



# NILDE

Network Inter-Library Document Exchange

Il presente documento viene fornito attraverso il servizio NILDE dalla Biblioteca fornitrice, nel rispetto della vigente normativa sul Diritto d'Autore (Legge n.633 del 22/4/1941 e successive modifiche e integrazioni) e delle clausole contrattuali in essere con il titolare dei diritti di proprietà intellettuale.

**La Biblioteca fornitrice** garantisce di aver effettuato copia del presente documento assolvendo direttamente ogni e qualsiasi onere correlato alla realizzazione di detta copia.

**La Biblioteca richiedente** garantisce che il documento richiesto è destinato ad un suo utente, che ne farà uso esclusivamente personale per scopi di studio o di ricerca, ed è tenuta ad informare adeguatamente i propri utenti circa i limiti di utilizzazione dei documenti forniti mediante il servizio NILDE.

**La Biblioteca richiedente** è tenuta al rispetto della vigente normativa sul Diritto d'Autore e in particolare, ma non solo, a consegnare al richiedente un'unica copia cartacea del presente documento, distruggendo ogni eventuale copia digitale ricevuta.

**Biblioteca richiedente:** Biblioteca IRCCS Fondazione Istituto Neurologico Nazionale Casimiro Mondino - Pavia  
**Data richiesta:** 06/09/2018 11:28:20  
**Biblioteca fornitrice:** Biblioteca del Polo Centrale di Medicina e Chirurgia. - Sezione di Medicina del Lavoro - Università degli Studi di Milano  
**Data evasione:** 06/09/2018 12:18:23

**Titolo rivista/libro:** Epidemiologia & prevenzione (Online)  
**Titolo articolo/sezione:** Airports and air quality: a critical synthesis of the literature.  
**Autore/i:** Cattani G;Cattani G;Di Menno di Bucchianico A;Gaeta A;Romani D;Fontana L;Iavicoli I  
**ISSN:** 2385-1937  
**DOI:**  
**Anno:** 2014  
**Volume:** 38  
**Fascicolo:** 3-4  
**Editore:**  
**Pag. iniziale:** 254  
**Pag. finale:** 61

## Aeroporti e qualità dell'aria: una sintesi critica della letteratura scientifica

### Airports and air quality: a critical synthesis of the literature

Giorgio Cattani,<sup>1</sup> Alessandro Di Menno di Bucchianico,<sup>1</sup> Alessandra Gaeta,<sup>1</sup> Daniela Romano,<sup>1</sup> Luca Fontana,<sup>2</sup> Ivo Iavicoli<sup>2</sup> per il gruppo di lavoro SERA (vedi elenco a p. 260)

*Epidemiol Prev* 2014; 38 (3-4): 254-261

<sup>1</sup> Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA)

<sup>2</sup> Istituto di sanità pubblica, Università Cattolica del Sacro Cuore, Roma

**Corrispondenza**  
Giorgio Cattani  
giorgio.cattani@isprambiente.it

#### RIASSUNTO

E' stata redatta una sintesi della letteratura scientifica relativa all'impatto delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria ambiente che vuole mettere in luce le novità introdotte dagli studi degli ultimi anni, presentare le conoscenze che emergono grazie all'uso di nuove metriche e allo sviluppo di metodi semiempirici di analisi e mostrare le questioni ancora aperte.

Le campagne di monitoraggio, opportunamente integrate con le informazioni ottenute da modelli deterministici ed empirici, permettono di stimare i livelli di inquinamento, la variabilità spazio-temporale e il contributo relativo delle diverse sorgenti.

Dagli studi emerge che il contributo degli aeroporti non è trascurabile, sebbene in molti casi non risulti dominante rispetto alle altre sorgenti contemporaneamente presenti, ed è osservabile in un raggio ridotto a 2-3 km dal sedime, con ampia variabilità spaziale.

Il contesto specifico in cui l'aeroporto si colloca e i volumi di traffico aereo sono elementi decisivi sull'impatto potenziale dell'infrastruttura e i risultati delle valutazioni sono difficilmente esportabili.

Le sorgenti aeroportuali si caratterizzano per modalità non comuni di emissione di inquinanti gassosi (ossidi di azoto, ossidi di zolfo, monossido di carbonio), composti organici volatili e materiale particolato (in particolare le emissioni in fase di decollo); le misure ad alta risoluzione temporale evidenziano caratteristiche uniche in relazione alla dispersione e alla trasformazione chimico-fisica degli inquinanti che gli strumenti di monitoraggio routinario non possono evidenziare adeguatamente. Avendo come obiettivo la valutazione dell'esposizione della popolazione residente in prossimità degli aeroporti, questi aspetti non possono essere trascurati.

**Parole chiave:** aeroporti, qualità dell'aria, monitoraggio, modelli

#### Cosa si sapeva già

- Gli aeroporti nel loro complesso rappresentano un importante fattore di pressione ambientale.
- La valutazione del contributo degli aeroporti all'inquinamento atmosferico osservato su scala locale è tuttora affetta da ampia incertezza.

#### Cosa si aggiunge di nuovo

- Le novità introdotte dagli studi degli ultimi anni mettono in luce la necessità di integrare gli strumenti di monitoraggio di routine con misure ad alta risoluzione temporale e strumenti modellistici semiempirici di analisi dei risultati.
- L'analisi della letteratura permette di trarre conclusioni di carattere generale che andrebbero tenute nella dovuta considerazione nel momento in cui si affronta la valutazione dell'impatto di un'infrastruttura aeroportuale sulla qualità dell'aria.

**ABSTRACT**

**Airports and air quality: a critical synthesis of the literature**

*Epidemiol Prev* 2014; 38(3-4): 254-261

This work reviewed existing literature on airport related activities that could worsen surrounding air quality; its aim is to underline the progress coming from recent-year studies, the knowledge emerging from new approaches, the development of semi-empiric analytical methods as well as the questions still needing to be clarified.

To estimate pollution levels, spatial and temporal variability, and the sources relative contributions integrated assessment, using both fixed point measurement and model outputs, are needed.

The general picture emerging from the studies was a non-negligible and highly spatially variable (within 2-3 km from the fence line) airport contribution; even if it is often not dominant compared to other concomitant pollution sources.

Results were highly airport-specific. Traffic volumes, landscape and meteorology were the key variables that drove the impacts. Results were thus hardly exportable to other contexts.

Airport related pollutant sources were found to be characterized by unusual emission patterns (particularly ultrafine particles, black carbon and nitrogen oxides during take-off); high time-resolution measurements allow to depict the rapidly changing take-off effect on air quality that could not be adequately observed otherwise. Few studies used high time resolution data in a successful way as statistical models inputs to estimate the aircraft take-off contribution to the observed average levels. These findings should not be neglected when exposure of people living near airports is to be assessed.

