

Contrails e traffico aereo

Note e osservazioni sul fenomeno delle scie di condensazione e su quello delle cosiddette “scie chimiche”

**A CURA DELL' AFR “MODELLISTICA PREVISIONALE”
DEL DIPARTIMENTO PROVINCIALE DI FIRENZE**



ver. 3.0p

Marzo 2011

Indice

1. Premessa	1
2. Il fenomeno	1
3. Le scie di condensazione	4
3.1. Il “contrail factor”	4
3.2. Le condizioni di formazione dei contrails: temperatura critica	6
3.3. Le condizioni di persistenza dei contrails	10
3.4. Le “Appleman chart”	12
3.5. Ancora sulle condizioni di esistenza dei contrails	13
3.6. Condizioni ambientali e contrails	14
4. Effetti sull’ambiente del traffico aereo e delle relative scie di condensazione	21
4.1. Emissioni	21
4.2. Impatti sulla qualità dell’aria	27
4.3. Effetti climalteranti	28
5. Conclusioni	31
Riferimenti bibliografici	32

Contrails e traffico aereo

Note e osservazioni sul fenomeno delle scie di condensazione e su quello delle cosiddette “scie chimiche”

a cura dell'AFR “Modellistica Previsionale”

1. Premessa

L'obiettivo delle presenti osservazioni è quello di fornire una serie di elementi e di informazioni di natura tecnica e scientifica utili per meglio comprendere gli argomenti oggetto di esposti, segnalazioni, richieste di informazioni e chiarimenti provenienti da cittadini o altri Enti sulle questioni legate al fenomeno delle cosiddette “scie chimiche”. Poiché in tale contesto gioca un ruolo fondamentale il fenomeno fisico delle scie di condensazione formate dai fumi di scarico degli aeroplani in volo, è stato necessario effettuare un approfondimento sull'argomento. Una parte del lavoro ha quindi lo scopo di spiegare le condizioni di formazione delle scie di condensazione prodotte dagli aerei.

La ricerca bibliografica effettuata ha permesso di individuare e definire una serie di testi ed articoli provenienti da fonti accertate nei quali vengono spiegati i fenomeni e le osservazioni che sono comunemente indicati come evidenze dell'esistenza delle “scie chimiche”.

Inoltre si è ritenuto doveroso proporre una sintesi degli aspetti legati al traffico aereo che possono effettivamente produrre un impatto sull'ambiente; vengono infatti riportati alcuni dati e risultati relativi alle emissioni del comparto aereo, anche facendo riferimento ai principali aeroporti presenti in Toscana, e successivamente sono indicate alcune stime quantitative sugli impatti attesi sia per quanto riguarda la qualità dell'aria che per gli effetti climalteranti.

Si ritiene che il materiale raccolto e rielaborato, i testi individuati e le considerazioni sviluppate possano costituire una base conoscitiva sufficiente per permettere l'eventuale approfondimento dei fenomeni in oggetto.

2. Il fenomeno

Una semplice ricerca attraverso un motore di ricerca sulla rete internet delle parole “scie chimiche” o “chemtrails” produce un risultato che potrebbe stupire (ad esempio un numero di 1380000 link per “chemtrails” e solo 182000 se ci si limita alla ricerca in lingua italiana), che testimonia di una quantità di materiale (in parte ripetitivo) dedicato direttamente o indirettamente al “fenomeno” e dell'attenzione che lo circonda. La questione ha almeno una rilevanza di tipo sociologico o dal punto di vista di coloro che studiano i fenomeni sociali, psico-sociali ed i mezzi di comunicazione. Non è ovviamente possibile rendicontare in modo esaustivo tale documentazione.

Sommariamente i link ottenuti dalla ricerca si possono suddividere in due grandi insiemi: quelli degli assertori dell'evidenza ed esistenza del fenomeno delle “scie chimiche” e quelli che lo negano o lo mettono in dubbio, anzi più precisamente mettono in dubbio le asserzioni degli altri. Si osservano spesso relazioni di azione e reazione tra i due gruppi.

Il fenomeno fisico, chimico, biologico che sia, in sé prende le mosse dall'osservazione delle scie di condensazione lasciate dagli aerei nel cielo (contrails). Secondo gli assertori dell'esistenza del fenomeno



delle “scie chimiche”, le contrails vengono ritenute in tutto o in parte “anomale” e dovute all’immissione di sostanze chimiche o organismi (virus ad esempio). Da qui deriva il nome di chemtrails o scie chimiche. Successivamente il fenomeno appare estendersi fino ad inglobare altri tipi di interventi e di immissioni; si parla ad esempio di impiego di onde elettromagnetiche per il controllo e la modifica del clima ecc.¹ per cui sotto la stessa etichetta di chemtrails sono raccolte e inserite ipotesi e teorie di vario genere.

Per quanto riguarda le scie di condensazione in ambito scientifico il fenomeno è in gran parte noto e spiegato da tempo anche se continua ad essere studiato, proprio per i suoi possibili effetti ambientali, i quali non sembrano tuttavia quelli paventati o indicati o raccolti sotto l’etichetta “chemtrails”.

La spiegazione teorica della formazione dei contrails è stata sostanzialmente indicata nell’articolo di Appleman del 1953 [1]. Successivamente è stato semplificato l’approccio e sono stati precisati vari elementi e dettagli per rendere la teoria maggiormente in accordo con le osservazioni. Un aspetto rilevante dell’interesse scientifico per l’argomento si riferisce alla capacità di predire la formazione dei contrails.² Anche recentemente sono apparsi articoli scientifici e contributi tesi a migliorare la precisione nella definizione delle condizioni di formazione e persistenza dei contrails ([3], [9], [10], [12], [13], [17]).

Con la nascita ed il diffondersi delle teorie sulle chemtrails, anche il mondo scientifico è stato coinvolto e sono stati prodotti articoli, testi e documenti a carattere più o meno divulgativo, i quali spiegano dal punto di vista scientifico i fenomeni, le osservazioni e le congetture indicate e portate come prove dell’esistenza delle chemtrails. Tra i contributi più recenti in lingua italiana ne sono stati selezionati alcuni, i cui contenuti si possono ritenere sufficienti per ottenere una adeguata ed estesa spiegazione dei fenomeni fisici e meteorologici chiamati in causa.

In particolare si segnala il lavoro del meteorologo Pierluigi Randi [4], nel quale vengono esaminati in dettaglio gli aspetti legati alla fisica dell’atmosfera e la meteorologia; con la spiegazione accessibile dei fenomeni anche complessi che portano alla formazione dei contrails ed inoltre con una estesa disamina esplicativa di foto di fenomeni meteorologici ritenuti invece eventi e prove di chemtrails. Un’analisi molto più sintetica, ma comprensiva di un esame degli effetti ambientali reali del traffico aereo, si può trovare nell’articolo di Luca Onorato su NIMBUS [6].

Per alcuni aspetti più specificamente legati ai temi aeronautici si possono consultare i contenuti disponibili in [8], mentre sull’inefficacia e non convenienza dei metodi e degli strumenti ipotizzati nel perseguire i diversi fini attribuiti alle chemtrails si può vedere l’articolo di Alessandro Delitala su NIMBUS [7], per finire con l’editoriale di Luca Mercalli sullo stesso numero di NIMBUS, nel quale si esprime la condivisibile esortazione ad occuparsi dei problemi reali, che non mancano, anziché di improbabili cospirazioni.

Le precedenti indicazioni possono essere utilizzate in tutto o in parte per ottenere informazioni accessibili e comunque scientificamente rigorose sull’argomento. Purtroppo appare evidente che per coloro che “credono” fermamente nell’esistenza del fenomeno, con un atteggiamento di tipo fideistico simile a quello di adesione ad una credenza, anche la lettura di questi documenti non potrà scalfire la sicurezza nell’esistenza delle chemtrails. L’utilità di tali documenti può invece presentarsi per coloro che venuti a contatto con il materiale informativo prodotto intorno all’argomento vogliono orientarsi e comprendere i fenomeni reali che si osservano.

¹ Con il solito motore di ricerca se si imposta la ricerca sulle parole “chemtrails and aliens” si ottiene il cospicuo risultato di circa 280000 links. Molti dei precedenti siti web o link tendono cioè a collegare i due “fenomeni”, le scie chimiche e gli aliens.

² Si tratta di un interesse scientifico generale (vedi la parte relativa agli impatti), ma anche di un interesse militare in quanto i contrails permettono di individuare un aereo e/o di seguirne la rotta [8],[9].



**Dipartimento provinciale
Firenze**

via Ponte alle Mosse, 211

50144 Firenze

tel. 055 32061 - fax 055 3206218

www.arpato.toscana.it

I testi e documenti precedentemente citati esaminano in dettaglio alcune delle innumerevoli affermazioni che circolano sulle chemtrails e non si ritiene necessario aggiungere elementi su questo aspetto.³

Nel seguito viene presentata invece una descrizione sufficientemente rigorosa, seppur semplificata dal punto di vista scientifico, della teoria sulla formazione delle scie di condensazione, fino alla ricostruzione dei diagrammi detti "Appleman chart" attraverso i quali sono visualizzabili le condizioni di formazione delle scie di condensazione in seguito al passaggio degli aerei.

La teoria sviluppata segue inizialmente la traccia dello storico lavoro di Appleman [1], indicando quando necessario i riferimenti bibliografici più aggiornati, per poi successivamente distaccarsene a favore di un approccio ritenuto più semplice [13].

Dopo aver mostrato che i risultati ottenuti sono sostanzialmente analoghi a quelli attualmente noti ed impiegati ad esempio per la previsione e l'osservazione del fenomeno, vengono esaminate con un certo dettaglio le condizioni di formazione e persistenza dei contrails nonché la lettura ed interpretazione della Appleman chart. Ciò permette tra l'altro di indicare alcuni errori interpretativi spesso presenti nella discussione sull'argomento. A titolo indicativo attraverso i diagrammi di Appleman vengono interpretati alcuni dati di misure ed osservazioni. Successivamente anche se brevemente vengono affrontati i temi legati ai presumibili impatti sull'ambiente legati a questo fenomeno ed al traffico aereo più in generale.

³ Ancora un tentativo di produrre una dettagliata e puntuale analisi e spiegazione dei fenomeni ritenuti prove dell'esistenza delle chemtrails e di smentire le corrispondenti tesi ha impegnato il CICAP (Comitato Italiano per il Controllo delle Affermazioni sul Paranormale, si veda <http://www.cicap.org/new/articolo.php?id=273641>).

3. Le scie di condensazione

Seguendo il ragionamento di Appleman [1], il propellente-carburante che viene bruciato nel motore (jet) degli aerei produce un certo volume di gas esausti caldi (ai quali cioè viene ceduta l'energia sviluppata nella combustione). Questi si mescolano con l'aria ambiente: il rimescolamento lungo la scia dell'aeroplano aumenta gradualmente finché dopo un certo tempo si può considerare che l'aria della scia sia tornata nelle condizioni iniziali (in temperatura e pressione); in realtà si saranno verificate differenze fisiche sostanziali proprio nel caso in cui si formino dei contrails permanenti.

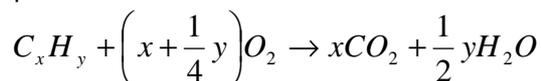
Il metodo per determinare le condizioni di formazione dei contrails consiste nel valutare lo stato della miscela di aria e gas incombusti nella scia dell'aeroplano in termini di temperatura e vapor d'acqua, considerando che i gas esausti apportano alla miscela l'energia termica della combustione ed il vapor d'acqua prodotto da questa. La miscela tra i gas esausti e l'aria ambiente assume quindi una temperatura che dipende dalla quantità di aria ambiente rimescolata ad un dato istante e dall'energia termica fornita dai gas esausti; il contenuto di vapor d'acqua della miscela dipende dall'umidità presente nell'aria ambiente e da quella apportata dai gas esausti.

Si assume che:

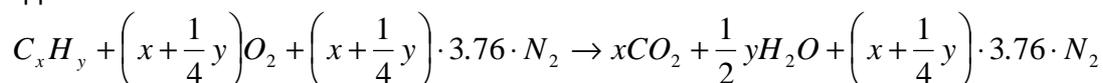
1. i processi avvengano a pressione costante e siano adiabatici (isoentalpici); il rimescolamento nella scia ed i relativi scambi termici siano pressoché istantanei;⁴
2. la formazione dei contrails avvenga soltanto se nel volume di gas della scia viene raggiunta la saturazione rispetto all'acqua.

3.1 Il "contrail factor"

La reazione di combustione che coinvolge un idrocarburo come combustibile può essere schematizzata, ipotizzando condizioni stechiometriche, come [2]



oppure come



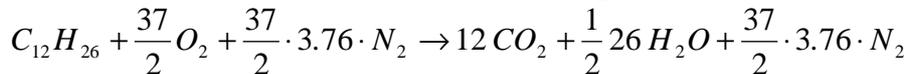
nella quale è stata inserita anche la parte relativa all'azoto che non partecipa alla reazione, ma che risulta necessaria per quantificare il volume o la massa di aria che partecipa alla reazione.

Il coefficiente 3.76 assegnato al termine dell'azoto tiene conto che nell'aria utilizzata come comburente l'ossigeno compare in una proporzione di volume del 21% mentre l'azoto all'incirca per il rimanente 79%; il rapporto tra questi volumi (rapporto molare) è esattamente il coefficiente 3.76, il quale indica che per ogni molecola di ossigeno coinvolta nella reazione chimica di combustione, ne risultano necessariamente coinvolte indirettamente 3.76 di azoto (molecolare).⁵

⁴ Questa ipotesi è ovviamente un'approssimazione, tuttavia è favorita e resa verosimile dall'elevata turbolenza presente nella scia dell'aereo, la quale favorisce il rimescolamento e gli scambi energetici al suo interno.

⁵ Poiché l'aria è composta dal 21% di O₂ e da circa il 79% di N₂ in volume, se si considera una mole di aria questa occuperà in date condizioni di temperatura e pressione un volume V, del quale il 21% occupato da molecole di O₂ e il rimanente 79% da N₂. In quelle date condizioni, all'interno del volume di aria V'=kV/0.21 si troveranno allora k moli di ossigeno e k 0.79/0.21 moli di N₂, ovvero per ogni mole di O₂ sono presenti in aria 0.79/0.21=3.76 moli di N₂.

Il combustibile o propellente aeronautico è in genere tipo cherosene, quindi



questo, passando dalle singole molecole alla mole indica che per bruciare una mole di cherosene si utilizzano 18.5 moli di ossigeno, coinvolgendo 69.6 moli di azoto, ovvero si interessano 2540 g di aria (18.5 x 32 + 69.6 x 28, avendo indicato con 32 e 28 g/mole le masse molari di ossigeno e azoto molecolari). Bruciando 1 g di cherosene (massa molare ≈ 170.3 g/mole) si coinvolgono nei fumi di combustione 2540/170.3=14.9 g di aria.

Analogamente si ottiene che nella combustione di 1 g di cherosene vengono liberati circa 3.1 g di CO₂ e 1.37 g di vapor d'acqua (avendo espresso con 44 e 18 g/mole le masse molari di biossido di carbonio e di acqua rispettivamente).

Considerando il potere calorifico inferiore del cherosene pari a 43.1 MJ/kg, si ha che la combustione di 1 g di cherosene produce una energia termica di circa 43100 J ovvero (essendo 1 cal = 4.186 J) circa 10330 cal.

