più alta). Minore è il valore della vulnerabilità e migliore è lo stato di conservazione del bene.

¹⁷ Fonte: ISPRA

¹⁸ La Cartografia Tematica, 1996, *Carta del Rischio del Patrimonio Culturale*, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali – Ufficio Centrale per i Beni Archeologici, Architettonici, Storici ed Artistici – Istituto Centrale per il Restauro, Vol.1- A.T.I. Maris

¹⁹ La metodologia per il calcolo del rischio, 1996, *Carta del Rischio del Patrimonio Culturale*, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali – Ufficio centrale per i beni archeologici, architettonici, storici e artistici - Istituto Centrale per il Restauro, vol.2- A.T.I. Maris.

²⁰ La *vulnerabilità* per i beni culturali è una funzione che indica il livello di esposizione di un dato bene all'aggressione dei fattori territoriali ambientali in base allo stato di conservazione del bene. Per il calcolo vengono elaborate le informazioni acquisite attraverso un modello schedografico che rileva i dati sullo stato di conservazione dei 12 elementi costruttivi e decorativi in cui è suddiviso il bene

Figura 3: Beni localizzati a Roma²¹

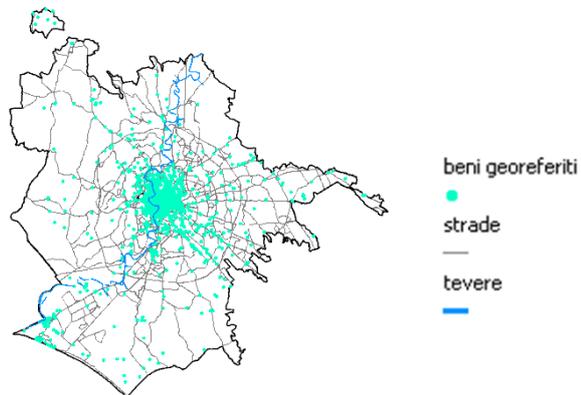
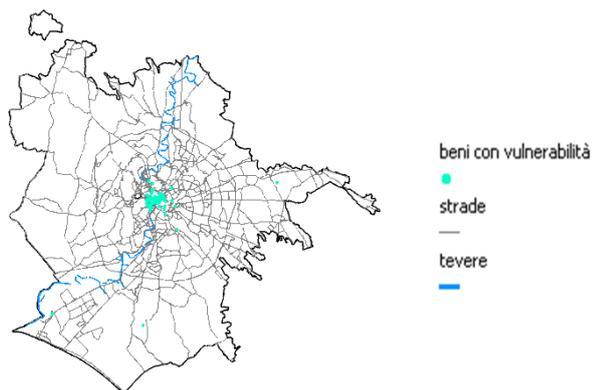


Figura 4: Beni con le schede di vulnerabilità²²



²¹ Fonte: ISCR

²² Fonte: *Ibidem*

Tabella 5: Elenco dei beni per i quali sono disponibili i dati di vulnerabilità²³ (espressa in u.a.) e la corrispondente classe di vulnerabilità²⁴