**Keywords:** airport, air quality, ground measurements, models

**INTRODUZIONE**

L'aviazione civile è uno dei settori maggiormente in crescita dell'economia globale, come dimostrato dall'aumento del traffico annuale, che ammonta a circa il 5% dagli anni Novanta.<sup>1</sup> Gli scenari ipotizzati fino al 2036 confermano questa tendenza<sup>2</sup> nonostante recentemente (2008-2009) sia stata osservata una diminuzione del numero dei voli, probabilmente imputabile alla grave crisi economica che ha colpito i mercati mondiali principali<sup>3</sup> e che verosimilmente continuerà nei prossimi anni a rappresentare un ostacolo a tale crescita.

Un aeroporto è un sistema complesso che può determinare un impatto significativo sull'ambiente e sulle condizioni di salute dei lavoratori aeroportuali e della popolazione residente. Gli aeroporti sorgono in ambiti urbani, suburbani o semi-rurali e le sorgenti di inquinamento atmosferico proprie delle attività aeroportuali si aggiungono a quelle tipiche dell'ambito abitativo, industriale e ambientale nel quale il singolo aeroporto è collocato. In un aeroporto le fonti di emissione di contaminanti nell'atmosfera sono molteplici. La quantificazione del contributo di ciascuna sorgente e la differenziazione tra le emissioni aeroportuali e quelle extra aeroportuali è una sfida estremamente attuale e in larga parte ancora da definire e analizzare adeguatamente.

E' stata effettuata una sintesi critica della letteratura scientifica relativa all'impatto delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria ambientale al fine di evidenziare le novità introdotte dagli studi pubblicati negli ultimi anni, con particolare riferimento alle nuove informazioni derivanti dall'uso di nuove metriche e dallo sviluppo di metodi semi-empirici di analisi. L'obiettivo è di individuare le aree di ricerca alle quali sarà necessario dedicarsi in futuro per migliorare le conoscenze attuali sull'impatto ambientale delle emissioni aeroportuali e per meglio caratterizzare e approfondire il rapporto tra inquinamento aeroportuale ed eventuali effetti avversi per la salute dell'uomo.

**METODI**

**Criteri di inclusione**

Sono stati considerati gli studi in cui fossero evidenziati contenuti innovativi per la valutazione dell'impatto degli aeroporti sulla qualità dell'aria, in particolare con riferimento all'analisi delle fonti e ai metodi per la stima delle emissioni aeroportuali, alla valutazione dei livelli e della variabilità spazio-temporale dell'inquinamento atmosferico in aree limitrofe a infrastrutture aeroportuali e alla stima qualitativa e quantitativa del contributo delle sorgenti aeroportuali.

### Strategie di ricerca

La ricerca è stata rivolta all'analisi di articoli originali e revisioni *peer reviewed*, ma anche di rapporti e documenti prodotti da organismi internazionali disponibili sul web. A tal fine sono state selezionate differenti parole chiave, quali *aircraft, jet, gas turbine engine, engine exhaust, Airport, Aviation, jet fuel, combustion product, air pollution, aircraft emissions, urban, air quality, nitrose oxides, particle, particulate matter* e diverse loro combinazioni. I motori di ricerca utilizzati sono stati PubMed, Science Direct, e Google scholar.

### ATTIVITÀ AEROPORTUALI: FONTI DI EMISSIONE

La sorgente principale di inquinanti atmosferici è rappresentata dalle emissioni allo scarico dei motori dei velivoli. I carburanti utilizzati dagli aerei sono a base di cherosene e con caratteristiche diverse in funzione del loro impiego nell'ambito dell'aeronautica militare o civile. I piccoli jet privati con motori a pistoni sono alimentati con benzina avio ad alto numero di ottani.<sup>4-7</sup>

I principali inquinanti emessi sono monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>), composti organici volatili e semivolatili (COV), in particolare alcheni C2-C3 altamente reattivi,<sup>8</sup> e materiale particolato (PM).<sup>9,10</sup> Una sottocategoria di COV, identificati in letteratura tramite la terminologia «*gas-phase hazardous air pollutants*» (HAPs), è tenuta in particolare considerazione, sia in termini di emissione potenziale sia di tossicità: ne fanno parte acroleina, formaldeide, 1,3 butadiene, naftalene, benzene, acetaldeide, toluene, xilene e propanale.<sup>11-13</sup>

In generale, le emissioni variano ampiamente in funzione del regime reale e delle condizioni di spinta dei motori, della durata delle fasi del ciclo di *landing/takeoff* (LTO) e delle condizioni di pressione, umidità relativa e temperatura.<sup>14-16</sup>

Altre fonti di emissione sono gli scarichi dei motori ausiliari (*Auxiliary Power Unit*, APU),<sup>17</sup> i flussi di traffico veicolare da e verso l'aeroporto, i numerosi veicoli a combustione interna che accedono all'area aeroportuale per le attività di movimentazione e di assistenza agli aeromobili.<sup>18,19</sup>

Possono contribuire al totale delle emissioni in atmosfera dovute al sistema aeroportuale anche, in maniera marginale, alcune strutture fisse (per esempio centrali termiche, punti di rifornimento di carburante, attività di manutenzione degli aeromobili presso hangar e officine di manutenzione eccetera).

### STIMA DELLE EMISSIONI

Le emissioni dai motori degli aerei devono essere conformi ai limiti stabiliti a livello internazionale<sup>20</sup> per alcune delle sostanze prodotte a seguito del processo di combustione (NO<sub>x</sub>, CO, COV), in riferimento a un ciclo medio LTO suddiviso in cinque fasi comprendenti i movimenti a terra e le fasi di volo fino a 915 metri (3.000 piedi) di altezza, a cui viene associato un tempo medio di riferimento e una percentuale di

piena potenza del motore. Non esistono ancora limiti per il PM e nessun valore soglia è applicabile ai motori turbo-prop, a pistone, agli elicotteri o ai jet privati di dimensioni ridotte. Le emissioni dagli aeromobili possono essere rappresentate secondo diversi livelli di dettaglio in base alle informazioni disponibili e alla necessità di utilizzo delle stime. La disponibilità e l'affidabilità delle informazioni sui dati di base e i parametri necessari per il calcolo è fondamentale. Per esempio, un parametro fondamentale sono i tempi medi trascorsi per fase operativa. Da un'analisi di sensitività su alcuni aeroporti nazionali si è notato, infatti, che questo parametro influenza fortemente la stima delle emissioni e che ha un ampio range di variabilità in considerazione dell'ampiezza e della struttura dell'aeroporto considerato.