In sostanza ne risulta che i fumi di scarico che si rimescolano con l'aria ambiente nella scia dell'aeroplano prodotti dalla combustione di 1 g di cherosene, sono costituiti da circa 14.53 g di gas esausti e da 1.37 g di vapor d'acqua, ed apportano un'energia termica di circa 10330 cal (nell'ipotesi grossolana che tutta l'energia termica della reazione di combustione risulti disponibile).

Si ipotizzi che ad un certo istante nella scia si siano miscelati N grammi di aria ambiente per ogni grammo di gas esausti. L'energia termica apportata farà variare la temperatura T della miscela secondo la relazione

$$\Delta Q = c_p M \cdot \Delta T$$

essendo c_p il calore specifico a pressione costante della miscela, per il quale si può assumere per semplicità il valore di quello dell'aria di circa 1005 J/(K kg) ovvero circa 0.24 cal/(K g), trascurandone la dipendenza dalla temperatura; infine M rappresenta la massa contenuta nella miscela. Riferendosi alla combustione di 1 g di cherosene si ha allora che la variazione di temperatura della miscela rispetto a quella ambiente sarà data da:

$$\Delta T = 10330 / [0.24 \cdot 14.53N] \text{ o in termini più generali e formali si può scrivere}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c_p M} = \frac{\Delta Q}{c_p m_{ex} N}$$

in cui la massa M di aria della scia è espressa come N volte la massa m_{ex} del gas esausto emesso dall'aereo.

Analogamente, nella miscela si sono apportati 1.37 g di acqua e l'incremento nel rapporto di mescolanza della miscela (espresso come g di acqua/ kg di massa della miscela)⁶ è approssimativamente dato da

$$\Delta q = 1.37 / [14.53N / 1000].$$

Più in generale, formalmente si avrà

$$\Delta q = 1000 \cdot m_w / [m_{ex} N]$$

⁶ Il rapporto di mescolanza (mixing ratio) è il rapporto tra la massa di vapor d'acqua e la massa di aria secca contenute in un dato volume di aria umida; Si può vedere [14] o analogo testo per la definizione delle grandezze e parametri fisici associati all'umidità nell'atmosfera.

in cui si è indicata con m_w la massa di acqua apportata alla miscela dai gas esausti.

Allora il rapporto tra l'incremento di acqua nella miscela ed il corrispondente incremento di temperatura è

$$C_F = \frac{\Delta q}{\Delta T} = \frac{1.37 \cdot 1000}{14.53N} \cdot \frac{0.24 \cdot 14.53N}{10330} = 0.0318 \text{ g}/(^{\circ}\text{C kg})$$

o in generale

$$C_F = \frac{\Delta q}{\Delta T} = \frac{1000 \cdot m_w \cdot c_p}{\Delta Q}$$

Questo rapporto (successivamente indicato come "contrail factor") riveste un ruolo fondamentale in quanto mette a confronto i due fenomeni che si contrappongono nella formazione dei contrails: l'incremento di temperatura che tende ad innalzare la tensione di vapor saturo della miscela, quindi ad allontanarla dalle condizioni di saturazione, e l'apporto di vapore che tende invece ad avvicinare la miscela alle condizioni di saturazione.

Si osserva inoltre che con le ipotesi fatte la variazione di temperatura della miscela è inversamente proporzionale alla quantità di aria ambiente inglobata nella scia dell'aeroplano, e le due variabili sono sostanzialmente interscambiabili.

Il valore del contrail factor utilizzato nell'articolo originale di Appleman [1] è di 0.0336 g/($^{\circ}\text{C kg}$), ottenuto impiegando un valore di 10000 cal/g come energia termica disponibile nella miscela dei gas esausti, ed utilizzando un valore di 1.4 g di vapor d'acqua prodotto dalla combustione di 1 g di combustibile. Tale valore del contrail factor era considerato costante, cioè valido per tutte le tipologie di aeroplano; i numerosi studi successivi (vedi bibliografia in [3] e [9]) hanno invece evidenziato la variabilità di questo termine in relazione alla tecnologia dei motori dell'aeromobile ed alla sua effettiva efficienza nel volo. In particolare in [3] viene fornita una espressione che lega il contrail factor all'efficienza di volo e quindi alla spinta dell'aeroplano tenendo conto delle perdite di energia cinetica dovute ai vortici della scia; in [9] sulla base di precedenti studi si utilizzano valori differenti del contrail factor in relazione alla tipologia del motore del jet (no bypass, low bypass e high bypass). Il contrail factor precedentemente calcolato rappresenta un valore minimo; gli studi citati impiegano valori superiori anche rispetto a quello originariamente impiegato da Appleman, in quanto l'evoluzione dei motori e dei velivoli verso una maggiore efficienza nel volo è andata nella direzione di ridurre l'energia termica perduta nei gas esausti a disposizione della miscela della scia.

3.2 Le condizioni di formazione dei contrails: temperatura critica

La seconda ipotesi utilizzata da Appleman, successivamente verificata sperimentalmente (si veda la bibliografia riportata in [3], [9] e [13]), definisce le condizioni fisiche che permettono o meno la formazione dei contrails. Infatti se durante il processo di rimescolamento tra aria ambiente e gas esausti si verificano condizioni di saturazione per il vapor d'acqua⁷ si ha la possibilità di formazione della scia: la condensazione in forma liquida del vapor d'acqua viene seguita rapidamente dalla transizione a ghiaccio e dal mantenimento o meno del contrail nel tempo in base all'evoluzione delle condizioni ambientali. La scia di condensazione diviene visibile quando si formano cristalli di ghiaccio e può persistere più o meno ben definita per qualche secondo o per tempi più lunghi.

⁷ Si intende qui la saturazione rispetto all'acqua allo stato liquido. Successivamente quando necessario le condizioni di saturazione del vapor d'acqua verranno distinte se riferite alla fase liquida o a quella solida.

La formazione dei contrails è legata anche ad altre condizioni, quali ad esempio la presenza di nuclei di condensazione i quali permettono che avvenga effettivamente il passaggio tra la fase vapore e quella liquida [3],[4]. Come indicato in [1] si assume che questa funzione sia svolta dal particolato atmosferico presente e da quello apportato dai fumi di combustione dell'aereo. Come descritto in [4], l'insieme dei processi e dei fenomeni che concorrono alla formazione ed alla dinamica del contrail è assai vasto, conseguentemente le condizioni ed i risultati riportati indicano soltanto la possibilità e non la certezza della formazione dei contrails.

Appleman esamina separatamente ed in successione le diverse situazioni e combinazioni considerando prima il fabbisogno di umidità richiesto per mantenere le condizioni di saturazione in un ambiente già saturo, quindi l'umidità necessaria per ottenere la saturazione se l'ambiente non è invece saturo, infine quella richiesta per dar luogo ad una scia visibile (ovvero satura rispetto al ghiaccio). Le diverse situazioni e la possibilità della formazione del contrail dipendono dalle condizioni ambientali di pressione (quota), temperatura ed umidità. In particolare si osserva che affinché si possa formare la scia occorre che, fissate le altre variabili, la temperatura dell'ambiente risulti inferiore ad un valore indicato come critico.

Senza seguire l'intero percorso di Appleman caratterizzato dalla risoluzione grafica e numerica delle relazioni e condizioni specifiche delle diverse situazioni (o quello decisamente più semplice successivamente indicato in [9] e basato sull'interpretazione grafica del contrail factor), di seguito viene sinteticamente riportato un approccio analitico seguendo (e correggendo) quanto proposto in [13], limitandosi alla determinazione della temperatura critica e dei relativi diagrammi.

Affinché si formi il contrail occorre che in un punto della scia il rapporto di mescolanza (q_p) risulti maggiore o uguale al rapporto di mescolanza di saturazione rispetto all'acqua (q_s) alla temperatura T_p del punto considerato:

$$q_p(T_p) \geq q_s(T_p) \text{ con } T_p = T_a + \Delta T .$$

Sottraendo da entrambe le parti il rapporto di mescolanza dell'aria ambiente e dividendo per la differenza di temperatura tra il punto P considerato e quella ambiente, la precedente relazione viene riferita alle differenze rispetto alle quantità ambiente ed ai ratei di variazione, permettendo di introdurre il contrail factor:

$$\frac{q_p(T_a + \Delta T) - q_a(T_a)}{\Delta T} \geq \frac{q_s(T_a + \Delta T) - q_a(T_a)}{\Delta T} \Rightarrow C_F \geq \frac{q_s(T_a + \Delta T) - q_a(T_a)}{\Delta T} \quad (1)$$

Indicando con e_a ed e_s le pressioni parziali del vapor d'acqua nelle condizioni ambientali e alla saturazione e con p_{atm} la pressione atmosferica, ricordando la relazione che lega il rapporto di mescolanza alla saturazione rispetto a quello ambiente si ha [14]

$\frac{q_a}{q_s} = \frac{e_a}{p_{atm} - e_a} \cdot \frac{p_{atm} - e_s}{e_s}$ e quindi approssimativamente (trascurando le pressioni parziali rispetto a quella atmosferica), si può scrivere⁸

$$q_a \approx q_s \cdot \frac{RH}{100}$$

nella quale RH indica l'umidità relativa; quindi la precedente relazione (1) può essere scritta nella forma:

⁸ In condizioni ambientali di saturazione l'espressione è esatta. Poiché la tensione di vapor saturo è maggiore o uguale a quella del vapor d'acqua, il valore approssimato scelto del mixing ratio ambientale è maggiore o uguale di quello esatto. Poiché tale valore è sottratto nel membro a destra della disuguaglianza (1), il segno di tale disuguaglianza è comunque mantenuto.

$$C_F \cdot \Delta T \geq q_s(T_a + \Delta T) - q_s(T_a) \cdot \frac{RH}{100}$$

considerando che il rapporto di mescolanza alla saturazione vale:

$$q_s(T, p) = 1000 \cdot \frac{e_s(T)}{p_{atm} - e_s(T)} \cdot \frac{M_v}{M_a}$$

con e_s la tensione di vapor saturo alla temperatura T , M_v ed M_a rispettivamente i pesi molecolari di vapore ed aria secca, la condizione precedente può essere scritta come:

$$C_F \cdot \Delta T \geq 1000 \cdot \frac{e_s(T_a + \Delta T)}{p_{atm} - e_s(T_a + \Delta T)} \cdot \frac{M_v}{M_a} - 1000 \cdot \frac{e_s(T_a)}{p_{atm} - e_s(T_a)} \cdot \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{RH}{100}$$

La temperatura critica è il valore massimo di temperatura ambiente per la quale la precedente relazione è soddisfatta; corrisponde quindi al segno di uguaglianza nelle precedenti espressioni e costituisce la soluzione rispetto alla variabile temperatura della relativa equazione, al variare dei possibili valori di ΔT , fissate le condizioni ambientali (umidità relativa e pressione) ed il contrail factor C_F .

Assumendo il rapporto tra pesi molecolari pari a 0.621979, e trascurando la tensione di vapor saturo ai denominatori rispetto a quella atmosferica⁹, si ottiene l'equazione

$$100 \cdot p_{atm} \cdot C_F \cdot \Delta T - 62197.9 \cdot e_s(T_c + \Delta T) + 621.979 \cdot e_s(T_c) \cdot RH = 0 \quad (2)$$

che permette di calcolare la temperatura critica una volta nota la tensione di vapor saturo.

Esistono numerose espressioni funzionali (di origine empirica) che esprimono la dipendenza tra tensione di vapor saturo (rispetto all'acqua liquida) e temperatura [16]. In [13] viene utilizzata l'espressione di Goff-Gratch, riportata tuttavia con alcuni coefficienti errati.¹⁰ Di seguito è data invece l'espressione corrispondente tratta da [16]:

$$\log_{10} e_s = -7.90298 \cdot (373.16/T - 1) + 5.02808 \cdot \log_{10}(373.16/T) - 1.3816 \cdot 10^{-7} (10^{11.344(1-T/373.16)} - 1) + 8.1328 \cdot 10^{-3} (10^{-3.49149(373.16/T-1)} - 1) + \log_{10}(1013.246)$$

nella quale la temperatura è espressa in K e la pressione in hPa.

Ricavando e_s dalla precedente espressione e sostituendo nella (2) si ottiene infine l'equazione da risolvere per stimare la temperatura critica.

Tale equazione deve essere risolta numericamente¹¹ per ogni valore possibile di ΔT (nelle verifiche qui effettuate è stato utilizzato un intervallo compreso tra 1 e 40 °C). Il massimo valore tra quelli ottenuti al variare di ΔT tenendo costanti la pressione atmosferica, l'umidità relativa e il contrail factor, rappresenta la stima della temperatura critica per quelle date condizioni di pressione e umidità.

Nella successiva Figura 1A vengono riportati i valori di temperatura critica ottenuti al variare dell'umidità relativa e della pressione atmosferica. Questi grafici sono simili alle "Appleman chart" predisposte dalla

⁹ Considerando i valori della tensione di vapor saturo presentati nella successiva Figura 2 l'approssimazione effettuata si può ritenere lecita anche alle quote elevate che qui interessano. Questa approssimazione è comunque solo una semplificazione, non essendo necessaria alla soluzione che avviene per via numerica.

¹⁰ L'espressione di Gross-Gratch riportata in [13] è riferita al logaritmo naturale di e_s anziché espressa nel logaritmo in base 10 come in [16]; la verifica dei coefficienti richiede quindi alcuni calcoli.

¹¹ In [13] impiegando una equazione derivata senza inserire esplicitamente l'umidità relativa ed utilizzando per la tensione di vapor saturo l'espressione di Tetens (vedi [14] e [16]) si riesce anche ad ottenere una soluzione analitica per la temperatura critica.



NASA per attività di osservazione dei contrails (come quella riportata a lato in figura 1B)¹². Si osserva un buon accordo qualitativo tra i grafici riportati nelle due figure.