Bene	V (u.a.)	Classe V	Bene	V (u.a.)	Classe V	Bene	V (u.a.)	Classe V
Chiesa dei SS. Ambrogio e Carlo al Corso	-1,43	1	Chiesa di S. Cesario de Appia	-0,57	1	Chiesa di S. Maria in Campitelli	0,43	2
Chiesa di S. Vitale	-1,19	1	Museo Nazionale Preistorico ed Etnografico	-0,54	1	Chiesa di San Agostino	0,43	2
Museo dell'Alto Medioevo	-1,16	1	Chiesa di S.S. Quirico e Giulitta	-0,50	1	San Girolamo dei Crosti	0,44	2
Chiesa di S. Bernardo alle Terme	-1,16	1	Chiesa di S. Maria in Monticelli	-0,47	1	Oratorio di S. Francesco Saverio detto del Caracci	0,44	2
Chiesa di S. Andrea al Quirinale	-1,13	1	Chiesa di S. Lorenzo in Panisperna	-0,45	1	Convento Chiesa S. Maria della Concezione	0,45	2
Villano Ximenes	-1,12	1	Palazzo Corsini	-0,44	1	Chiesa Santa Maria della Scala	0,46	2
Complesso Villa Giulia - Palazzo	-1,07	1	Chiosstro di S. Maria della Pace	-0,41	1	Chiesa di S. Maria della Pace	0,54	3
Museo di Palazzo Venezia	-1,03	1	Chiesa di S. Pantaleo	-0,38	1	Complesso Araceli - Chiesa S. Maria in Araceli	0,57	3
Casa Madre dei Mutoli	-0,98	1	Santa Maria dei Miracoli	-0,36	1	Palazzina ex Gil	0,67	3
Farmacia di S. Ignazio	-0,98	1	Chiesa di S. Callisto	-0,24	1	Chiesa di S. Clemente Basilica inferiore	0,69	3
Oratorio di S. Giuseppe dei Falegnani	-0,97	1	Chiesa di S. Margherita	-0,23	1	Chiesa di S. Rocco	0,69	3
Chiesa di S. Maria in Via	-0,92	1	Palazzetto Lanoy	-0,22	1	Chiesa di S. Urbano	0,74	3
Oratorio Mariano	-0,89	1	Cimitero dei Cappuccini	-0,13	1	Appartamento Secchi	0,87	3
Chiesa di S. Maria in Aquino	-0,86	1	Chiesa di S. Maria in Trivio	-0,11	1	Chiesa di S. Nicola da Tolentino	0,88	3
Chiesa di S. Marcello al Corso	-0,85	1	Chiesa di S. Croce e S. Bonaventura dei Lucchesi	-0,11	1	Palazzo Barberini	0,92	3
Chiosstro di S. Clemente	-0,84	1	Chiesa di Santa Maria Sopra Minerva	-0,04	1	Basilica Paleocristiana di S. Andrea	0,93	3
Chiosstro di Santa Maria Sopra Minerva	-0,82	1	Chiesa di S. Clemente Basilica Superiore	-0,04	1	Chiesa di S. Pudenziana	1,00	3
Museo degli Strumenti Musicali	-0,81	1	Chiesa di S. Bonaventura al Palatino	-0,02	1	Villa Sarvognan di Bonzi	1,01	4
Galleria Doria Pamphili	-0,80	1	Chiesa di S. Stefano del Cacco	0,02	2	Chiesa di Santa Maria in Montesanto	1,24	4
Chiesa di S. Silvestro al Quirinale	-0,80	1	Chiesa di S. Caterina a Magnanopoli	0,04	2	Chiesa di San Crisogono	1,27	4
Museo Nazionale delle Arti e Tradizioni Popolari	-0,79	1	Tempietto di S. Andrea	0,05	2	Chiesa di S. Tommaso in Parione	1,57	5
Chiesa Nostra Signora del Sacro Cuore	-0,73	1	Complesso di S. Ignazio - Chiesa	0,05	2	Chiesa di S. Marco	1,70	5
Chiesa di S. Eligio degli Orsiferi	-0,66	1	Chiesa di S. Maria Maddalena	0,26	2	Chiesa di S. Cecilia in Trastevere	1,87	5
Oratorio del Gonfalone	-0,65	1	Cappella del Crocifisso	0,29	2	Chiesa di S. Martino ai Monti	1,90	5
Chiesa di S. Decotea	-0,61	1	Chiesa di S. Agata	0,33	2	Chiesa di S. Filippo Neri	2,57	5
Chiesa di S. Bibiana	-0,39	1	Chiesa di S. Stefano Rotondo al Celio	0,40	2			

Nota:

I beni elencati nella tabella sono stati suddivisi in 5 classi in base alla loro vulnerabilità. Alla classe 1 appartengono i monumenti caratterizzati da un migliore stato di conservazione e quindi da una vulnerabilità più bassa mentre alla classe 5 appartengono i beni caratterizzati da un peggiore stato di conservazione e quindi da una vulnerabilità più alta

Gli indicatori di rischio

I dati di erosione calcolati con il *kriging* nell'area all'interno del Grande Raccordo Anulare e le informazioni sullo stato di conservazione del bene, sono stati utilizzati per stimare gli indicatori di rischio territoriale e di rischio individuale.