Su base nazionale è evidente una tendenza all'aumento delle emissioni dal 1990 al 2008, spiegata principalmente dall'incremento del numero di voli nel periodo di riferimento che negli ultimi anni ha subito un importante rallentamento, dovuto molto probabilmente al rinnovo della flotta con aerei più moderni e a una diminuzione del numero di cicli LTO.<sup>21,22</sup> Gli inventari delle emissioni potrebbero beneficiare dell'impulso fornito dagli studi più recenti orientati a sviluppare inventari ottenuti elaborando i dati relativi al percorso effettivo seguito da ciascun aeromobile, anziché stimati sulla base dei tempi medi del ciclo LTO.<sup>23</sup> Diversi programmi di ricerca recenti hanno perseguito l'obiettivo di investigare i molteplici e complessi aspetti riguardanti l'emissione di particelle allo scarico degli aeromobili commerciali.<sup>24-28</sup>

I risultati di questi lavori hanno mostrato che, quando il campionamento delle emissioni è effettuato direttamente allo scarico, oltre l'80% (che aumenta fino a raggiungere il 95% nella fase di decollo) del particolato in massa è costituito da particelle di *black carbon* (BC) di diametro aerodinamico compreso tra 10 e 300 nm, le cui caratteristiche fisiche non si modificano sensibilmente entro i primi 100 metri sottovento alla sorgente.<sup>27</sup>

Queste particelle rappresentano una superficie utile sulla quale condensare i gas di combustione e la componente volatile del PM (particelle totalmente volatili che si formano nel pennacchio per condensazione di sostanze gassose organiche). I componenti volatili evolvono, mentre il pennacchio si espande e le proprietà delle particelle finiscono per essere influenzate in modo rilevante dalle condizioni atmosferiche (temperatura, umidità, inquinamento di fondo). Le evidenze sperimentali suggeriscono che la variabilità delle condizioni atmosferiche influenza, in misura maggiore, la concentrazione numerica del particolato rispetto alla concentrazione in massa dello stesso.<sup>29</sup> Per quanto riguarda la concentrazione in massa, è stato stimato un fattore di emissione per il PM (mg di particolato emesso per kg di combustibile consumato, mg kg<sup>-1</sup>) variabile tra 10 mg kg<sup>-1</sup> e 550

mg kg<sup>-1</sup>, in funzione della fase esaminata (attesa, avvicinamento, decollo o atterraggio), del tipo di motore, dell'aereo su cui il motore stesso era montato, della velocità di consumo del carburante. Quando il fattore di emissione è espresso in termini di concentrazione numerica (EI<sub>n</sub>, numero di particelle per kg di combustibile consumato, pp kg<sup>-1</sup>) risulta essere compreso tra 10<sup>15</sup> e 10<sup>17</sup> pp kg<sup>-1</sup>.<sup>30-32</sup>

I dati sperimentali dimostrano, inoltre, che il motore, a caldo, produce l'8% in meno di particelle rispetto a quando opera a temperature più basse.<sup>32</sup> È stato anche dimostrato che all'aumentare del contenuto di zolfo nei combustibili aumenta anche il fattore di emissione del particolato in massa; questo fenomeno è stato attribuito al fatto che, aumentando la percentuale di zolfo nel combustibile, la produzione di solfati tende ad aumentare.<sup>33</sup>

Misure di NO<sub>x</sub> emessi da diversi modelli di motori di aeromobili commerciali sono state effettuate durante le campagne di misura previste nei progetti APEX2 e APEX3.<sup>34</sup> Uno dei risultati più interessanti è che, contrariamente a quanto accade nella maggior parte dei casi in cui le emissioni di NO<sub>x</sub> derivano da un processo di combustione, nella fase di attesa che precede il decollo (*idle thrust*) la componente primaria delle emissioni di NO<sub>x</sub> è l'NO<sub>2</sub>, mentre quando i motori vengono spinti al massimo nella fase di decollo (*high thrust*) gli NO<sub>x</sub> sono emessi primariamente come NO.<sup>34,35</sup> La conversione di NO in NO<sub>2</sub> avviene rapidamente durante la fase di emissione allo scarico e non coinvolge la chimica dell'ozono. La conseguenza è che durante un ciclo LTO completo, secondo gli standard ICAO, il 50% degli NO<sub>x</sub> emessi entro i primi 150 m dal suolo sono costituiti da NO<sub>2</sub>.<sup>24</sup>

La valutazione del contributo degli APU alle emissioni di sostanze inquinanti, in particolare per quanto riguarda il materiale particolato, è ancora in fase di sviluppo. Le informazioni relative ai consumi di carburante dei motori ausiliari sono scarse, così come quelle relative a durata e frequenza d'uso. Le emissioni di particolato prodotte dagli scarichi dei veicoli di supporto aeroportuale che accedono al sedime aeroportuale sono ben caratterizzate soprattutto in termini di massa. Tuttavia, una questione che a volte complica la stima delle emissioni da parte di questi mezzi consiste nel fatto che le operazioni abituali in cui vengono impiegati non sono ben caratterizzate (durata, frequenza, tipi di mezzi coinvolti nelle varie attività di supporto) e, di conseguenza, sono di difficile individuazione e valutazione.

Infine, sono ancora molto limitate le informazioni relative al contributo fornito dai fenomeni di attrito che coinvolgono pneumatici, freni e fusoliera, in particolare nella fase di atterraggio, alle emissioni di PM. Ciononostante, i dati ottenuti da misure effettuate in Inghilterra con la strumentazione e la metodologia *light detection and ranging* (LIDAR) suggeriscono la possibilità che tale ultima sorgente di emissione possa svolgere un ruolo significativo.<sup>36</sup> Recentemente,

un approccio sistematico e comprensivo di tutte le fonti di emissione aeroportuali, accompagnato dalla stima dell'incertezza, è stato sviluppato e applicato su tutto il territorio della Gran Bretagna tenendo conto delle evidenze più recenti circa le stime delle emissioni di particolato.<sup>37</sup>