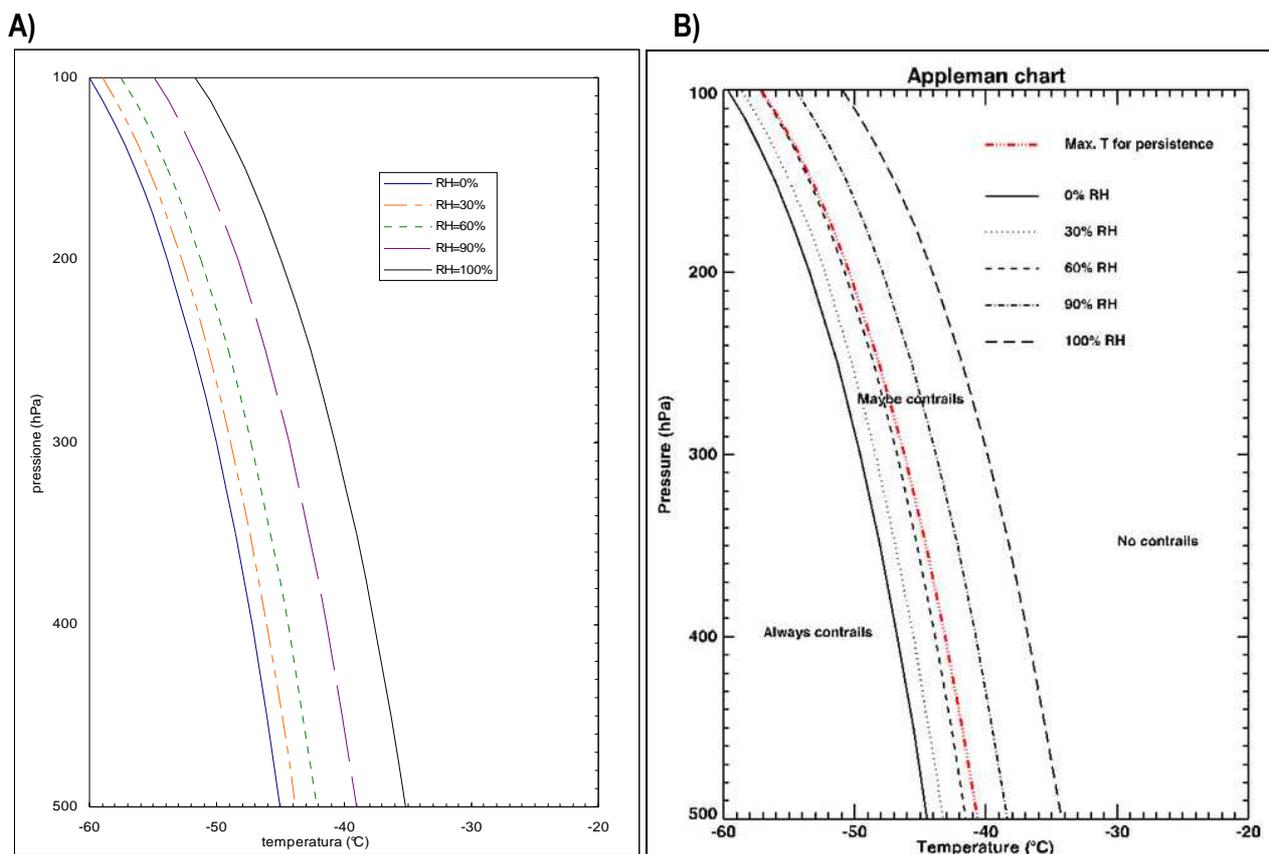


Figura 1: **A)** a sinistra le curve corrispondenti alla temperatura critica al variare della pressione atmosferica, per alcuni valori di umidità relativa, calcolate con il procedimento descritto e relative ad un contrail factor di 0.0390 g/(kg K), corrispondente ad una tecnologia motoristica più evoluta ovvero “high-bypass engine”. Per poter effettuare un confronto con le analoghe curve disponibili in letteratura (riportate in B), viene mostrata la parte compresa tra 500 e 100 hPa, per valori di umidità relativa pari a 0%, 30%, 60%, 90% e 100%. **B)** a destra si riporta l’Appleman chart (<http://asd-www.larc.nasa.gov/GLOBE/resources/activities/chart1.jpg>) che presenta le stesse informazioni della parte A.

In Tabella 1 sono riportate le differenze tra alcuni valori indicativi della temperatura critica calcolati con il metodo sopra esposto e quelli presentati in [9], in entrambi i casi relativamente al contrail factor pari a 0.0390 g/(kg K) corrispondente alla tecnologia di motore high-bypass. Come si può osservare le differenze risultano estremamente modeste in quasi tutti i casi, anche se si osserva uno scarto pressoché sistematico di circa un terzo di grado per il caso di umidità pari al 100%.

¹² Sul sito web della NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA), è infatti presente una sezione dedicata ai contrails “Contrail education” (<http://asd-www.larc.nasa.gov/GLOBE/resources/activities/>), all’interno della quale sono raccolte numerose informazioni e spiegazioni (in genere qualitative) del fenomeno. Una traduzione non ufficiale dei contenuti di questo sito si può trovare all’indirizzo: <http://www.bragwebdesign.com/contrails/index.php> (ultimo accesso gennaio 2011)

Tabella 1: differenze nei valori calcolati di temperatura critica ($^{\circ}\text{C}$) rispetto a quelli riportati in [9]; contrail factor $C_F = 0.0390 \text{ g}/(\text{kg K})$, (high-bypass)

Pressione (hPa)	RH				
	0%	30%	60%	90%	100%
50	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.33
100	-0.01	-0.02	0.00	-0.04	-0.33
200	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.33
300	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.34
400	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.34
500	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.34

3.3 Le condizioni di persistenza dei contrails

In Figura 1B è riportata anche una curva che rappresenta le temperature critiche massime affinché possano presentarsi dei contrails persistenti, ovvero scie di condensazione che si mantengono visibili per tempi lunghi (in teoria finché non si modificano sostanzialmente le condizioni ambientali). Infatti a seconda delle condizioni fisiche dell'ambiente, una volta che la scia di condensazione raggiunge di nuovo l'equilibrio termico con l'aria ambiente ($\Delta T=0$) questa può rimanere visibile nel cielo per tempi che vanno da pochi secondi all'ordine di ore. Il fenomeno è comprensibile se si considera che le condizioni di saturazione dell'acqua allo stato solido corrispondono ad una minore tensione di vapore rispetto a quella di saturazione per l'acqua allo stato liquido: è quindi possibile che le condizioni ambiente siano sature o sovrasature rispetto al ghiaccio, e quindi favoriscano la persistenza del contrail, ma non lo siano rispetto all'acqua. Mentre è d'altra parte possibile anche che le condizioni ambiente non contengano sufficiente vapor d'acqua neppure per la saturazione rispetto al ghiaccio e quindi il contrail si dissolve più o meno rapidamente.¹³ In Figura 2 sono riportate le curve relative alla pressione di saturazione rispetto all'acqua ed al ghiaccio per le temperature nell'intervallo di interesse.

Quando le condizioni ambientali (temperatura ambiente, umidità e pressione atmosferica) corrispondono a punti nella zona compresa tra le due curve riportate in Figura 2, si hanno condizioni sovrasature rispetto al ghiaccio (ma non rispetto all'acqua liquida), per cui si possono mantenere i contrails per tempi lunghi; quando si è in situazioni corrispondenti a punti al di sotto di entrambe le linee si ha il dissolvimento dell'eventuale contrail in quanto si è in condizioni non sature rispetto al ghiaccio e si ha la sublimazione dei cristalli che compongono la scia. Al di sopra di entrambe le linee si hanno situazioni sovrasature anche rispetto all'acqua, corrispondenti in genere alle condizioni presenti all'interno delle nubi naturali (non della tipologia dei cirri).¹⁴

In Figura 3 è riportato il rapporto tra le tensioni di vapor saturo rispetto al ghiaccio ed all'acqua liquida; per ogni valore di temperatura questo dato rappresenta quindi l'umidità relativa minima necessaria affinché i contrails siano persistenti.

¹³ All'evoluzione e dissolvimento dei contrails concorrono altre condizioni quali l'intensità dei venti, le correnti ascensionali o discendenti, la presenza di turbolenza ecc. [3], [4]. Si veda anche quanto riportato (in sezione 3.6).

¹⁴ I cirri infatti sono delle nubi costituite da cristalli di ghiaccio e quindi del tutto simili come composizione alle contrails. I meccanismi di formazione delle nubi naturali sono assai complessi ed in parte ancora non completamente noti; si veda quanto riportato sinteticamente in [3] e [4], oppure [5] per una descrizione quantitativa più completa. Si ricorda che in alcuni casi l'energia rilasciata dal passaggio dell'aereo può essere tale da portare al dissolvimento di parte delle nubi: questo fenomeno è indicato come "negative contrails" o "distrails" [11].

Questo è il motivo per cui nelle Appleman chart (Figura 1B e Figura 4) la linea relativa alla temperatura critica massima per la persistenza dei contrails è compresa tra quelle corrispondenti ad RH=60% ed RH=90%¹⁵. Di conseguenza affinché siano presenti contrails persistenti, in termini di umidità relativa dell'ambiente è necessario che questa sia superiore al 60%, all'interno del range di temperature di interesse, tra -55 °C e -35 °C. A temperature inferiori è richiesta una minore umidità relativa (si veda la Figura 3).

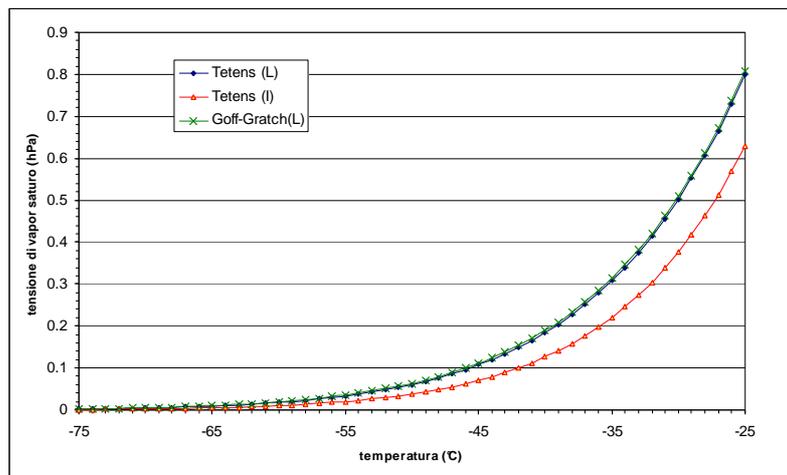


Figura 2: I grafici rappresentano i valori delle tensioni di vapor saturo rispetto all'acqua in forma liquida (L) ed al ghiaccio (I) nell'intervallo di temperature tra -25 °C e -75°C. Per la forma liquida sono riportate due formulazioni, Gross-Gratch e Tetens, per il ghiaccio solo quella di Tetens [16].¹⁶

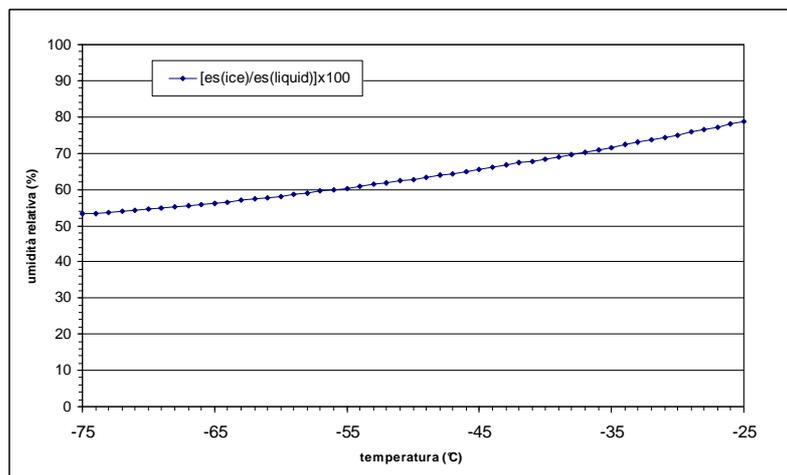


Figura 3: valori del rapporto tra le tensioni di vapor saturo rispetto al ghiaccio [es(ice)] ed all'acqua in forma liquida [es(liquid)] nell'intervallo di temperature tra -25 °C e -75°C. In entrambi i casi per la dipendenza delle tensioni dalla temperatura sono state utilizzate le formulazioni di Tetens (riportate in Figura 2) [16].

¹⁵ Una spiegazione più dettagliata richiederebbe l'impiego del metodo adottato in [9] ed è pertanto omessa.

¹⁶ Si osserva che le diverse formulazioni per la tensione di vapor saturo riportate in [16] mettono in evidenza anche le incertezze associate: le diverse espressioni tendono ad avere differenze anche rilevanti con la diminuzione delle temperature.

3.4 Le "Appleman chart"

I grafici riportati in Figura 1B (duplicata in Figura 4), detti Appleman chart, come visto mostrano la temperatura critica in corrispondenza dei valori di pressione atmosferica (ovvero della quota del punto considerato) e per alcuni fissati valori di umidità relativa; quindi permettono di definire le condizioni ambientali che sono compatibili o meno con la formazione (e persistenza) dei contrails.¹⁷

Questo aspetto è evidenziato suddividendo l'area occupata dal grafico in tre zone:

- quella al di sotto della linea corrispondente alla temperatura critica corrispondente ad umidità relativa 0%, individuata dall'indicazione "Always contrails", essendo caratterizzata da temperature dell'ambiente inferiori a quelle critiche per ogni valore di umidità relativa, corrisponde a condizioni nelle quali si potrà sempre avere la formazione dei contrails. L'Appleman chart non dice niente riguardo alla persistenza di tali contrails; questi risulteranno persistenti se sono soddisfatti i criteri precedentemente indicati ovvero se la pressione di vapore dell'aria ambiente risulta satura rispetto al ghiaccio, cioè se l'umidità relativa è superiore al valore di RH corrispondente a quella data temperatura sulla curva di Figura 3;
- nella zona a destra della linea di temperatura critica corrispondente ad umidità relativa del 100%, contrassegnata con l'indicazione "No contrails" la temperatura ambiente è superiore alla temperatura critica corrispondente ad ogni valore di umidità relativa e quindi non possono formarsi contrails;
- nella zona compresa tra le curve di temperatura critica corrispondenti ad umidità relativa tra 0% e 100%, individuata dall'etichetta "May be contrails" la formazione dei contrails potrà verificarsi o meno a seconda che, fissata quella data pressione atmosferica, la temperatura ambiente sia inferiore a quella critica per quella data umidità relativa; ovvero se le condizioni ambientali (il punto considerato nel piano del grafico avente per ascissa la temperatura ambiente e per ordinata la pressione atmosferica) si trova a sinistra rispetto alla linea di temperatura critica corrispondente alla stessa umidità relativa dell'ambiente. In questo caso potrà aversi persistenza del contrail soltanto a sinistra della linea "Max. T for persistence" e quando i valori ambientali di umidità relativa risulteranno saturi o sovrasaturi rispetto al ghiaccio. Appare necessario osservare che in realtà in questa zona risulteranno determinanti per la formazione dei contrails anche tutti gli elementi che sono stati trascurati nell'analisi qui riportata [4].

Si osserva che poiché l'Appleman chart è un diagramma bidimensionale i punti che rappresentano le condizioni ambientali sono definiti esclusivamente dalle due coordinate temperatura e pressione (o quota). La terza coordinata o grandezza (tra quelle impiegate nella teoria qui riproposta) che definisce lo stato ambiente, ovvero l'umidità relativa RH, rimane non determinata, ed il valore eventualmente noto di questa serve solo per individuare la possibilità di formazione dei contrails (e/o la loro persistenza) se il punto delle condizioni ambientali si trova nella zona compresa tra le curve 0% e 100%. Quindi se il punto che rappresenta le condizioni ambientali (temperatura e pressione) si trova nella prima zona, a sinistra della linea 0%, i contrails si potranno formare con qualunque valore di umidità relativa ambientale, mentre risulteranno persistenti soltanto se l'umidità relativa corrisponderà a condizioni sature o sovrasature rispetto al ghiaccio.

Occorre anche osservare che le previsioni sulla presenza di contrails effettuate attraverso l'Appleman chart o gli altri algoritmi semplificati di determinazione delle soglie di temperatura critica ottengono indici di

¹⁷ Una discussione dettagliata delle Appleman chart si può trovare in [4].

prestazione anche elevati, fino all'80% di successi; tuttavia rimangono delle serie di casi osservati non previsti. Ciò è comprensibile tenendo conto dei numerosi fattori ed elementi trascurati nella teoria [10], [17].