Il "rischio territoriale" fa riferimento "allo stato di suscettibilità al processo di degrado che caratterizza il territorio nel quale è collocato un aggregato di beni". Questo indicatore è quindi calcolato in funzione dei livelli di pericolosità territoriale e delle caratteristiche dell'aggregato di beni considerato (per esempio il numero di monumenti, la tipologia, ecc.).

Il "rischio individuale" si riferisce "allo stato di suscettibilità al processo di degrado di un singolo bene" ed è rappresentato dal prodotto tra la pericolosità a livello di comune (P) e la vulnerabilità (V_k) del bene k-esimo presente sul territorio in quel dato comune.

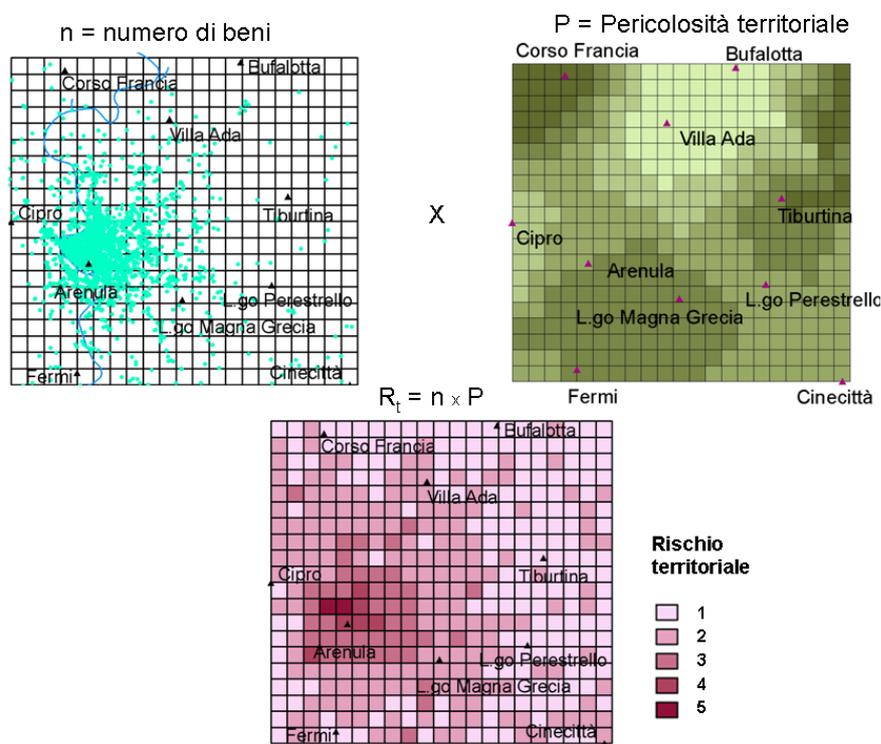
Per il calcolo del rischio territoriale, la mappa di erosione ottenuta nel paragrafo precedente è stata sovrapposta alla mappa di georeferenziazione dei beni culturali elencati nella Carta del Rischio (Figura 5). L'indicatore si ottiene moltiplicando il numero di beni (n) presenti in una determinata cella per la pericolosità territoriale (P,

²³ Nella definizione statistica dei pesi da attribuire ai danni, in funzione dei 12 elementi costitutivi il bene architettonico alcuni risultano negativi; questo comporta la possibilità di avere valori negativi finali di vulnerabilità, dato che non è possibile, allo stato attuale, effettuare processi di normalizzazione. Potendo disporre di una scala ordinale di valori, i dati negativi tendono a rappresentare la classe di bassa vulnerabilità.

²⁴ Fonte: ISCR

rappresentata nel nostro caso specifico dal valore dell'erosione) calcolata nella cella considerata.