### **INQUINAMENTO ATMOSFERICO NEI DINTORNI DEGLI AEROPORTI: VALUTAZIONE DELLA VARIABILITÀ SPAZIALE E TEMPORALE**

Il monitoraggio della concentrazione di diversi inquinanti (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e materiale particolato PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>) nelle aree aeroportuali e nelle zone residenziali limitrofe è, in alcuni casi, un'attività di routine. Generalmente, le osservazioni convergono con quelle della maggioranza degli studi ad hoc e mostrano, nelle immediate vicinanze degli aeroporti, livelli di inquinanti aerodispersi simili a quelli osservati in zone influenzate dalle emissioni da traffico veicolare o da emissioni industriali. Tuttavia, in alcuni casi i campionamenti effettuati all'interno dei piazzali aeroportuali evidenziano una qualità dell'aria significativamente peggiore rispetto a quella delle zone adiacenti al sedime.<sup>6,38,39</sup> I risultati di alcuni studi condotti nelle aree limitrofe a un piccolo aeroporto regionale (TF. Green Airport, Warwick, Rhode Island)<sup>40</sup> e di due importanti scali internazionali (Chicago<sup>41</sup> e Los Angeles<sup>42</sup>) dimostrano che le operazioni aeroportuali, incluse quelle a terra, possono influenzare in maniera importante i livelli dei diversi inquinanti monitorati nelle immediate vicinanze dell'aeroporto (in un raggio di circa 3 km). In particolare, quando sono disponibili dati da diversi siti di campionamento, posti a distanza crescente dalla pista, è possibile notare una variabilità spaziale marcata in funzione della direzione del vento, che mostra livelli medi più elevati nelle ore in cui il sito di misura è sottovento rispetto alla pista e concentrazioni medie fino a 10 volte maggiori nei siti più vicini alle piste (da 80 a 400 m) rispetto a quelli più lontani (fino a 3 km). Tali osservazioni sono state riportate in molteplici campagne di monitoraggio in cui sono state effettuate misure dei livelli aerodispersi di alcuni inquinanti la cui origine può essere associata alle attività aeroportuali: acetaldeide, benzene, toluene,<sup>41</sup> formaldeide,<sup>41,43</sup> piombo,<sup>41,44</sup> idrocarburi policiclici aromatici (IPA),<sup>41,45,46</sup> *black carbon*,<sup>40,43</sup> concentrazione numerica di particelle ultrafini (UFP),<sup>42,43,47-49</sup> carbonio organico (OC),<sup>50</sup> NO<sub>x</sub>.<sup>34,51</sup>

Le osservazioni basate su misure ad alta risoluzione temporale (medie di un minuto o meno) consentono di evidenziare il contributo degli aeromobili, identificabile dai picchi periodici di concentrazione di UFP, BC, IPA e NO<sub>x</sub>, in corrispondenza dei decolli e negli istanti immediatamente successivi. I livelli registrati nelle postazioni sottovento alla pista aumentano rapidamente fino a raggiungere a volte valori significativamente più elevati rispetto alla variabilità tipica in assenza di evento (oltre 10 volte il livello medio di fondo). Gli andamenti delle concentrazioni di BC e IPA

sono confrontabili con quelli delle UFP, sebbene i picchi appaiano meno pronunciati.<sup>42-45,47,49,51</sup>

L'emissione in atmosfera degli inquinanti generati dai motori degli aeromobili è caratterizzata da una dispersione spaziale significativamente più elevata rispetto, per esempio, a quella tipica del traffico autoveicolare. Generalmente, a distanze pari o superiori a 300 m da un'autostrada i livelli aerodispersi degli inquinanti e delle UFP sono analoghi ai valori di fondo urbano,<sup>52</sup> mentre il pennacchio originato dai movimenti aerei in fase di decollo e atterraggio si estende a una distanza maggiore compresa tra 500 m e 900 m sottovento alla pista.<sup>43,51</sup> Le concentrazioni di alcuni inquinanti, come PM<sub>2,5</sub> ( $37 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), fenantrene ( $175,6 \pm 54,6 \text{ pg}/\text{m}^3$ ) e formaldeide ( $1,70 \pm 0,66$ ), risultavano significativamente maggiori ( $p < 0,001$ ) nel sito sottovento alla pista rispetto al sito di *background* posto sopravvento.

I fattori di emissione al decollo e la velocità di consumo di carburante sono largamente superiori a quelli relativi ai veicoli per il trasporto delle merci leggeri e pesanti (LDV e HDV). Di conseguenza, è verosimile che con una velocità di flusso volumetrica così alta (in particolare in fase di decollo) si generi un grande volume ad alta concentrazione di particelle che richiede un tempo più lungo per diffondersi e diluirsi rispetto a quanto accade per le particelle emesse dai veicoli commerciali. Inoltre, le emissioni di UFP e i conseguenti picchi di concentrazione sono ragionevolmente correlati alla velocità di consumo di carburante durante la fase di accelerazione in decollo ( $R^2 = 0,62$ ) e, pertanto, in linea di massima gli aerei più grandi producono maggiori emissioni e concentrazioni di picco di UFP sottovento alla pista.

Negli ultimi anni il contributo delle emissioni dei motori dei velivoli è stato indagato anche mediante l'analisi delle caratteristiche fisiche delle particelle, in particolar modo attraverso lo studio del diametro aerodinamico e della distribuzione dimensionale delle particelle stesse. A tal riguardo, i monitoraggi effettuati all'interno dei piazzali aeroportuali dimostrano come circa il 90% delle particelle campionate appartiene all'intervallo dimensionale compreso tra 6 e 40 nm. Inoltre, le particelle prodotte dalle emissioni degli aeromobili, rilevabili entro 300 m sottovento alle piste e con aerei in fase di decollo e negli istanti immediatamente successivi, hanno un diametro aerodinamico mediano di 11 nm (in prossimità di strade a densità elevata di traffico veicolare di mezzi pesanti alimentati a gasolio è pari a 22 nm), con variabilità modesta, e la distribuzione dimensionale mostra un picco caratteristico nell'intervallo dimensionale 10-15 nm e un secondo picco in corrispondenza di 80-90 nm. Nei siti di campionamento posti sopravvento alle piste, e pertanto non influenzati dai movimenti degli aerei, questa componente di UFP è totalmente assente.<sup>43,47,48</sup> Nelle immediate vicinanze di aeroporti che operano prevalentemente con jet privati e *corporate jet* sono stati rilevati livelli

di piombo significativamente più elevati nelle vicinanze delle piste dell'aeroporto ( $28-96 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) rispetto a quelli osservati nelle aree residenziali limitrofe all'aeroporto stesso ( $3-4 \text{ ng}/\text{m}^3$ ).<sup>44</sup> L'unico studio in cui è stata effettuata una caratterizzazione chimica e morfologica completa<sup>50</sup> suggerisce che la gran parte della contaminazione da PM nei dintorni dell'aeroporto di Barcellona (come determinata da campioni prelevati in un sito posto a 130 metri dalla pista principale) non sia attribuibile direttamente all'aeroporto. Gli autori, tuttavia, hanno evidenziato che l'analisi della variabilità temporale delle concentrazioni di alcuni elementi (rame, antimonio, bario, zinco e molibdeno) e l'analisi morfologica può essere utile per caratterizzare, almeno qualitativamente, il contributo dell'aeroporto.