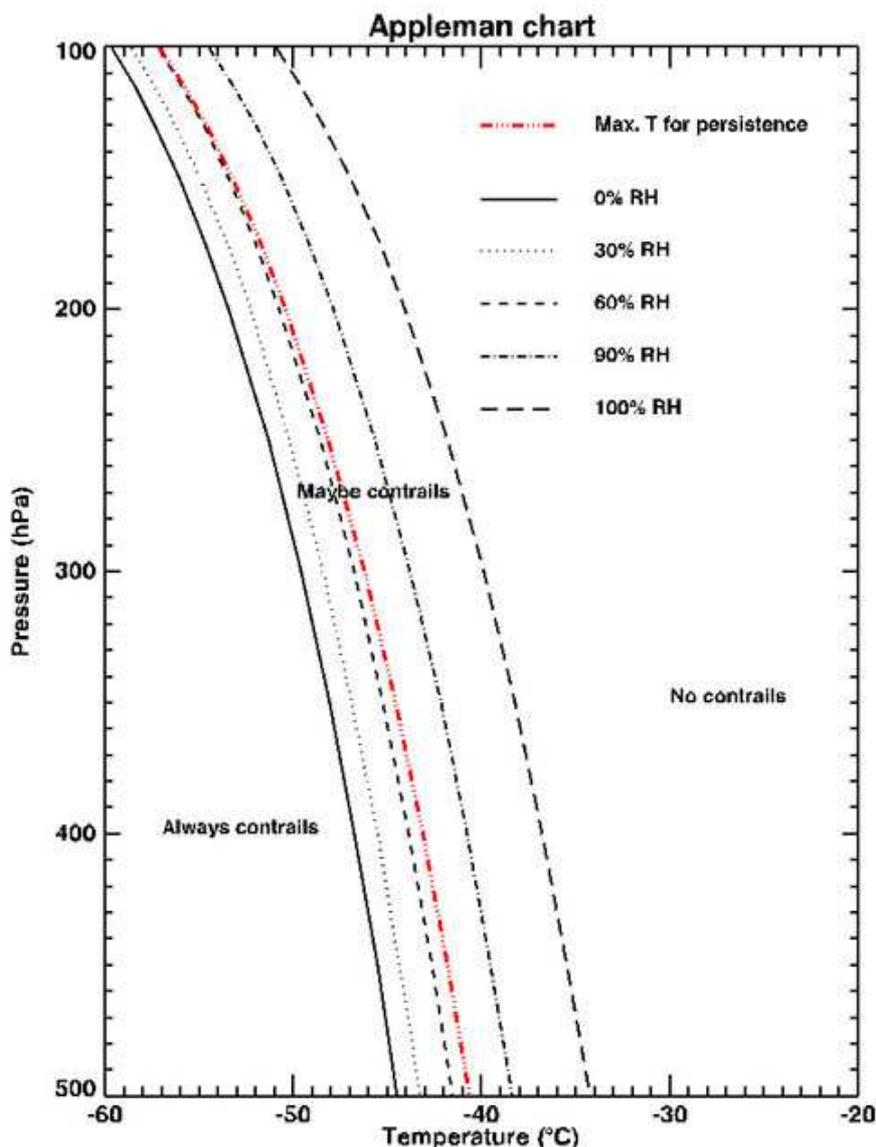


Figura 4: Appleman Chart; sono visualizzate le curve di temperatura critica dei contrails per alcuni valori di umidità relativa e la curva delle temperature massime per avere contrails persistenti, limitatamente all'intervallo di pressione atmosferica compresa tra 500 e 100 hPa (NASA <http://asd-www.larc.nasa.gov/GLOBE/resources/activities/chart1.jpg>).

3.5 Ancora sulle condizioni di esistenza dei contrails

Le condizioni fisiche di formazione dei contrails e le Appleman chart sono uno degli argomenti più ricorrenti e dibattuti nella vasta documentazione che si riferisce all'esistenza delle chemtrails. In genere vengono considerate e prese a riferimento alcune condizioni estratte da documenti e testi a scopo divulgativo (quali ad esempio quelli della NASA). In alcuni casi ci si spinge a descrivere (anche in modo errato) le

Appleman chart. Spesso si assiste ad una manipolazione evidente dei contenuti con traduzioni di comodo nelle quali il probabile diviene l'assoluto ed il certo possibile.

A titolo esemplificativo si riporta sotto il commento e la descrizione delle Appleman chart data in uno dei siti web italiani attivi sulle chemtrails: ¹⁸

“In relazione ai diversi valori di temperatura, umidità e pressione, il diagramma di Appleman indica tre zone distinte:

- *Always contrails: zona nella quale si possono formare le scie di condensazione NON persistenti*

- *No contrails: zona nella quale le scie di condensazione non si possono formare*

- *Maybe contrails: zona nella la formazione di scie di condensazione è forse probabile.”*

E anche:

“La zona compresa tra la linea tratteggiata rossa e quelle a fianco (RH = 60%) indica la zona nella quale si possono verificare le scie di condensazione persistenti.”

Alla luce di quanto precedentemente spiegato si deve ritenere che non si tratti di un semplice errore di traduzione ma di incapacità di comprensione o addirittura di una intenzionale manipolazione e falsificazione dei contenuti.

3.6 Condizioni ambientali e contrails

Una volta definite le condizioni di formazione e persistenza dei contrails per completare l'analisi occorre valutare se e quando queste si verificano, se le quote dei voli commerciali attraversano zone con tali caratteristiche ecc.. Rimandando necessariamente ai testi citati ed alle relative bibliografie per un'analisi estesa e puntuale di questo e degli altri aspetti, si ritiene tuttavia utile fornire nel seguito alcune informazioni relative alle condizioni ambientali alle quote di interesse.

La disponibilità dei dati rilevati dai radiosondaggi¹⁹ quotidiani effettuati presso alcuni aeroporti italiani permette di valutare, seppur a livello indicativo, quali sono le condizioni ambientali (ad esempio temperatura e umidità) alle diverse quote di altezza e quindi di capire se possono verificarsi le condizioni previste dalla teoria precedentemente sintetizzata per la formazione dei contrails.

Utilizzando i dati dei radiosondaggi quotidiani effettuati alle ore 12 GMT presso l'Aeroporto di Milano – Linate per i mesi di gennaio 2009, gennaio e febbraio 2010 sono stati valutati i valori di sintesi riportati nella seguente Tabella 2.

Per semplicità, raggruppando i dati per classi di valori di pressione atmosferica (tra 500 e 400 hPa, tra 400 e 300 hPa, tra 300 e 200 hPa) e di conseguenza per fasce di altezza, nella tabella sono calcolati i valori medi e gli estremi (massimo e minimo) di umidità relativa e temperatura delle misure corrispondenti ai radiosondaggi delle ore 12 disponibili durante i vari mesi esaminati.

Nella prima fascia, tra 5000 e 7000 m di quota, le temperature medie sono risultate dell'ordine dei -30 °C, con minimo di -46.4 °C e massimo di -17.1 °C; in questa fascia i valori di umidità relativa coprono l'intero range tra l'1% ed il 98%. Nella seconda fascia, tra circa 7000 e 9000 m di quota, la temperatura media è risultata tra i -43 ed i -44 °C, con un estremo inferiore di -58 °C nel febbraio 2010; l'umidità media è attestata intorno al 30% e spazia nel range tra l'1% ed il 79%. Infine nella terza fascia che va da circa 9000 ad oltre gli 11000 m di quota si hanno temperature medie dell'ordine di -56 °C, con un minimo di -70 °C ed umidità relativa media intorno al 20%, all'interno di un range che va dall'1% al 65%.

¹⁸ http://www.sciechimiche.org/scie_chimiche/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=97

(ultimo accesso 13/01/2011)

¹⁹ All'indirizzo <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html> dell'University of Wyoming è possibile ottenere i dati dei radiosondaggi su alcuni degli aeroporti italiani.

Nella fascia ancora superiore (tra 200 hPa e 100 hPa, 13000-16000 m di quota) non riportata in Tabella 2, le temperature medie ed estreme si mantengono sui valori della fascia precedente mentre si riducono ulteriormente quelli dell'umidità relativa, con valori generalmente di pochi punti percentuali (1-2%) eccetto che in alcuni sporadici casi nei quali si raggiungono anche livelli del 40%.

Tabella 2: indici sintetici calcolati sui dati dei radiosondaggi ore 12 GMT presso Milano-Linate

Gennaio 2009									
	500-400 hPa			400-300 hPa			300-200 hPa		
	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)
Massimo	7165	-17.1	94	9128	-29.3	74	11718	-41.7	62
Media	6051	-28.9	38	7836	-43.1	30	10118	-54.5	17
Minimo	5190	-41.9	1	6890	-54.9	2	8800	-64.1	1
Gennaio 2010									
	500-400 hPa			400-300 hPa			300-200 hPa		
	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)
Massimo	7068	-21.1	98	9054	-32.1	75	11640	-43.3	61
Media	6014	-30.4	39	7723	-43.2	31	8570	-56.4	22
Minimo	5070	-46.4	1	6660	-54.2	1	10111	-70.2	1
Febbraio 2010									
	500-400 hPa			400-300 hPa			300-200 hPa		
	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)	Quota (m)	T (°C)	RH (%)
Massimo	7022	-19.5	93	8805	-28.9	79	11549	-43.1	65
Media	6043	-31.1	38	7766	-44.3	34	9983	-55.9	19
Minimo	5230	-44.7	2	6780	-58.3	2	8670	-69.3	1

Pur nella loro parzialità, essendo riferiti ad una certa specifica ora del giorno, in quanto corrispondono ad una misura su di un unico punto del territorio e con la caratteristica di essere una successione puntuale variamente spaziata anche sulla verticale, i dati dei radiosondaggi possono essere impiegati per avere indicazioni sulla compatibilità tra condizioni ambientali e formazione dei contrails (si veda ad esempio quanto riportato in [4]).

Nelle successive Figure 5A-5C i valori misurati nei radiosondaggi delle ore 12 GMT di Milano Linate sono stati riportati graficamente sulle Appleman chart. In ogni figura sono presentati i punti dei radiosondaggi relativi ad un mese (gennaio 2009, gennaio 2010, febbraio 2010).

L'analisi delle figure permette di osservare come siano decisamente molto numerosi i punti corrispondenti a situazioni nelle quali al passaggio degli aerei si formano i contrails: infatti tutti i punti a sinistra della linea della temperatura critica per RH=0% rappresentano situazioni nelle quali si possono formare i contrails, indipendentemente dal valore dell'umidità relativa ambiente. Tra i 300 ed i 200 hPa la maggioranza dei punti rientra in questa categoria.

Diversamente risultano molto più limitate le situazioni corrispondenti a contrails persistenti, intendendo quelle nelle quali l'umidità relativa è pari o superiore alla condizione di saturazione rispetto al ghiaccio (si vedano le Figure 2 e 3). Nelle Figure 5A-5C questi dati sono evidenziati, insieme a condizioni estremamente vicine ed indicate come "possibile persistenza". Queste situazioni sono qui definite come quelle condizioni nelle quali l'umidità relativa è inferiore di una unità rispetto al valore di saturazione e che pertanto,

considerando l'incertezza associata alla misure²⁰ e quella riferibile al calcolo del valore di saturazione [16], possono essere senz'altro assimilate alla persistenza; in ogni caso sono state mantenute distinte raggruppandole in una classe a parte.

Si nota che il numero di giorni corrispondenti a profili che contengono condizioni di persistenza per i contrails appare poco numeroso. D'altra parte l'indagine effettuata è molto limitata nel tempo e nello spazio e quindi ha solo un valore indicativo.

Si osserva che in [6] facendo riferimento ad un periodo di 30 giorni di osservazioni da terra dei contrails viene indicata una frequenza di circa il 10% dei casi (quindi alcuni giorni) con comparsa di scie persistenti. Valore questo tendenzialmente compatibile con quelli qui valutati attraverso i radiosondaggi.

In realtà per effettuare un confronto ed una analisi di maggiore rigore scientifico tra predizioni della teoria e misure occorre considerare che la dinamica dei contrails presuppone ovviamente una serie continua di situazioni non sintetizzabili unicamente con un risultato del tipo persistente - non persistente: il tempo di persistenza dei contrails è una variabile.

I processi di dissipazione-dissolvimento dei contrails sono chiaramente dovuti alla sublimazione dei cristalli di ghiaccio che li compongono e favoriti o meno da numerosi altri fattori meteorologici [3],[4]. Lo studio della loro evoluzione non è semplice come lo è stata la teoria sulla loro formazione. A livello euristico è tuttavia possibile effettuare alcune osservazioni ricorrendo ai principali risultati ottenuti sui fenomeni di accrescimento/evaporazione delle gocce di acqua o dei cristalli di ghiaccio nella descrizione della microfisica delle nubi.

Si osserva che per i cristalli di ghiaccio la teoria di accrescimento-sublimazione produce un'equazione evolutiva nel tempo caratterizzata (in analogia con l'accrescimento-evaporazione delle gocce di acqua) da una velocità o rateo di accrescimento della massa che risulta in prima approssimazione²¹ proporzionale alla differenza tra la tensione di vapore ambiente (p_v) e quella di saturazione rispetto al ghiaccio ($p_{v,I}$) [5].

$$\frac{dm}{dt} \propto p_v - p_{v,I}$$

Questo significa che il tempo di dissipazione (nel caso questa differenza sia negativa, altrimenti si ha l'accrescimento del cristallo e ciò ovviamente fino ad un certo limite!) risulta inversamente proporzionale a tale differenza. In altri termini, traducendo in modo approssimato la differenza tra le pressioni in umidità relativa, il tempo di dissipazione risulta inversamente proporzionale alla differenza tra l'umidità relativa dell'ambiente e quella di saturazione rispetto al ghiaccio.

Ciò posto, è diretto constatare, qualunque sia la definizione di tempo di persistenza o di dissipazione per i contrails, che se si ipotizza questo tempo $t_{-1\%}$ pari ad esempio ad 1 ora con una differenza di un punto

²⁰ Una analisi dell'incertezza nelle misure di umidità dei radiosondaggi è presentata in [26].

²¹ Si osserva che secondo la teoria riportata in [5] (pag. 525-550) la proporzionalità è riferita alla differenza rispetto alla tensione di vapor saturo effettiva della superficie: questa può essere espressa come quella di vapor saturo più una serie di correzioni che tengono conto della dimensione del cristallo, dell'effetto soluto, della curvatura ecc.; inoltre il coefficiente di proporzionalità è costituito da un termine assai complesso nel quale sono raccolti i coefficienti di diffusione e forma del cristallo, il calore latente di sublimazione, la tensione di vapor saturo rispetto al ghiaccio, la temperatura, la conducibilità termica e la capacità elettrica del cristallo; quest'ultima ha una dipendenza dalla forma del cristallo a sua volta dipendente da temperatura ed umidità relativa. Ne consegue che lo stesso coefficiente di proporzionalità ha una dipendenza diretta dalla temperatura ambientale ed indiretta dall'umidità relativa.