Figura 5: Rischio territoriale²⁵



I valori del rischio territoriale ottenuti (espressi in $n \cdot \mu\text{m}/\text{anno}$) sono stati suddivisi in cinque classi. Alla classe 1 appartengono le celle nelle quali non è collocato alcun bene e per le quali il rischio territoriale è quindi pari a zero.

La classe 5 corrisponde al rischio più alto e si ottiene nelle griglie contenenti un numero di monumenti compreso tra 156 e 215.

Poiché il rischio territoriale dipende principalmente dalla distribuzione dei beni, come ovvio, le celle situate al centro della città, contenendo un maggior numero di monumenti, sono quelle a rischio di erosione più alto.

Per il calcolo del rischio individuale sono stati utilizzati i dati di vulnerabilità superficiale dei 77 beni elencati nella Tabella 5.

Il rischio individuale è stato calcolato moltiplicando l'erosione ottenuta nella cella in cui è situato il bene per il dato di vulnerabilità del monumento considerato.

Anche in questo caso i valori ottenuti sono stati suddivisi in 5 classi (Figura 6): alla classe 1 appartengono i beni per i quali il rischio è più basso, mentre alla classe 5 quelli caratterizzati da un rischio più elevato.

²⁵ Fonte: ISPRA e ISCR

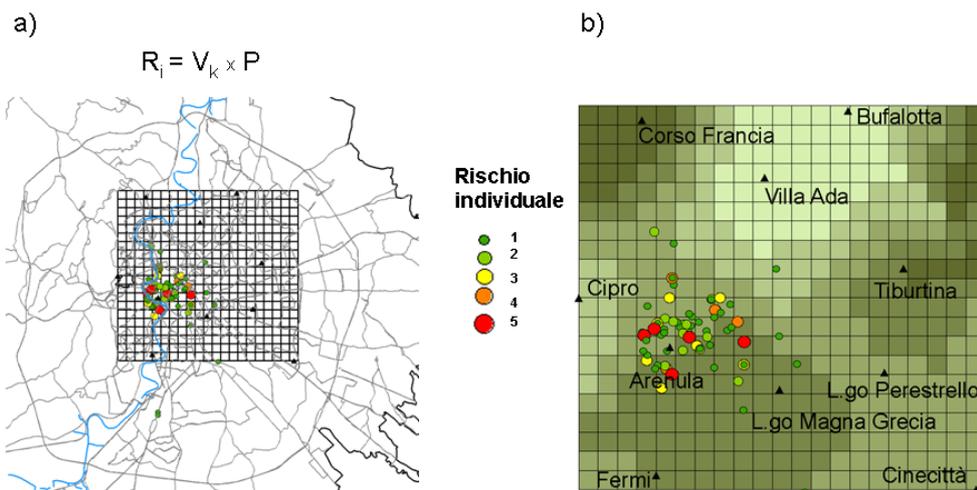


Figura 6:
 a) Rischio individuale per i beni di Roma
 b) Sovrapposizione della mappa di rischio individuale con la mappa di erosione²⁶

I beni che possiedono una vulnerabilità inferiore a zero sono caratterizzati, dato il modello utilizzato e quindi l'incidenza notevole del valore di vulnerabilità, da un rischio basso e appartengono alla classe 1; i beni con vulnerabilità più alta (superiore a 1,5 u.a.) possiedono il rischio più alto e appartengono alla classe 5. La Figura 6b mostra che i beni, pur essendo collocati in celle caratterizzate da valori di erosione con piccole variazioni (da 6 a 6,2 $\mu\text{m}/\text{anno}$), presentano classi di rischio molto differenziate. Nelle griglie caratterizzate dalla stessa erosione, infatti, il rischio individuale dipende principalmente dallo stato di conservazione del bene. A parità di pericolosità territoriale quindi il rischio è influenzato molto dalla vulnerabilità.

Sulla base dei risultati ottenuti in questo studio sperimentale, i monumenti più a rischio sono le chiese di S. Marco, S. Martino ai Monti, S. Tommaso in Parione, S. Filippo Neri e S. Cecilia in Trastevere, situate nel centro della città nei pressi del fiume Tevere, caratterizzati da un peggiore stato di conservazione.

²⁶ Fonte: ISPRA e ISCR