#### LA STIMA DELL'IMPATTO: MODELLI DETERMINISTICI

I codici di calcolo utilizzati per simulare la dispersione degli inquinanti e per la stima dell'impatto su un territorio delle sorgenti aeroportuali sono molteplici; tra questi sono annoverati i modelli gaussiani avanzati, con *tool* specifici delle emissioni di tutti i gruppi sorgente che caratterizzano i servizi di un aeroporto, quali *Emissions and Dispersion Modeling System* (EDMS), riconosciuto dall'EPA, e ADMS-Airport; i modelli eluriani fotochimici come CMAQ e i modelli lagrangiani a particelle, come LASPORT.<sup>53</sup> Esistono molti altri modelli analoghi che hanno trovato applicazione per l'analisi della dispersione delle emissioni aeroportuali; ciascuno caratterizzato da vantaggi e svantaggi specifici, la cui analisi approfondita non rientra, però, negli scopi di questa *review*.

Spesso i modelli sono utilizzati per le valutazioni di impatto ambientale (*ex ante* ed *ex post*) di nuove infrastrutture o di ampliamenti di infrastrutture esistenti.<sup>54</sup>

In Gran Bretagna e negli Stati Uniti l'impatto delle emissioni aeroportuali sulla qualità dell'aria è stato valutato in modo sistematico sull'intero territorio nazionale, utilizzando il modello di dispersione CMAQ.<sup>55,56</sup> Le emissioni totali derivanti dalle sorgenti aeroportuali sono state stimate utilizzando EDMS. Sulla base di queste stime, le emissioni aeroportuali risultano essere pari a meno dell'1% delle emissioni totali attribuibili all'area dove ciascun aeroporto è situato e il contributo delle emissioni aeroportuali sulla concentrazione in aria risulta modesto. Un limite di questi studi è la bassa risoluzione spaziale (l'analisi è estesa a un dominio vastissimo e la griglia del modello è molto ampia: 25x25 km), che non consente di cogliere quello che verosimilmente è più rilevante, cioè l'impatto locale su domini ridotti (qualche migliaio di metri) intorno all'aeroporto.

I modelli di dispersione su scala locale come ADMS-AIRPORT o EDMS, integrati con misure puntuali, permettono di evidenziare con una risoluzione spaziale maggiore l'impatto sulla qualità dell'aria di diverse sorgenti correlate alle attività

aeroportuali. Per esempio, presso l'aeroporto di Manchester, prendendo come anno di riferimento il 1999 e studiando i soli livelli di  $\text{NO}_x$ , è stato possibile stimare che le sorgenti aeroportuali contribuiscono alle concentrazioni del suddetto inquinante per una quota variabile tra il 6,9% e il 50% su un'area complessiva in studio di 1.000  $\text{km}^2$ .<sup>57</sup> Lo stesso approccio modellistico è stato utilizzato presso l'aeroporto di Heathrow (Londra) per valutare il contributo relativo del traffico veicolare e degli aerei nell'area circostante l'aeroporto su un dominio di 10 km x 15 km.<sup>58</sup> I risultati di questo studio mostrano che il contributo alle concentrazioni di  $\text{NO}_x$  fornito dai movimenti degli aeromobili, rappresentati secondo il ciclo standard LTO, è meno importante rispetto a quello del traffico veicolare, sebbene sia comunque da rilevare che una percentuale importante del traffico locale è verosimilmente generata proprio dalla presenza dell'aeroporto. Comunque, le differenze tra i dati stimati dal modello e quelli misurati mettono in evidenza l'importanza dell'integrazione degli strumenti modellistici con il monitoraggio ambientale.

#### LA STIMA DELL'IMPATTO: MODELLI EMPIRICI

Al fine di discriminare il contributo delle diverse sorgenti che influenzano i livelli di concentrazione misurati nelle vicinanze di un aeroporto, alcuni studi hanno focalizzato l'attenzione sulla possibilità di sviluppare modelli empirici basati su tecniche statistiche di regressione in cui la variabile dipendente è la concentrazione misurata di un inquinante e le variabili esplicative sono rappresentative dell'uso del territorio e da variabili meteorologiche, quali la velocità e la direzione del vento.

È stato possibile valutare il contributo aeroportuale presso gli aeroporti di Hong Kong (HKIA) nel 2000-2001 e di Los Angeles (LAX) nel 1997-1998 tramite il metodo della regressione non parametrica, dove la variabile dipendente è la concentrazione dell'inquinante e le variabili esplicative sono la direzione e la velocità del vento; in particolare, è stata suggerita la possibilità di utilizzare  $\text{SO}_2$  come tracciante per le attività aeroportuali.<sup>59</sup> Presso l'aeroporto di Heathrow (Londra), è stato possibile, utilizzando un'evoluzione del metodo proposto da Yu e coll.,<sup>59</sup> identificare il contributo delle emissioni degli aerei in modo non ambiguo fino almeno a 2,6 km dall'aeroporto. Nelle vicinanze dell'aeroporto sottovento alla direzione prevalente, è stato stimato un contributo dell'aeroporto alle concentrazioni rilevate di  $\text{NO}_x$  e  $\text{NO}_2$  pari al 27%.<sup>51</sup> La variabilità spaziale delle concentrazioni di  $\text{NO}_2$  rilevate nell'aeroporto TF. Green di Warwick (Rode Island, USA) è stata stimata con un modello di *Land Use Regression*, che include covariate rappresentative dell'aeroporto, densità di traffico e attributi degli archi stradali in un determinato raggio spaziale. La variabile predittiva «distanza dal terminal aeroportuale» risulta contribuire alla concentrazione di  $\text{NO}_2$  stimata fino a 4,6 ppb (34,4 %) - 2,4 ppb (21,4%) come mediana sull'intero dominio.<sup>18</sup> Recentemente, si è cercato, senza successo, di mettere in luce

il contributo delle attività aeroportuali ai livelli di  $\text{NO}_x$  osservati nelle vicinanze degli aeroporti stessi, attraverso il confronto dei livelli misurati nel periodo compreso tra il 15 aprile e il 20 aprile 2010, durante il quale in Europa, a causa dell'eruzione vulcanica dell'Eyjafjallajökull, si è verificata la paralisi del traffico aereo in 313 aeroporti (circa l'80% della rete europea), e quelli misurati nei giorni precedenti e seguenti.<sup>60</sup> Soltanto con l'uso di un modello basato sulla tecnica del *boosted regression trees*<sup>59,61-64</sup> applicato all'aeroporto di Londra è stato possibile stimare, presso il recettore più affetto dal contributo dell'aeroporto (circa a 200 m Sud dai confini del sedime), un contributo medio alla concentrazione osservata di  $\text{NO}_x$  pari a 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , corrispondente al 23% del totale.<sup>65</sup> Presso l'aeroporto di Los Angeles, attraverso un modello lineare generalizzato, è stata valutata l'associazione tra le misure ad alta risoluzione temporale di un insieme di inquinanti gassosi ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  e  $\text{SO}_2$ ) e un gruppo di covariate rappresentative delle attività di volo insieme a variabili meteo. È stato sviluppato un modello multinquinanti ed è stato evidenziato che questa combinazione di misure permette di migliorare la performance del modello e di identificare in modo univoco il contributo della fase di decollo alle concentrazioni osservate a una distanza di circa 100 metri dalla fine della pista.<sup>66</sup>