**Dipartimento provinciale
Firenze**

via Ponte alle Mosse, 211
50144 Firenze
tel. 055 32061 - fax 055 3206218
www.arpat.toscana.it

tra umidità dell'ambiente e saturazione (-1%), quando la differenza è di 2 punti (-2%) il tempo di persistenza $t_{-2\%}$ si riduce a 30 minuti; se la differenza è di 4 punti (-4%) $t_{-4\%}$ si riduce a 15 minuti.

Questo serve semplicemente a segnalare che il concetto di persistenza intuitivamente considerato come mantenimento nel tempo dei contrails (in teoria senza limiti ovvero finché si mantengono le date condizioni ambientali, nella realtà per alcune ore perché su tempi di questa scala si modificano appunto le condizioni ambientali) può non cogliere o ben rappresentare le situazioni reali e più frequenti, quindi anche maggiormente evidenti. Ad esempio quelle costituite dal fenomeno dei contrails che impiegano tempi differenziati per dissolversi, a partire dai pochi secondi in ambiente sostanzialmente privo di umidità a tempi che possono essere molto lunghi, quasi di persistenza, pur con condizioni ambientali non esattamente corrispondenti a tale situazione.

Per concludere, considerando indagini e studi più significativi dell'analisi qui effettuata, si segnala che in [3], sulla base di misure effettuate durante voli, viene riportata una stima secondo la quale per circa il 15% del tempo di volo le linee commerciali attraversano regioni in condizioni di sovrasaturazione rispetto al ghiaccio, cioè compatibili con la persistenza dei contrails. Viene inoltre indicato che queste regioni di sovrasaturazione possono essere sviluppate su di una estensione orizzontale dell'ordine di 150 km ed in verticale in media di circa 500 m.

Stime sulla frequenza delle condizioni di sovrasaturazione rivelate attraverso le misure dei radiosondaggi sono riportate anche in [26], mentre analisi dettagliate delle condizioni di umidità relativa alle quote di interesse si possono trovare in [25], riferite a misure protrattesi per alcuni anni e quindi con dati e risultati statistici significativi e sufficientemente affidabili.

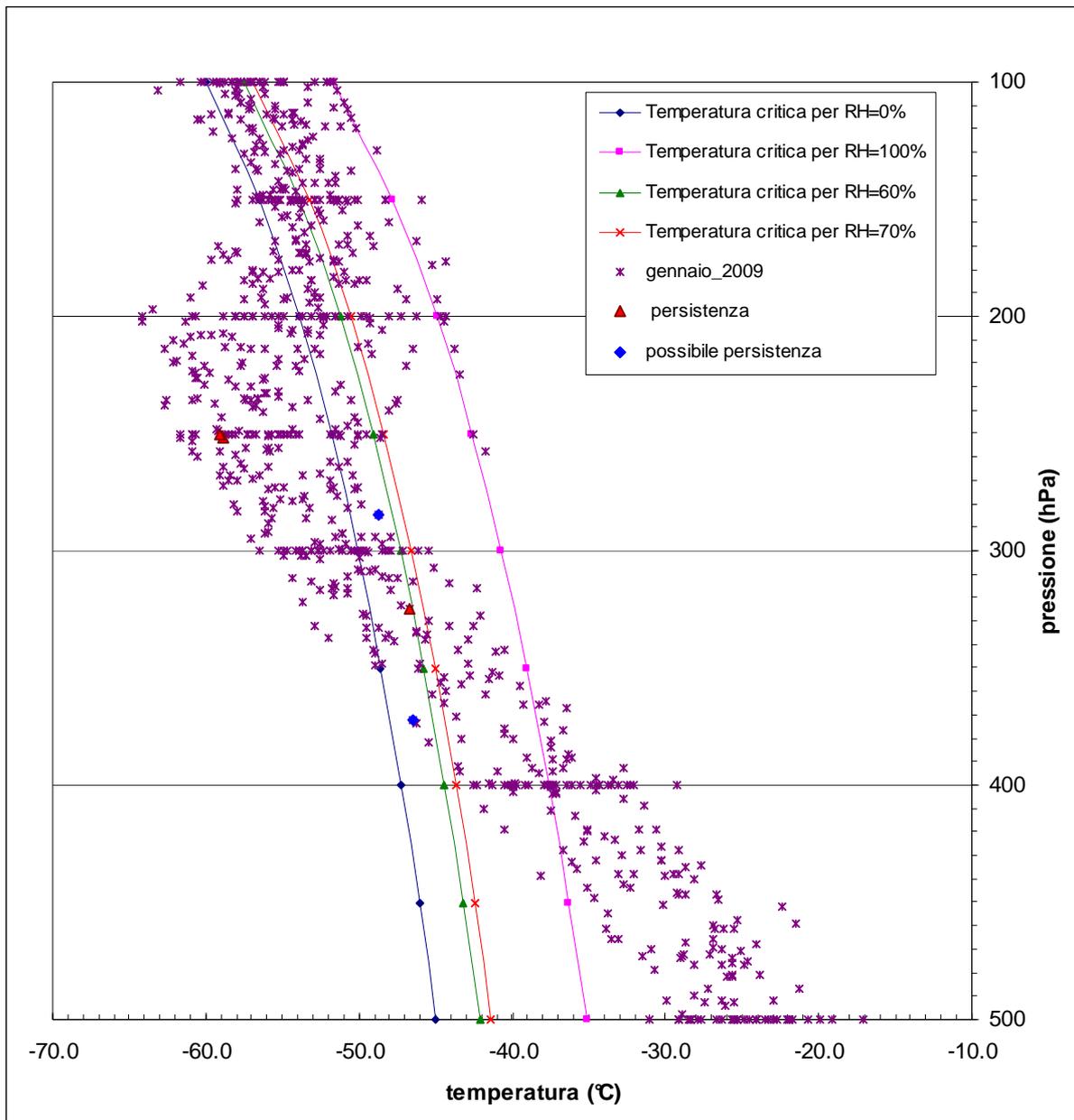


Figura 5A: Nel piano temperatura-pressione atmosferica sono visualizzati i punti dei radiosondaggi delle ore 12 GMT presso l'Aeroporto di Milano Linate, relativi al mese di gennaio 2009. Nel piano sono inoltre tracciate le curve approssimate ottenute precedentemente per le temperature critiche per i valori di umidità relativa di 0%, 60%, 70% e 100%. Tutti i numerosi punti a sinistra della linea della temperatura critica per RH=0% corrispondono a condizioni nelle quali è possibile che si formino (se passa un aereo) e siano visibili (se il cielo non è coperto di nubi) i contrails. Sono anche indicati punti che corrispondono alle condizioni di persistenza.

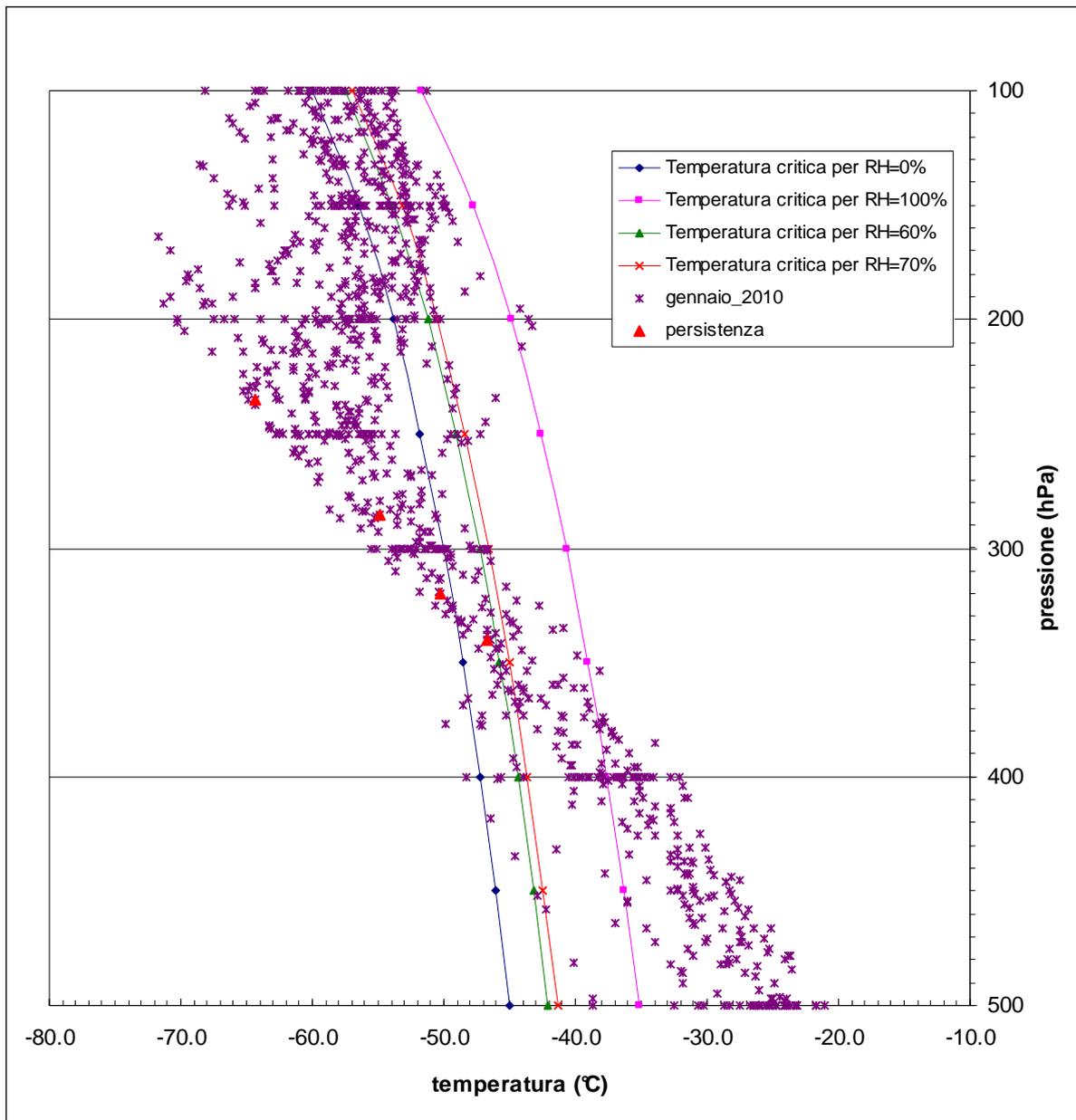


Figura 5B: Come per la Figura 5A, punti dei radiosondaggi delle ore 12 GMT presso l'Aeroporto di Milano Linate, relativi al mese di gennaio 2010. Tutti i punti a sinistra della linea della temperatura critica per RH=0% corrispondono a condizioni di formazione dei contrails. Sono inoltre indicati dei punti che corrispondono alle condizioni di persistenza. Questi sono in numero decisamente inferiore.

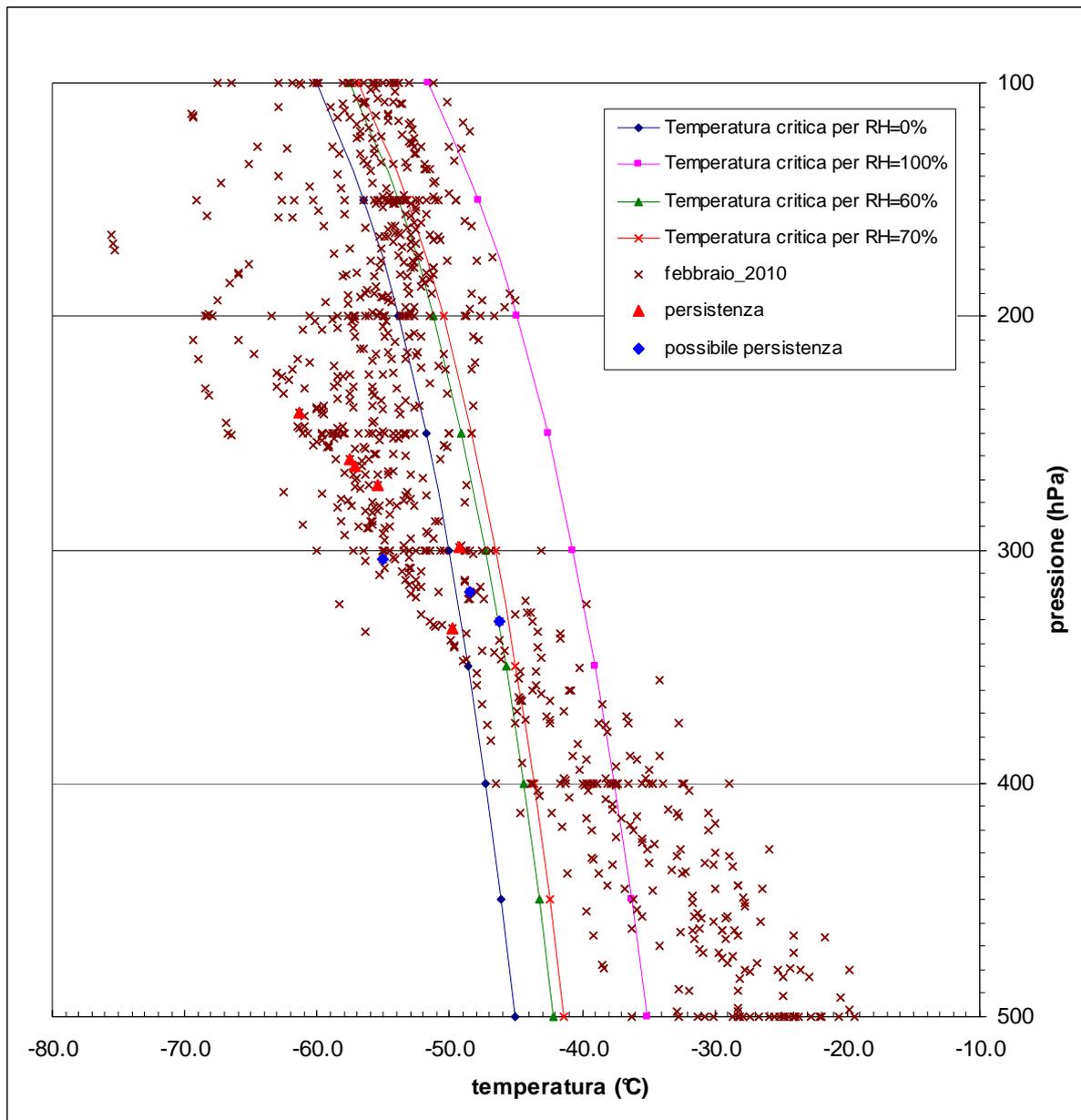


Figura 5C: Come per la Figura 5A, punti dei radiosondaggi delle ore 12 GMT presso l'Aeroporto di Milano Linate, relativi al mese di febbraio 2010. Tutti i punti a sinistra della linea della temperatura critica per RH=0% corrispondono a condizioni di formazione dei contrails (indipendentemente dall'umidità relativa). Sono indicati inoltre anche dei punti che corrispondono alle condizioni di persistenza o a condizioni estremamente vicine alla persistenza (differenza in umidità relativa dell'1% rispetto al valore di saturazione per il ghiaccio).

4. Effetti sull'ambiente del traffico aereo e delle relative scie di condensazione

A causa delle impurità presenti nel carburante, delle condizioni chimico-fisiche nelle quali avvengono le reazioni, ad esempio delle elevate temperature che innescano reazioni coinvolgendo l'azoto presente nel comburente (aria), i prodotti della combustione reale includono, oltre a quelli già indicati in precedenza, numerosi composti che rientrano nella classe degli inquinanti atmosferici.

La combustione del carburante aereo da questo punto di vista non differisce qualitativamente da quella che avviene in tutte le altre sorgenti sulla superficie terrestre, presentando sostanzialmente gli stessi composti inquinanti, legati alle sostanze che lo compongono. La particolarità delle emissioni inquinanti associata al traffico aereo è quella che una parte dei prodotti (inquinanti e non) viene rilasciata a quote molto elevate (nell'alta troposfera e nella bassa stratosfera), ovvero ben al di sopra del Planetary Boundary Layer (PBL) o strato limite atmosferico.²² La rimanente parte di emissioni, corrispondente alle operazioni che si svolgono al suolo o a bassa quota come l'atterraggio ed il decollo, si produce invece nel PBL ed è associata al cosiddetto ciclo LTO (Landing and Take-Off cycle).²³

Le emissioni associate al ciclo LTO trovandosi all'interno dello strato limite concorrono da un lato ai livelli di qualità dell'aria e di inquinamento atmosferico su scala regionale e dall'altro direttamente a quelli su scala locale in prossimità degli aeroporti; oltre ovviamente a contribuire ai fenomeni di scala globale. Queste sono in genere le emissioni impiegate e valutate nei procedimenti di autorizzazione ambientale (quali ad esempio le VIA) e rientrano comunemente tra le sorgenti oggetto di analisi per il loro contributo alla qualità dell'aria.

In generale per valutare le emissioni del traffico aereo del ciclo LTO sono disponibili fattori di emissione e database specifici e dettagliati per tipologia di aereo e motorizzazione (si veda ad esempio quello predisposto dall'International Civil Aviation Organization – ICAO²⁴) mentre minori informazioni sono disponibili sulle emissioni non-LTO; queste sono state stimate ed utilizzate per valutazioni su scala globale relativamente agli effetti climalteranti, di acidificazione ed eutrofizzazione, di interazione con l'ozono stratosferico (si veda ad esempio [18] e [19]) e solo piuttosto recentemente è stato possibile ottenere anche informazioni sugli impatti a livello di qualità dell'aria, grazie all'impiego di modelli atmosferici e chimici evoluti di scala globale [20], [21].

4.1 Emissioni

Nel corso degli anni, al netto dell'influenza di eventi catastrofici, naturali ed economici che ne hanno temporaneamente moderato lo sviluppo (si veda la Figura 6), si è assistito ad un continuo ed evidente incremento delle attività nel settore del trasporto aereo; a queste ha corrisposto un'analoga tendenza all'aumento delle emissioni e dei relativi impatti. Le ipotesi prevalenti di scenario futuro indicano inoltre un ulteriore sviluppo del settore, capace di far passare gli impatti attuali da residuali a rilevanti su grande scala [18].

²² Sinteticamente si intende con strato limite atmosferico la parte inferiore della troposfera che risente, su tempi caratteristici dell'ordine dell'ora, dei fenomeni che avvengono alla superficie, tipicamente dello sviluppo di turbolenza indotto dal riscaldamento o raffreddamento del suolo e dall'attrito superficiale.

²³ Convenzionalmente all'interno del ciclo LTO vengono considerate le emissioni che si producono al di sotto di una quota di 3000 ft, circa 1000 m di altezza dal suolo.

²⁴ <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702&pagetype=90> (gennaio 2011) il database dei fattori di emissione ICAO è anche implementato all'interno del software EDMS (Emission and Dispersion Modelling System) della US-Federal Aviation Administration.

A titolo esemplificativo in Figura 6 sono riportate le stime relative ai consumi complessivi di energia associati al trasporto aereo civile e quelle corrispondenti ai passeggeri trasportati (per chilometro percorso), riferite ai paesi dell'Unione Europea (EU-27) per gli ultimi 20 anni. Si osserva come in termini di consumi tra il 1990 ed il 2008 si è assistito quasi ad un raddoppio (incremento dell'87%). Dati analoghi sono disponibili per l'Italia ed i principali aeroporti italiani [15].

Per poter valutare anche la rilevanza assoluta delle emissioni attribuite al traffico aereo rispetto alle altre modalità di trasporto, nella successiva Tabella 3 sono riportate le emissioni stimate per i principali inquinanti atmosferici e gas serra per l'Italia nell'anno 2008 [22].²⁵ Mentre nelle successive Figure 7 e 8 sono rappresentate le più recenti stime delle emissioni annue in Italia relative al trasporto aereo per il periodo 1990-2008 [22].

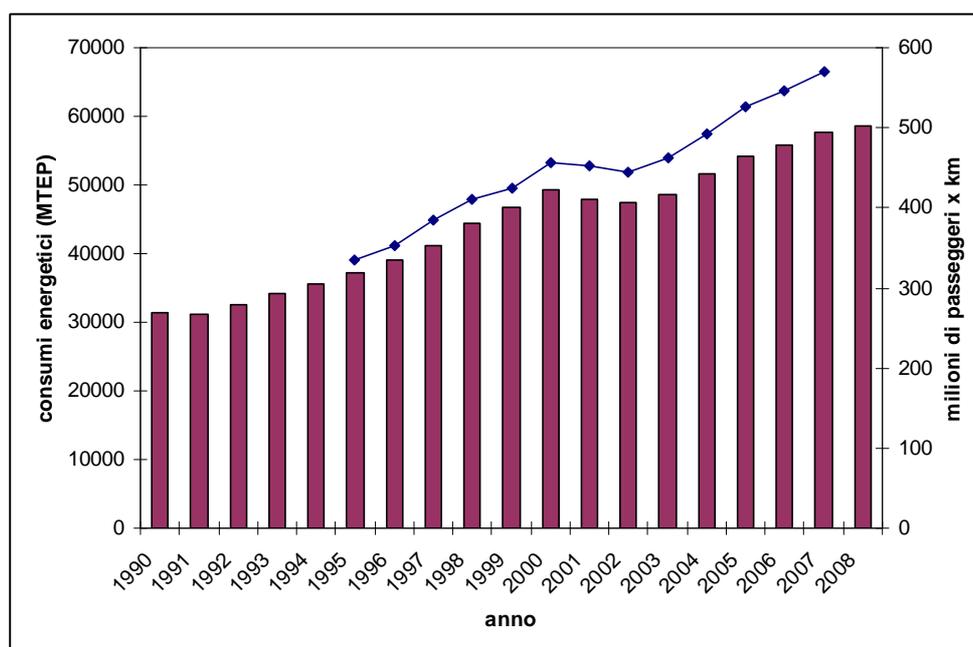


Figura 6: Consumi energetici annui (barre) e corrispondenti passeggeri trasportati per chilometro percorso (linea) per i 27 paesi dell'Unione Europea (elaborazione grafica su dati disponibili nel sito web dell'Agenzia Europea per l'Ambiente EEA, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/term01-transport-final-energy-consumption-by-mode-4> e http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DK-09-001/EN/KS-DK-09-001-EN.PDF).

²⁵ Dati analoghi fondati su stime delle stesse fonti effettuate in anni precedenti, quindi con qualche differenza, sono quelli riportati da Greenpeace in "L'impatto del trasporto aereo sul clima e sull'ambiente" del giugno 2009 (<http://www.greenpeace.it/copenhagen/Briefing%20impatto%20trasporto%20aereo.pdf>).

Si osserva tuttavia che nel documento di Greenpeace, nella tabella in cui vengono confrontate le emissioni tra le diverse modalità di trasporto, c'è un evidente errore di calcolo: sono state infatti sommate le emissioni della navigazione marina anziché quelle relative alla navigazione aerea. Conseguentemente i valori e le percentuali attribuite al traffico aereo non sono corretti. Nel testo invece si fa riferimento ai valori corretti. La tabella corretta compare nel successivo (novembre 2009) "Attacco al clima dal cielo e dal mare" di A. Lepore –Greenpeace Italia (<http://www.greenpeace.org/raw/content/italy/ufficiostampa/rapporti/aviazione-navigazione-clima.pdf>).

Per contestualizzare al territorio della Regione Toscana, vengono infine riportati i dati delle emissioni annue dei due principali aeroporti (Pisa - San Giusto "Galileo Galilei" e Firenze - Peretola "Amerigo Vespucci") come stimati all'interno dell'Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissione (IRSE - Regione Toscana).

I dati riportati in Tabella 3 indicano che l'apporto complessivo del traffico aereo corrisponde in termini di emissioni di CO₂ ad una quota dell'ordine del 10% di quello prodotto dall'intero comparto dei trasporti. Per le altre sostanze ed inquinanti si stimano contributi minori; tra questi si segnala la quota corrispondente a circa il 5% attribuita agli ossidi di azoto (NO_x) per la rilevanza che tali composti hanno nei differenti processi ed impatti (interazione con l'ozono stratosferico e troposferico, contributo all'eutrofizzazione e alla formazione di particolato secondario, contributo diretto alla qualità dell'aria in quanto il biossido di azoto è uno degli inquinanti normati in relazione ad i suoi effetti per la salute umana, e gli ossidi totali per i loro effetti sulla vegetazione).

Si osserva che su questi dati hanno maggiore peso le emissioni indicate sotto la voce "Aviation" in "International Bunkers" ovvero corrispondenti alle emissioni associate al carburante utilizzato ed acquistato per i voli internazionali.²⁶ Evidentemente le emissioni dei cicli LTO dei voli internazionali avvengono comunque su di un dato territorio, mentre non si può dire lo stesso per quelle afferenti al volo di crociera.

Nella Tabella 3 è anche riportata la classe "Other" all'interno della quale sono da collocare le emissioni attribuibili agli impianti ed attività militari, tra le quali compare ovviamente una componente associata al traffico aereo che non è stata scorporata a livello di inventario nazionale.²⁷ Il valore riportato in tabella costituisce quindi un limite superiore a quello attribuibile al traffico aereo militare.

Tabella 3: stima delle emissioni annue di inquinanti (in Gg) per l'anno 2008 secondo [22], relative al comparto dei trasporti; distribuzione modale e peso di quelle assegnate ai trasporti aerei.

Anno 2008	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM VOC	SO ₂
Transport	122474.64	15.56	3.47	652.30	1499.05	391.43	49.47
a. Civil Aviation	2301.35	0.07	0.06	9.70	3.39	0.83	0.73
b. Road Transportation	113944.84	14.09	3.16	549.25	1308.58	297.97	1.60
c. Railways	218.53	0.01	0.09	2.77	0.75	0.33	0.00
d. Navigation	5110.61	1.35	0.12	88.97	185.86	92.25	47.12
e. Other Transportation	899.30	0.04	0.05	1.60	0.46	0.04	0.01
Other	737.77	0.07	0.20	8.57	21.28	1.59	0.10
International Bunkers	18327.16	0.91	0.44	189.43	25.59	8.40	153.73
Aviation	10087.15	0.12	0.24	30.91	6.34	2.15	2.70
Marine	8240.01	0.79	0.21	158.52	19.25	6.25	151.03
Totale (escluso Other)	140801.80	16.47	3.92	841.73	1524.64	399.83	203.20
Proporzione dei trasporti aerei rispetto al totale	8.8%	1.2%	7.6%	4.8%	0.6%	0.7%	1.7%

²⁶ La voce "International Bunkers" è presente a livello di inventario dei gas serra ma non viene ancora conteggiata nelle quote nazionali previste dagli accordi internazionali di limitazione (http://unfccc.int/methods_and_science/emissions_from_intl_transport/items/1057.php).

²⁷ In [22] viene indicato che i dati relativi al consumo totale del traffico aereo militare sono pubblicati sul Bollettino Petroliero trimestrale emesso dal Ministero delle attività produttive. Non è invece reso noto il numero di cicli LTO.

La diversa importanza dei due comparti “Civil Aviation” e “Aviation (International Bunkers)” nei quali sono suddivise le emissioni del traffico aereo è anche mostrata nella successiva Figura 7, riferita alla serie storica 1990-2008 delle emissioni di CO₂. Questa permette di valutare come lo sviluppo della parte “Aviation (International Bunkers)” ha portato rapidamente a superare la flessione dell’anno 2002; ciò non è accaduto invece per la parte “Civil Aviation” che al 2008 si mantiene inferiore al valore stimato per il 2001.

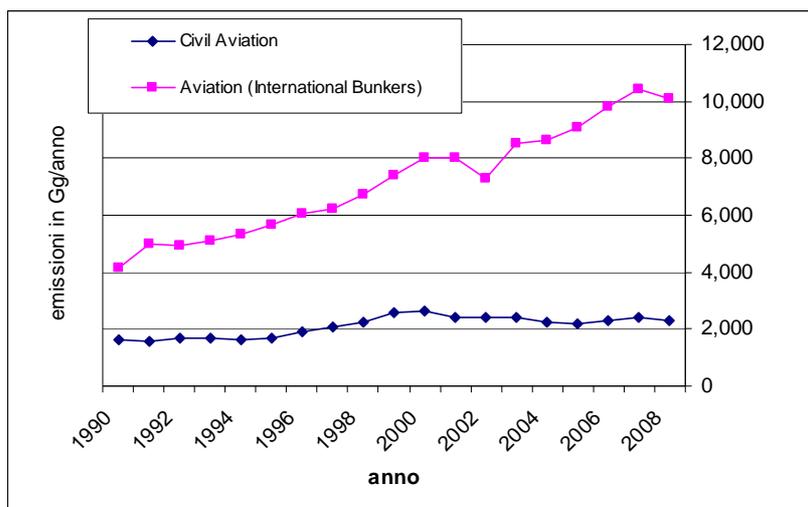


Figura 7: Serie storiche delle emissioni di CO₂ in Italia secondo le stime in [22]. Viene mostrato il diverso contributo relativo alle due componenti “Civil Aviation” e “Aviation (International Bunkers)”.

Questo andamento temporale è ancora più visibile (su entrambe le componenti) nella successiva Figura 8 nella quale sono riportate le serie storiche per i principali inquinanti atmosferici. Prendendo come riferimento gli ossidi di azoto si osserva che le emissioni degli ultimi anni si mantengono inferiori al picco relativo all’anno 2000; evidentemente la variazione non è attribuibile solo ad una temporanea flessione del traffico ma ad una sistematica riduzione legata al rinnovo tecnologico delle flotte.

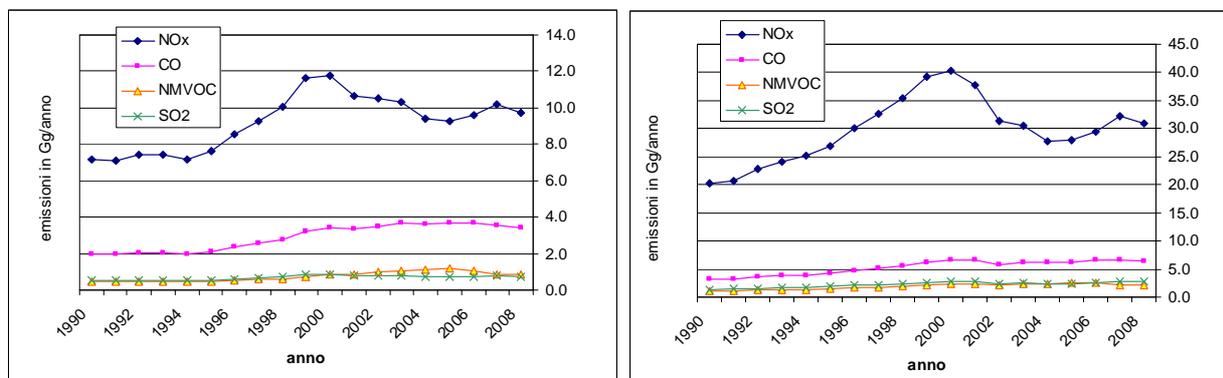


Figura 8: Serie storiche delle emissioni di Ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), composti volatili non metanici (NMVOC) ed ossidi di zolfo (SO₂) in Italia secondo le stime in [22]. Viene mostrato il diverso contributo relativo alle due componenti “Civil Aviation” a sinistra e “Aviation (International Bunkers)” a destra.