#### CONCLUSIONI

Il contributo degli aeroporti osservabile in un raggio ridotto a 2-3 km dal sedime aeroportuale e con ampia variabilità spaziale non è trascurabile, sebbene in molti casi non sia dominante rispetto alle altre sorgenti contemporaneamente presenti.

Il contesto specifico in cui l'aeroporto si colloca e i volumi di traffico sono elementi decisivi per stabilire l'impatto potenziale dell'infrastruttura e i risultati delle valutazioni sono difficilmente esportabili. Per stimare quantitativamente il contributo dell'aeroporto, appare fondamentale l'integrazione di misure puntali di inquinanti e parametri meteo, con il supporto di modelli deterministici ed empirici.

Le sorgenti aeroportuali si caratterizzano per modalità non comuni di emissione del materiale particolato e ossidi di azoto (in particolare le emissioni in fase di decollo). Infatti, le misure ad alta risoluzione temporale mostrano caratteristiche uniche in relazione all'evoluzione spazio-temporale della concentrazione di  $\text{NO}_x$ , di UFP e della distribuzione dimensionale delle particelle che gli strumenti di monitoraggio routinario non possono rilevare adeguatamente. Per passare da una valutazione qualitativa (l'osservazione della presenza di associazione tra picchi di concentrazione e movimenti degli aeromobili) a una stima quantitativa del loro contributo ai livelli osservati, occorre sviluppare modelli statistico-matematici utilizzando covariate meteorologiche e rappresentative dell'uso del territorio e delle attività aeroportuali. Il buon esito delle stime è subordinato a una pianificazione attenta e alla repe-

ribilità delle informazioni essenziali per alimentare sia un inventario sia i modelli di diffusione, non sempre disponibili e spesso molto incerte. Tali dati (modello di velivolo, tipologia di motore, orario del volo, piano di avvicinamento e allontanamento dalla pista, tracciato della pista, modello e tipologia dei mezzi a terra, tipologia delle sorgenti ausiliarie impiegate nell'aeroporto) sono la base, e sarebbe auspicabile che fossero resi pubblici, come accade già ora negli Stati Uniti.

**Conflitti d'interesse dichiarati:** nessuno.

**Gruppo di lavoro dello studio SERA.**

**Dipartimento di epidemiologia, SSR del Lazio:** Carla Ancona, Laura Ancona, Chiara Badaloni, Giulia Cesaroni, Simone Bucci, Martina N. Golini, Francesca Mataloni, Claudio Morciano, Chelo G. Salatino, Eleonora Zirro, Francesco Forastiere. **ARPA Lazio:** Silvia Barberini, Gianmario Bignardi, Andrea Bolignano, Valerio Briotti, Roberta Caleprico, Sesto Damizia, Tina Fabozzi, Raffaele Piatti, Francesco Troiano, Roberto Sozzi. **ISPRA:** Anna Maria Caricchia, Riccardo De Lauretis, Alessandro Di Menno di Bucchianico, Alessandra Gaeta, Daniela Romano, Giorgio Cattani. **Istituto**

**di scienze dell'atmosfera e del clima:** Francesco Angelini, Francesca Barnaba, Francesca Costabile, Gian Paolo Gobbi. **Università Cattolica del Sacro Cuore, Roma:** Luca Fontana, Ivo Iavicoli. **Istituto superiore di sanità:** Marco Inglessis, Francesco Tancredi. **Università di Padova:** Claudia Amadasi, Laura Cestari, Roberta Dorio, Barbara Palazzi, Dorelia Zangrando, Lorenzo Simonato. **ARPA Veneto:** Daniele Sepulcri. **Direzione integrata della prevenzione, SSD epidemiologia, ASL TO 4:** Celestina Arcadi, Luisa Bandroco, Graziella Barra, Fulvia Bellone, Paolo Carnà, Pierina Casu, Maria Conchedda, Carmela De Fano, Piera Di Gilio, Antonella Macario, Maria Peritore, Stefania Sapetti, Luisa Signorile, Vilma Tempia, Marina Ottino. **ARPA Piemonte:** Monica Chiusolo, Jacopo Fogola, Ennio Cadum. **Università degli Studi di Milano:** Donatella Camerino, Dario Consonni, Angela Pesatori, Pier Alberto Bertazzi. **Istituto di fisiologia clinica, CNR Pisa:** Caterina Ferri, Caterina Minniti, Maddalena Nanni, Davide Petri, Maria Angela Vigotti. **Istituto per i processi chimico-fisici, CNR Pisa:** Gaetano Licitra. **Istituto di acustica e sensoristica "Orso Mario Corbino":** Elena Ascari. **Osservatorio Epidemiologico, ASL Varese:** Maria Chiara Antoniotti, Lorena Balconi, Domenico Bonarrigo, Cristina Degli Stefani, Aniello Esposito, Maria Gambino, Sebina Speziali, Salvatore Pisani. **ARPA Lombardia:** Silvana Angius, Emanuele Galbusera, Paola Maggi, Roberta Pollini