In [22] la stima delle emissioni viene effettuata considerando la suddivisione tra voli "Domestic" o nazionali e "International", cui corrisponde un diverso numero di cicli LTO e differenti fattori di emissione per ciclo-LTO e per il volo di crociera (non-LTO). Nella successiva Tabella 4 sono riportati i fattori di emissione medi impiegati in [22] e riferiti ai diversi inquinanti (escluso CO₂ e SO₂).

Tabella 4: Fattori di emissione medi utilizzati in [22] per la stima delle emissioni delle varie fasi

	Units	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM ₁₀ VOC	Fuel
Domestic LTO	kg/LTO	0.189	0.040	5.313	6.939	1.698	461.7
International LTO	kg/LTO	0.306	0.048	5.702	8.524	2.758	553.3
Domestic Cruise	kg/Mg fuel	-	0.152	24.003	3.313	0.822	-
International Cruise	kg/Mg fuel	-	0.535	70.916	7.190	2.569	-
Aircraft Military	kg/Mg fuel	0.4	0.2	15.8	126	3.6	-

Si osserva che per alcuni inquinanti le emissioni del ciclo LTO sono regolamentate, mentre non lo sono esplicitamente quelle relative al volo di crociera. Si deve considerare che i fattori attribuiti al ciclo-LTO, comprendono anche le fasi dette Taxi-idle, di movimento a terra dell'aereo, le quali variano in corrispondenza dell'aeroporto, mentre il dato riportato è necessariamente un valore medio. In ogni caso è sufficientemente ben stabilito e confermato, anche dai fattori di emissione riportati nella Tabella 4, che per alcuni inquinanti quali monossido di carbonio (CO) o idrocarburi incombusti (NM₁₀VOC) una parte significativa delle emissioni avviene durante il ciclo LTO, mentre per altri inquinanti, quali gli ossidi di azoto (NO_x), l'emissione avviene in massima parte durante il volo di crociera (non-LTO); così come a questa fase corrisponde la frazione maggiore del consumo di carburante [19], [20].

Nella successiva Tabella 5 sono riportate le stime di emissione annua assegnate ai due principali aeroporti della Toscana dall'IRSE (versione aggiornata al 2007), confrontate (ultime due righe della tabella) con le emissioni complessive relative ai Comuni cui afferiscono (provenienti dalla stessa fonte).

Tabella 5: Emissioni per l'anno 2007 (in Mg/anno) attribuite agli aeroporti della Toscana dall'IRSE

Aeroporto	NO _x	CO	COV	PM ₁₀ (PM _{2.5})
Firenze Peretola "Amerigo Vespucci"	47.26	85.27	19.16	0.17
08050100 Traffico aereo nazionale (cicli LTO)	14.44	18.53	6.00	0.04
08050200 Traffico aereo internazionale (cicli LTO)	32.82	66.74	13.17	0.13
Pisa San Giusto "Galileo Galilei"	99.97	153.42	54.36	0.97
08050100 Traffico aereo nazionale (cicli LTO)	25.57	51.60	19.79	0.26
08050200 Traffico aereo internazionale (cicli LTO)	74.40	101.82	34.57	0.71
Comune di Firenze	3903.66	13378.54	10074.90	463.13
Comune di Pisa	1694.37	3854.55	3190.25	164.70

Si osserva in primo luogo come il complesso delle emissioni dei due aeroporti (solo cicli LTO) si conferma residuale rispetto a quelle attribuite ai territori che le ospitano; tuttavia su scala locale, nelle aree adiacenti agli impianti non possono comunque escludersi impatti significativi sulla qualità dell'aria. Questo può essere valutato soltanto con simulazioni modellistiche di scala opportuna che tengano conto della dispersione degli inquinanti nell'atmosfera.

Dai dati della Tabella 5 si può osservare che le emissioni assegnate all'impianto di Pisa risultano per gli NO_x (e anche per COV e CO) circa doppie di quelle dell'Aeroporto di Firenze ed incidono relativamente di

più sul territorio (risultano circa il 6% degli NOx riferiti al Comune di Pisa, mentre per Firenze sono soltanto circa l'1%) anche perché questo presenta minori pressioni rispetto a quelle di Firenze (per gli ossidi di azoto il totale assegnato al Comune di Pisa è circa il 43% di quello di Firenze).

Per quanto riguarda il particolato (a PM10 e PM2.5 corrisponde lo stesso valore nelle stime) lo scarto tra i due impianti è ancora superiore, ovvero all'Aeroporto di Pisa corrispondono emissioni 5-6 volte superiori a quelle assegnate all'Aeroporto di Firenze.²⁸

Nella successiva Figura 9 viene presentato l'andamento nel tempo delle stime di emissione di NOx per i due aeroporti secondo i dati presenti nell'IRSE.

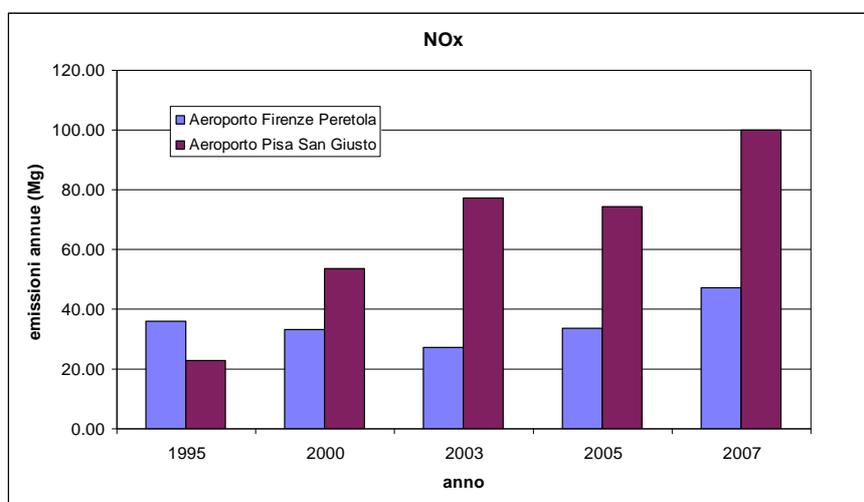


Figura 9: Serie storiche delle emissioni di NOx per i principali aeroporti della Toscana. Dati IRSE

Si osserva un comportamento negli anni recenti diversificato rispetto a quello medio nazionale riportato in Figura 8; nel caso dei due aeroporti toscani infatti i dati riferiti all'anno più recente (2007) indicano emissioni superiori rispetto a quelle di tutti gli anni precedenti.

Per l'Aeroporto di Pisa le emissioni di NOx sono quadruplicate nel 2007 rispetto al 1995, mentre per l'Aeroporto di Firenze viene stimato un incremento di circa il 30%. Tuttavia considerando gli altri inquinanti si ottiene un quadro più vario: mentre per Pisa si hanno comunque incrementi, con CO e COV aumentati di quasi tre volte e PM10 sette volte superiore tra il 2007 ed il 1995, per Firenze si ha un incremento di circa il 30% per i COV ma decrementi del 10% per il CO e addirittura del 60% per il PM10.

Per completare il quadro informativo nella successiva Figura 10 è rappresentato il numero di cicli-LTO impiegato nelle stime di emissione, suddiviso tra voli nazionali e voli internazionali, per i due aeroporti, al variare dell'anno di stima.

Per quanto si riferisce ai movimenti (cicli-LTO), per Firenze si osserva un andamento altalenante con un incremento nei voli internazionali nel 2007 cui corrisponde tuttavia il minor numero di voli nazionali rispetto agli altri anni della serie di stime. Per Pisa il 2007 rivela un incremento sia per quanto riguarda i voli internazionali che, senz'altro meno rilevante, anche per quelli nazionali.

Il numero massimo di cicli-LTO per Firenze rimane quello assegnato all'anno 2000.

²⁸ In queste stime sono presenti alcuni elementi poco chiari i quali richiederebbero un approfondimento che esula dagli obiettivi del presente lavoro.

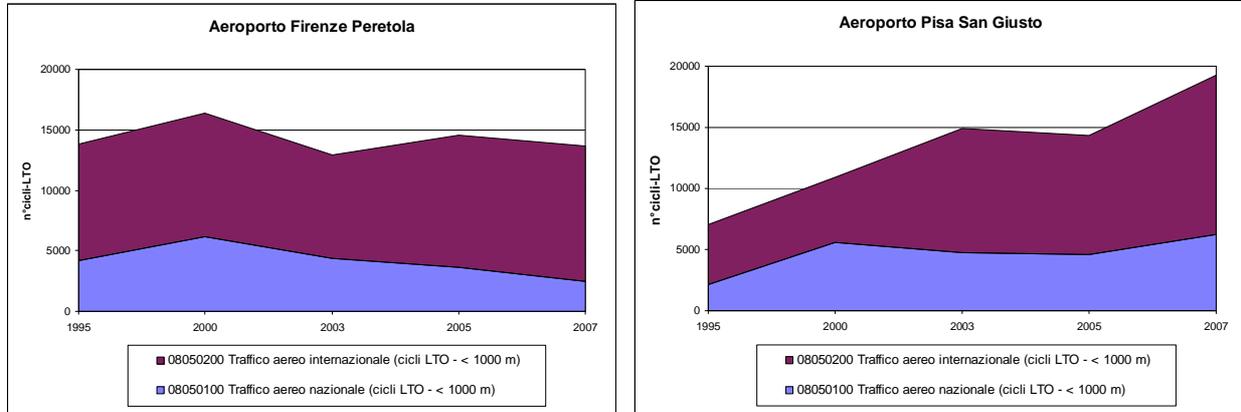


Figura 10: Serie storiche dei cicli-LTO utilizzati per la stima delle emissioni dei due aeroporti toscani nell'IRSE. Vengono mostrati i valori assegnati sia per i voli nazionali che per quelli internazionali. A sinistra i dati relativi all'Aeroporto di Firenze, a destra quelli dell'Aeroporto di Pisa.

4.2 Impatti sulla qualità dell'aria

Come anticipato, i principali impatti in termini di qualità dell'aria sono attribuibili alle emissioni nell'area aeroportuale, quelle indotte a terra dalla struttura e quelle del ciclo-LTO per il traffico aereo. Queste sono anche le emissioni che concorrono ai livelli di qualità dell'aria su scala regionale.

La rilevanza degli impatti corrispondenti a livello locale e regionale può essere valutata soltanto nei casi specifici attraverso una dettagliata stima delle emissioni e l'impiego di opportuni modelli di dispersione.

Poiché tra gli effetti delle emissioni occorre includere anche l'interazione tra le specie e la trasformazione delle sostanze, a livello regionale è almeno necessario utilizzare modelli di stima che includano la parte relativa alle trasformazioni chimiche che avvengono in atmosfera. Ciò comporta notevoli difficoltà tecniche, sia per il reperimento dei dati emissivi relativi alle numerose sostanze chimiche coinvolte sia per la necessità di conoscere ed utilizzare le concentrazioni al contorno (bordo del dominio spaziale adottato).

Per le emissioni relative al volo di crociera, ovvero quelle che avvengono al di sopra dello strato limite, l'effetto diretto alla superficie è spesso stato considerato trascurabile o non valutabile. Soltanto recentemente sono stati prodotti alcuni studi che pur confermandone gli aspetti residuali permettono tuttavia di valutarne quantitativamente gli impatti anche in termini di qualità dell'aria [20], [21].

Questo è stato possibile attraverso la localizzazione delle emissioni (sulle rotte effettive, o sulle aree/volumi dove maggiore è il traffico aereo) e con l'impiego di modelli chimici e di trasporto a scala globale, ovvero considerando la circolazione sull'intera atmosfera terrestre.

Se si considera una particella di dimensione pari ad 1 μm (diametro aerodinamico) questa, in base alla propria velocità di sedimentazione impiega circa 328 giorni per "cadere/percorrere" 1 km in atmosfera; se la particella è ancora più piccola, ad esempio di 0.02 μm , impiegherebbe per lo stesso percorso circa 230 anni [5]. Evidentemente non è la gravità il fenomeno che favorisce lo scambio tra i diversi livelli di atmosfera, ma sono soprattutto le correnti discendenti e ascensionali, la turbolenza ove presente, e i fenomeni di diffusione per le particelle di piccole dimensioni e le sostanze chimiche [5]. Ne discende che la valutazione dell'apporto delle emissioni oltre il PBL richiede che si consideri l'intera circolazione atmosferica terrestre; inoltre è intuibile che i luoghi di ricaduta della particella/sostanza inquinante, saranno in generale definiti da questa

circolazione e quindi differenti da quelli sulla cui verticale si è verificata l'emissione. Viene osservato ad esempio che le emissioni prodotte dagli aerei lungo le rotte del corridoio del Nord-Atlantico nella bassa stratosfera (ovvero sui 10-12 km di quota) dopo circa 10-20 giorni risultano disperse sull'intero emisfero boreale, con una vita media (esponenziale) all'interno della stratosfera dell'ordine dei 20 giorni [23].

In [21] applicando un sistema modellistico di trasporto degli inquinanti e della loro trasformazione chimica sono state valutate le ricadute al suolo dovute alle emissioni globali del traffico aereo. Si osserva che la parte relativa all'apporto diretto di tali emissioni in termini di qualità dell'aria non risulta significativa (ovvero l'impatto valutato non è dovuto direttamente alle concentrazioni al suolo corrispondenti all'emissione), bensì l'impatto maggiore è dovuto agli inquinanti secondari, ovvero quelli che si ottengono dalle reazioni chimiche e fotochimiche che includono le sostanze emesse dagli aerei. Più precisamente l'impatto stimato in [21] corrisponde alle concentrazioni di particolato secondario dovute alle trasformazioni dei nitrati e solfati derivanti dalle emissioni di ossidi di azoto e zolfo degli aerei in quota.²⁹ Un aspetto rilevante dei risultati, al di là dell'entità dell'impatto, è senz'altro quello nel quale si evidenzia che l'impatto stesso, i suoi effetti principali, si verificano a distanze di centinaia di chilometri dai luoghi sulla cui verticale vengono a posizionarsi le emissioni più significative. Ciò semplicemente perché "mediamente" in quelle aree la circolazione atmosferica trasferisce i composti inquinanti, i quali inoltre nel corso del loro movimento reagiscono e si trasformano chimicamente.