**BIBLIOGRAFIA**

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Penner JE, Lister DH, Griggs DJ (eds). *Aviation and the global atmosphere*. Cambridge (UK), Cambridge University Press, 1999.
2. International Civil Aviation Organisation (ICAO). *Environmental Report 2010: aviation and climate change*. Montréal (Quebec), ICAO, 2010. Disponibile all'indirizzo: [http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/ENV\\_Report\\_2010.pdf](http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/ENV_Report_2010.pdf)
3. Maurice LQ, Lee DS (eds). *Assessing Current Scientific Knowledge, Uncertainties and Gaps in Quantifying Climate Change, Noise and Air Quality Aviation Impacts. Final Report of the International Civil Aviation Organization (ICAO) Committee on Aviation and Environmental Protection (CAEP) Workshop*. Washington DC and Manchester, US Federal Aviation Administration and Manchester Metropolitan University, 2009. Disponibile all'indirizzo: <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CaepImpactReport.pdf>
4. Pleil JD, Smith LB, Zelnick SD. Personal exposure to JP-8 jet fuel vapors and exhaust at air force bases. *Environ Health Perspect* 2000;108(3):183-92.
5. Ritchie GD, Still K, Rossi J 3<sup>rd</sup>, Bekkedal M, Bobb A, Arfsten D. Biological and health effects of exposure to kerosene-based jet fuels and performance additives. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 2003;6(4):357-451.
6. Tesseraux I. Risk factors of jet fuel combustion products. *Toxicol Lett* 2004;149(1-3):295-300.
7. Riviere JE, Brooks JD, Monteiro-Riviere NA, Budsaba K, Smith CE. Dermal absorption and distribution of topically dosed jet fuels jet-A, JP-8, and JP-8(100). *Toxicol Appl Pharmacol* 1999;160(1):60-75.
8. Schürmann G, Schäfer K, Jahn C et al. The impact of NO<sub>x</sub>, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. *Atmos Environ* 2007;41:103-18.
9. Timko MT, Miake-Lye RC, Taylor C et al (eds). *ACRP Report 9. Summarizing and Interpreting Aircraft Gaseous and Particulate Emissions Data*. Washington DC, Transportation research board of the National Academies sponsored by FAA, 2008. Disponibile all'indirizzo: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp\\_rpt\\_009.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_rpt_009.pdf)
10. Webb S, Whitefield PD, Miake-Lye RC et al (eds). *ACRP Report 6. Research Needs Associated with Particulate Emission at Airports*. Washington DC, Transportation research board of the National Academies sponsored by FAA, 2008. Disponibile all'indirizzo: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp\\_rpt\\_006.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_rpt_006.pdf)
11. Federal Aviation Administration (FAA). *Select resource materials and annotated bibliography on the topic of hazardous air pollutants (haps) associated with aircraft, airports, and aviation*. 2003. Disponibile all'indirizzo: [http://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/media/HAPs\\_rpt.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/HAPs_rpt.pdf)
12. Federal Aviation Administration. *O'Hare Modernization Environmental Impact Statement. Federal Aviation Administration*. Great Lakes Region, Office of Environment and Energy, FAA, 2005.
13. Wood E, Herndon S, Miake-Lye RC, Nelson D, Seeley M (eds). *ACRP Report 7. Aircraft and Airport-Related Hazardous Air Pollutants: Research Needs and Analysis*. Washington DC, Transportation research board of the National Academies sponsored by FAA, 2007. Disponibile all'indirizzo: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp\\_rpt\\_007.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_rpt_007.pdf)
14. DuBois D, Paynter GC. Fuel Flow Method2 for Estimating Aircraft Emissions. *SAE Tech Pap Ser* 2006. doi:10.4271/2006-01-1987
15. Herndon SC, Wood EC, Northway MJ et al. Aircraft hydrocarbon emissions at Oakland International Airport. *Environ Sci Technol* 2009;43(6):1730-6.
16. Yelvington PE, Herndon SC, Wormhoudt J et al. Chemical Speciation of Hydrocarbon Emissions from a Commercial Aircraft Engine. *Journal of Propulsion and Power* 2007; 23(5):912-8.
17. Winther M, Kousgaard U, Oxbøl A. Calculation of odour emissions from aircraft engines at Copenhagen Airport. *Sci Total Environ* 2006;366(1):218-32.
18. Adamkiewicz G, Hsu HH, Vallarino J, Melly SJ, Spengler JD, Levy JI. Nitrogen dioxide concentrations in neighborhoods adjacent to a commercial airport: a land use regression modeling study. *Environ Health* 2010;9:73. doi: 10.1186/1476-069X-9-73
19. Cohen BS, Bronzaft AL, Heikkinen M, Goodman J, Nadas A. Airport-related air pollution and noise. *J Occup Environ Hyg* 2008;5(2):119-29.
20. International Civil Aviation Organisation (ICAO). *Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Volume II. Aircraft Engine Emissions*. Montréal (Quebec), ICAO, 2008.
21. Romano D, Arcarese C, Bernetti A et al. *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2011. National Inventory Report 2013*. Rapporti 177/2013. Roma, ISPRA, 2013.
22. Romano D, Bernetti A, Condor R et al. *Italian Emission Inventory 1990-2011. Informative Inventory Report 2013*. Rapporti 178/2013. Roma, ISPRA, 2013.
23. Van Pham V, Tang J, Alam S et al. Aviation emission inventory devel-

- opment and analysis *Environmental Modelling & Software* 2010; 25(12):1738-53.
24. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Aircraft Engine Emissions Data Bank*. International Civil Aviation Organization. Montreal Quebec, Canada, 2013. Disponibile all'indirizzo: <http://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
  25. Wayson RL, Fleming GG, Lovinelli R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines. *J Air Waste Manag Assoc* 2009;59(1):91-100.
  26. Kinsey JS, Dong Y, Williams DC, Logan R. Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the Aircraft Particle Emissions Experiment (APEX) 1 to 3. *Atmos Environ* 2010;44(17):2147-56.
  27. Lobo P, Whitefield PD, Hagen DE et al. *The Development of Exhaust Speciation Profiles for Commercial Jet Engines*. Sacramento (CA), California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency, 2007. Disponibile all'indirizzo: <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj9/apexfinalreport.pdf>
  28. Wey CC, Anderson BE, Wey C, Miake-Lye RC, Whitefield P, Howard R. Overview of the aircraft particle emissions experiment. *Journal of Propulsion and Power* 2007;23:898-905.
  29. Anderson BE, Cofer WR, Barrick JD, Bagwell DR, Hudgins CH. Airborne observations of aircraft aerosol emissions II: Factors controlling volatile particle production. *Geophys Res Lett* 1998;25(10):1693-6.
  30. Herndon SC, Onasch TB, Frank BP et al. Particulate emissions from in-use commercial aircraft. *Aerosol Sci Technol* 2005;39:799-809.
  31. Herndon SC, Jayne JT, Lobo P et al. Commercial aircraft engine emissions characterization of in-use aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. *Environ Sci Technol* 2008;42(6):1877-83.
  32. Lobo P, Hagen DE, Whitefield PD et al. Physical characterization of aerosol emissions from a commercial gas turbine engine. *Journal of Propulsion and Power* 2007;23(5):919-29.
  33. Schröder F, Brock CA, Baumann R et al. In situ studies on volatile jet exhaust particle emissions: Impact of fuel sulfur content and environmental conditions on nuclei mode aerosols. *J Geophys Res* 2000; 105(D15):19941-54.
  34. Wood EC, Herndon SC, Timko MT, Yelvington PE, Miake-Lye RC. Speciation and chemical evolution of nitrogen oxides in aircraft exhaust near airports. *Environ Sci Technol* 2008;42(6):1884-91.
  35. Herndon SC, Shorter JH, Zahniser MS et al. NO and NO<sub>2</sub> emission ratios measured from in-use commercial aircraft during taxi and take-off. *Environ Sci Technol* 2004;38(22):6078-84.
  36. Bennett M, Christie SM, Graham A et al. Composition of smoke generated by landing aircraft. *Environ Sci Technol* 2011;45(8):3533-8.
  37. Stettler MEJ, Eastham S, Barrett SRH. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmos Environ* 2011;45(31): 5415-24.
  38. Fleuti E, Maraini S, Janicke U. *Air Quality Assessment Sensitivities – Zurich Airport Case Study*. Zurich, Flughafen Zürich AG, 2009.
  39. Welch D, Laxen K, Moorcroft S. *London City Airport Air Quality Measurement Programme: Annual Report 2010*. London, Air Quality Consultants Ltd, on behalf of London City Airport, 2011.
  40. Dodson RE, Houseman EA, Morin B, Levy JI. An analysis of continuous black carbon concentrations in proximity to an airport and major roadways. *Atmos Environ* 2009;43:3764-73.
  41. Environmental Protection Agency. *Chicago O'Hare Airport. Air Toxic Monitoring Program. June-December 2000*. EPA, Bureau of Air, 2002. Disponibile all'indirizzo: <http://www.epa.state.il.us/air/ohare/ohare-toxic-report.pdf>.
  42. Westerdahl D, Fruin SA, Fine PL, Sioutas C. The Los Angeles International Airport as a source of ultrafine particles and other pollutants to nearby communities. *Atmos Environ* 2008;42:3143-55.
  43. Zhu Y, Fanning E, Chun Yu R, Zhang Q, Froines JR. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport. *Atmos Environ* 2011;45:6526-33.
  44. Fine P, Polidori A, Teffera S. *General Aviation Airport Air Monitoring Study*. San Francisco, CA, US. Environmental Protection Agency, Region IX, 2010.
  45. Childers JW, Witherspoon CL, Smith LB, Pleil JD. Real-time and integrated measurement of potential human exposure to particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from aircraft exhaust. *Environ Health Perspect* 2000;108(9):853-62.
  46. Iavicoli I, Carelli G, Bergamaschi A. Exposure evaluation to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons in an Italian airport. *J Occup Environ Med* 2006;48(8):815-22.
  47. Hu S, Fruin S, Kozawa K, Mara S, Winer AM, Paulson SE. Aircraft emission impacts in a neighborhood adjacent to a general aviation airport in Southern California. *Environ Sci Technol* 2009;43(21):8039-45.
  48. Ellermann T, Massling A. *Measurement of ultrafine particles at the apron of Copenhagen Airport, Kastrop in relation to work environment*. Aarhus, Denmark's Environmental Investigations, University of Aarhus, 2010.
  49. Hsu HH, Adamkiewicz G, Houseman EA et al. The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport. *Atmos Environ* 2012;50:328-37.
  50. Amato F, Moreno T, Pandolfi M et al. Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport. *J Environ Monit* 2010;12(4):854-62.
  51. Carslaw DC, Beevers SD, Ropkins K, Bell MC. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmos Environ* 2006;40:5424-34.
  52. Zhu YF, Hinds WC, Kim S, Sioutas C. Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *J Air Waste Manag Assoc* 2002;52(9):1032-42.
  53. Progetto LASPORT. Disponibile all'indirizzo: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)
  54. Quaglia G, Nanni A, Gilli L et al. *Studio modellistico di impatto ambientale - comparto atmosfera - del sistema aeroportuale di Malpensa*. Novara, ENVITECH, Ambiente e Tecnologie S.r.l., 2001.
  55. Ratliff G, Sequeira C, Waitz I et al. *Aircraft Impacts on Local and Regional Air Quality in the United States*. Cambridge (MA USA), Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction, Massachusetts Institute of Technology, 2009. Disponibile all'indirizzo: [web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj15/proj15finalreport.pdf](http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj15/proj15finalreport.pdf)
  56. Barrett S, Yim S, Stettler M, Eastham S. *Air quality impacts of UK airport capacity expansion. A report by the Laboratory of Aviation and the Environment at MIT in collaboration with the Energy Efficient Cities Initiative at Cambridge University*. Cambridge MA, Laboratory for Aviation and the Environment at MIT, 2012. Disponibile all'indirizzo: <http://lae.mit.edu/wordpress2/wp-content/uploads/2012/10/LAE-2012-010-R-v1.pdf>
  57. Peace H, Maughan J, Owen B, Raper D. Identifying the contribution of different airport related sources to local urban air quality. *Environ Modelling & Software* 2006;21:532-8.
  58. Farias FH. Relative contributions from traffic and aircraft NO<sub>x</sub> emissions to exposure in West London. *Environ Modelling and Software* 2006;21(4):477-85.
  59. Yu KN, Cheung YP, Cheung T, Henry RC. Identifying the impact of large urban airports on local air quality by nonparametric regression. *Atmos Environ* 2004;38:4501-7.
  60. European region of Airports Council International. *Effects of Air Traffic on Air Quality in the Vicinity of European Airports*. Brussels, ACI EUROPE, 2010. Disponibile all'indirizzo: [www.verifavia.com/bases/ressource/\\_pdf/209/ACI-EUROPE-Local-Air-Quality-study-2010-LR.pdf](http://www.verifavia.com/bases/ressource/_pdf/209/ACI-EUROPE-Local-Air-Quality-study-2010-LR.pdf)
  61. Friedman JH. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics* 2001;29(5):1189-232.
  62. Friedman JH. Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics & Data Analysis* 2002;38(4):367-78.
  63. Elith J, Leathwick JR, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *J Anim Ecol* 2008;77(4):802-13.
  64. Carslaw DC, Taylor PJ. Analysis of air pollution data at a mixed source location using boosted regression trees. *Atmos Environ* 2009;43(22-23): 3563-70.
  65. Carslaw DC, Williams ML, Barratt B. A short-term intervention study – Impact of airport closure due to the eruption of Eyjafjallajökull on near-field air quality. *Atmos Environ* 2012;54:328-36.
  66. Diez DM, Dominici F, Zarubiak D, Levy JI. Statistical approaches for identifying air pollutant mixtures associated with aircraft departures at Los Angeles International Airport. *Environ Sci Technol* 2012;46(15):8229-35.