4.3 Effetti climalteranti

In termini di effetti sul clima l'impatto dovuto al traffico aereo è stato oggetto di analisi specifiche [18]; si osserva che sotto questo aspetto le emissioni di gas serra (sinteticamente riportate in precedenza) relative alle fasi di crociera risultano più efficienti, rispetto a quelle che si producono all'interno dello strato limite, soggette a meccanismi di rimozione più efficaci. Le emissioni non-LTO, per la quota a cui si verificano, incidono ed interferiscono anche maggiormente con altri componenti climatici quali ad esempio l'ozono stratosferico. Analogamente le emissioni di aerosol e dei loro precursori (solfati e black carbon, ad esempio) possono modificare la composizione atmosferica dei nuclei di condensazione ed indurre l'accrescimento di nuvolosità, in particolare di quella alta e sottile tipo cirri, nonché modificarne le proprietà.

In [3] viene esaminato in dettaglio l'effetto climatico legato esplicitamente alla formazione e persistenza dei contrails. Questo viene suddiviso in due componenti, la prima legata all'interferenza con la radiazione solare e con quella riflessa dalla Terra (quindi una specie di funzione di schermatura; vedi anche [6]), associata ai contrails "lineari" persistenti, ovvero alle strisce delle scie di condensazione che si mantengono tali (persistent line-shaped contrails). L'altra invece al fenomeno di "spreading" dei contrails, i quali in condizioni favorevoli si allargano e diffondono fino ad andare a costituire dei veri e propri cirri (contrail-cirrus).

Le stime dell'intensità di tali apporti risultano ancora assai variabili ed incerte [3] ed anche i meccanismi di sviluppo ed interazione non sono del tutto chiariti. Ciononostante anche per poter effettuare confronti e valutazioni di rilevanza tra i diversi fenomeni, in Tabella 6 sono riportate alcune stime degli effetti legati alle operazioni ed attività dell'aviazione [24], mentre in Figura 11 sono riportate le stime corrispondenti per i principali fattori di alterazione climatica [24].

²⁹ Utilizzando quindi la densità e la distribuzione territoriale della popolazione e le curve dose-risposta dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, si arriva anche a determinare l'impatto in termini di salute e sanità ovvero in termini di morti premature [21].

Queste stime sono espresse in termini di "Radiative forcing"³⁰ concetto utilizzato spesso per comparare gli effetti climatici dei diversi agenti o fattori: in termini semplificati si può pensare che la variazione di un qualche agente climatico possa consistere o sia traducibile in una variazione radiativa ovvero uno sbilanciamento tra l'energia entrante nel sistema (Terra) e quella uscente dal sistema, la misura di questa variazione effettuata secondo una adeguata procedura e fissandone le condizioni (ad esempio non considerando gli effetti di feedback) è il radiative forcing.

Tabella 6: Radiative forcing associato al traffico aereo [24]³¹

Radiative forcing (W/m ²)			
Fattore / stima	1992 IPCC	2000 IPCC	2000
CO ₂	0.018	0.025	0.025
Persistent linear contrails	0.020	0.034	0.006 ÷ 0.015
Aviation-induced cloudiness without contrails	0 ÷ 0.040		
Aviation-induced cloudiness with persistent contrails	0.010 ÷ 0.080		

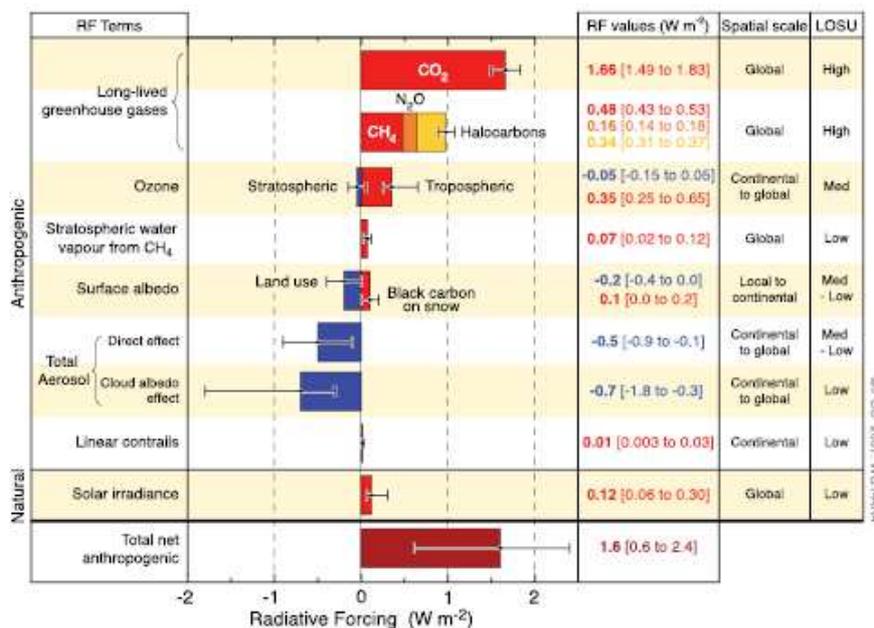


Figura 11: Radiative forcing associato ai principali fattori climatici in [24]. Tra questi viene esplicitato anche quello relativo ai contrails (in questo caso viene mostrato soltanto il contributo associato ai persistent linear contrails). (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spmssp-human-and.html).

³⁰ In http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/ si veda la sezione 6.1 Radiative forcing e 6.1.1 Definition. Oppure per gli scopi del presente rapporto è sufficiente: "Radiative forcing is a measure of the influence that a factor has in altering the balance of incoming and outgoing energy in the Earth-atmosphere system and is an index of the importance of the factor as a potential climate change mechanism. Positive forcing tends to warm the surface while negative forcing tends to cool it. In this report, radiative forcing values are for 2005 relative to pre-industrial conditions defined at 1750 and are expressed in watts per square metre (W m⁻²)" tratta da [24].

³¹ Per i dettagli relativi a queste stime si veda l'originale: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html



**Dipartimento provinciale
Firenze**

via Ponte alle Mosse, 211

50144 Firenze

tel. 055 32061 - fax 055 3206218

www.arpat.toscana.it

Si osserva che la somma dei contributi associati all'attività aerea è dell'ordine di 0.065 W/m^2 . Questo valore può essere confrontato con il dato complessivo netto di 1.6 W/m^2 dovuto all'attività umana di Figura 11, di cui ne rappresenta circa il 4%.

Tra i dati riportati in Figura 11 compare anche quello legato agli effetti dei contrails lineari persistenti (seconda riga della Tabella 6), il quale tuttavia non riassume tutti gli effetti attribuibili e connessi con i contrails e neppure con il traffico aereo; questi sono distribuiti in proporzione negli altri fattori riportati (ad esempio nella CO_2 oppure negli aerosol con radiative forcing negativo, o nel contributo dell'ozono stratosferico e troposferico).

La colonna con intestazione LOSU si riferisce al livello di comprensione e conoscenza dei fenomeni (Level Of Scientific Understanding); mentre per quanto riguarda i gas serra si ritiene che la spiegazione delle loro interazioni con il clima sia elevata, la comprensione scientifica dei meccanismi e fenomeni sia pressoché completa, il giudizio assegnato per quanto riguarda i "linear contrails" indica che ancora la comprensione e spiegazione dei fenomeni legati rimane molto parziale. Questo ovviamente incrementa l'incertezza complessiva dell'incidenza assegnata.



5. Conclusioni

Si può senz'altro ritenere che la serie di teorie che vanno sotto la voce di "scie chimiche" sia in gran parte ispirata ed alimentata dal fenomeno delle scie di condensazione prodotte dai gas di scarico degli aerei in volo. D'altra parte la visibilità delle scie di condensazione è presumibilmente aumentata³² a partire dagli anni '90 e questo può essere stato uno degli elementi che hanno favorito il diffondersi di queste teorie; ciò insieme all'altro fattore determinante costituito dalla disponibilità e facilità di accesso a qualsiasi tipo di informazione attraverso la rete internet ed il web.

L'ampia ricerca bibliografica effettuata ha permesso di individuare numerosi studi e documenti scientifici nei quali vengono spiegati i fenomeni di formazione dei contrails; inoltre sono stati raccolti dati e stime delle emissioni e dei corrispondenti effetti dovuti al traffico aereo. La ricerca ha permesso di selezionare alcuni testi ed articoli contenenti spiegazioni e chiarimenti che riportano i fenomeni osservati, comunemente indicati come prove dell'esistenza delle chemtrails, nell'ambito di più o meno frequenti eventi fisici e meteorologici.

Il lavoro ha quindi riproposto la teoria della formazione dei contrails, le corrispondenti condizioni fisiche limite, la corretta interpretazione delle Appleman chart e, seppur a livello indicativo, l'evidenza che le condizioni di formazione delle scie si presentano con una certa frequenza anche nei nostri cieli.

Sono state quindi riportate alcune informazioni sulle emissioni del traffico aereo, per l'Italia in generale ed in particolare per i principali aeroporti della Toscana.

Sono state infine sinteticamente riportate valutazioni e dati sugli impatti stimati dovuti a queste emissioni, sia per gli aspetti relativi alla qualità dell'aria che per gli effetti climalteranti.

Marzo 2011

³² Infatti il miglioramento dell'efficienza di volo degli aerei (aumento del contrail factor e conseguente riduzione delle temperature critiche affinché le scie risultino visibili), la riduzione dell'intervallo tra livelli di volo al di sopra di una certa quota (Reduced Vertical Separation Minima, avvenuta tra il 1997 ed il 2005 in Europa) con conseguente disponibilità di ulteriori livelli e corridoi per il volo, ed infine il significativo incremento dei voli, in particolare quelli internazionali, possono senz'altro aver causato un aumento nella produzione di scie di condensazione.

Riferimenti Bibliografici ⁱ

- [1] H. Appleman "The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft" Bulletin American Meteorological Society Vol. 34, n°1, 1953, pag. 14-20.
- [2] "Atmospheric chemistry and physics of air pollution" J.H. Seinfeld, John Wiley & Sons Inc. USA 1986
- [3] U. Schumann "Formation, properties and climate effects of contrails" Comptes Rendus Physique, Vol. 6, n° 4-5, 2005, "Aircraft trailing vortices"; rintracciabile anche a: (ultimo accesso del 2/4/2010)
http://www.aero-net.info/fileadmin/aeronet_files/links/documents/DLR/Schumann_Contrails.pdf
- [4] "L'annosa questione delle scie di condensazione" P. Randi (ultimo accesso 14/04/2010)
http://www.meteoromagna.com/L_ANNOSA_QUESTIONE_SCIE_DI_CONDENSAZIONE.pdf
- [5] "Fundamentals of Atmospheric Modeling" second edition, M. Z. Jacobson, Cambridge University Press, Cambridge UK 2005.
- [6] L. Onorato "Gli effetti del traffico aereo sull'atmosfera: le scie di condensazione" NIMBUS 47-48 anno XIV gennaio-giugno 2006 (2008), pag. 6-12.
- [7] A. Delitala "Scie chimiche: un'improbabile cospirazione" NIMBUS 47-48 anno XIV gennaio-giugno 2006 (2008), pag. 13-15.
- [8] "La cospirazione delle scie chimiche" MD80.it
(<http://www.md80.it/approfondimenti-2/la-cospirazione-delle-scie-chimiche/>)
- [9] M. L. Schrader "Calculations of Aircraft Contrail Formation Critical Temperatures" Notes and Correspondence, Journal of Applied Meteorology Vol 36, 1997, pag. 1725-1729.
- [10] M.K. Walters, J.D. Shull, R.P. Asbury III, "A Comparison of Exhaust Condensation Trail Forecast Algorithms at Low Relative Humidity" Journal of Applied Meteorology Vol. 39, 2000, pag. 80-91.
- [11] D.P. Duda, P. Minnis "Observations of Aircraft Dissipation Trails from GOES" Monthly Weather Review Vol. 130, 2002, pag. 398-406.
- [12] M.L. Schrader, W. Dale Meyer, C.L. Weaver "Comments on 'A Reexamination of the Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft'" Notes and Correspondence, Journal of Applied Meteorology Vol 36, 1997, pag. 623-626.
- [13] R.F. Coleman "A New Formulation for the Critical Temperature for Contrail Formation", Journal of Applied Meteorology Vol 35, 1996, pag. 2270-2282.
- [14] "Agrometeorologia", F. Benincasa, G. Maracchi, P. Rossi; Pàtron editore, Bologna 1991.
- [15] "Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti - Anni 2007-2008", Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato SPA, 2009.
(<http://www.mit.gov.it/mit/site.php?p=cm&o=vd&id=581>)
- [16] "Saturation vapor pressure formulations", H. Vömer, CIRES University of Colorado
<http://cires.colorado.edu/~voemel/vp.html> (ultimo accesso 2/4/2010)
- [17] E.J. Jensen, O.B. Toon et al. "Environmental conditions required for contrail formation and persistence", Journal of Geophysical Research Vol 103, n. D4, 1998, pag. 3929-3936.
- [18] "Aviation and the Global Atmosphere" International Panel on Climate Change, J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge UK 1999. [versione online all'indirizzo: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/] Il capitolo 9 "Aircraft Emissions: Current Inventories and Future Scenarios" è disponibile anche all'indirizzo (ultimo accesso gennaio 2011):
http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1064&context=library_papers (1999)
- [19] "Air pollution science for the 21st century", D.J. Austin, P. Brimblecombe, W. Sturgess; Elsevier 2002.



- [20] "Study on air quality impacts of non-LTO emissions from aviation", L. Tarrasòn, J.E. Jonson, T.K. Berntsen and K. Rypdal, Final report to the European Commission (B4-3040/2002/343093/MAR/C1) 2004, (http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/air_quality_impacts_finalreport.pdf, ultimo accesso gennaio 2011)
- [21] S.R.H. Barrett, R.E. Britten, I.A. Waitz "Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions" Environ.Sci.Technol. 2010, 44, pag. 7736-7742.
- [22] National Inventory Report 2010 - Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2008, ISPRA, Rapporti n° 113/2010
(http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sinanet/serie_storiche_emissioni/National%20Inventory%20Report%202010/view)
Le tabelle con i dati sono disponibili all'indirizzo:
http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sinanet/serie_storiche_emissioni (ultimo accesso: gennaio 2011)
- [23] C. Foster, A. Sthol, P. James and V. Thouret "The residence times of aircraft emissions in the stratosphere using a mean emission inventory and emissions along actual flight tracks", Journal of Geophysical Research, 108, n°D12, 8524; 2003.
- [24] "Climate Change 2007 – The physical science basis" Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change, UNEP - WMO, S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge UK 2007.
(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html ultimo accesso febbraio 2011)
- [25] K. Gierens, U. Schumann, M. Helten, H. Smit, A. Marengo "A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC Measurements" Ann. Geophysicae 17, 1218-1226, 1999. (<http://www.springerlink.com/content/q517578013636665/> ultimo accesso febbraio 2011)
- [26] G. Rädcl, K.P. Shine, "Evaluation of the use of radiosonde humidity data to predict the occurrence of persistent contrails" Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133, 1413-1423, 2007.

ⁱ I riferimenti, [3], [4], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [16], [18], [20], [21], [22], [23], [24] e [25] sono reperibili direttamente in internet agli indirizzi indicati, quelli [1], [2], [5], [6], [7], [14] e [17] possono essere consultati presso l'AF "Modellistica previsionale" del Dipartimento ARPAT di Firenze.