

Modelli e dati per lo studio dei cambiamenti climatici e la qualità dell'aria

Gabriele Curci e Guido Visconti

CETEMPS – Dipartimento di Fisica, Università degli Studi dell'Aquila

e-mail: gabriele.curci@aquila.infn.it

home-page: <http://pumpkin.aquila.infn.it/gabri/>

La comunità scientifica internazionale ha raggiunto un largo consenso nell'attribuire ai prodotti di scarto delle attività umane gran parte della responsabilità per i cambiamenti climatici e per il degrado della qualità dell'aria osservati negli ultimi due secoli (IPCC, 2007; EEA, 2007). Le due questioni sono strettamente connesse, poiché entrambe hanno a che fare con l'evoluzione della composizione chimica dell'atmosfera. Negli ultimi decenni si sono sviluppate tecniche di osservazione sia da terra, che da piattaforma aerea, che da satellite per l'osservazione sempre più accurata della composizione atmosferica. Con l'avanzare della comprensione della composizione e dei processi fisici e chimici legati alla sua evoluzione, si sono sviluppati anche modelli numerici sempre più complessi, che permettono di simulare e di prevedere la concentrazione dei composti di interesse sia su scala globale che su scala locale e che forniscono un utile strumento di interpretazione delle osservazioni. In questo contributo, ci si propone di fornire una breve introduzione al mondo dei modelli di chimica atmosferica e di dare una breve panoramica della loro applicazione, con particolare attenzione alle attività svolte presso il Centro di Eccellenza del Dipartimento di Fisica dell'Università dell'Aquila, il CETEMPS (Centro di Eccellenza per l'integrazione di tecniche di telerilevamento e modellistica per la previsione di eventi meteorologici severi).

L'atmosfera terrestre è costituita al 99% da azoto e ossigeno molecolare (N_2 78% e O_2 21%), mentre il restante 1% è costituito in gran parte da gas nobili inerti (Argon, Neon, ecc.) più una miriade di altri gas di natura inorganica e organica. Un ruolo a parte è di solito riservato al vapor d'acqua, che può raggiungere localmente percentuali anche del 4% nella bassa atmosfera equatoriale, per il suo forte impatto sul clima: esso è infatti il maggior responsabile del cosiddetto "effetto serra" naturale, che sostiene la temperatura media della superficie terrestre a circa 15 °C (altrimenti sarebbe circa -18 °C!) e che ha permesso lo sviluppo della vita sulla Terra. Il vapor d'acqua anima anche i cambiamenti atmosferici su scale di tempo breve (da pochi minuti a pochi giorni), ovvero la meteorologia, tramite la formazione di nubi, la pioggia e gli scambi di calore latente. Accanto al ruolo preponderante del vapor d'acqua, una lunga serie di altri gas presenti in concentrazioni bassissime¹ contribuisce al cosiddetto "forzante radiativo" dell'atmosfera sul sistema climatico²: tra questi ricordiamo l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), l'ozono (O_3) e gli

¹ Le unità di misura utilizzate per questi composti presenti "in tracce" sono tipicamente espresse in ppm, ppb e ppt, che rappresentano rispettivamente il numero di particelle del composto per milione, per miliardo e per mille miliardi di particella d'aria.

² Il clima è il comportamento medio a lungo termine (> 10 anni) del sistema accoppiato atmosfera-suolo-oceano-biosfera. Il "forzante radiativo" è imposto al sistema da tutti quei composti gassosi, liquidi o solidi sospesi in atmosfera che sono in grado di riflettere e/o assorbire la radiazione elettromagnetica nell'ultravioletto e nel visibile (radiazione solare) e nell'infrarosso (radiazione terrestre). Questi composti, grazie alle loro proprietà "ottiche", sono quindi in grado

aerosol³. La CO₂ è il gas più citato quando si parla di “effetto serra” antropico, ovvero indotto dalle attività umane, poiché è quello che è presente in concentrazioni maggiori (salite dai 280 ppm dell’era pre-industriale ai 393 ppm del 2010) ed ha vita media⁴ più lunga (> 100 anni) ed è quindi quello che contribuisce maggiormente alla forzatura impressa sul clima, in particolare ad un riscaldamento della superficie terrestre. Il metano, l’ozono e gli altri composti denominati “gas serra” (protossido d’azoto, clorofluorocarburi, ecc.) sono anch’essi aumentati in concentrazione rispetto all’era pre-industriale e contribuiscono anch’essi ad un riscaldamento superiore al “naturale” dei bassi strati dell’atmosfera. Il ruolo degli aerosol è invece più complicato. Essi, in prima approssimazione, riflettono la radiazione solare, quindi contribuiscono a raffreddare la superficie terrestre (effetto diretto degli aerosol). Al contempo, essi modificano anche la formazione e l’evoluzione delle nubi (anzi, le nubi, senza gli aerosol, che fungono da nuclei di condensazione per il vapor d’acqua, non si formerebbero affatto!), causando al netto un ulteriore raffreddamento della superficie che maschera gran parte del riscaldamento impresso dai gas serra (effetto indiretto degli aerosol). Lo studio degli aerosol è però relativamente recente rispetto a quello dei gas serra e ci sono ancora molte incertezze legate al loro ruolo nel sistema climatico.

L’ozono e gli aerosol costituiscono un ponte di congiunzione tra il problema dei cambiamenti climatici e quello della qualità dell’aria che respiriamo (Jacob, 1999). L’ozono si forma in atmosfera per via fotochimica (è un composto secondario, ovvero non direttamente emesso da sorgenti specifiche come i composti primari). In stratosfera (>12 km altezza) esso si forma in seguito alla fotolisi dell’O₂ a spese della radiazione solare e costituisce così uno strato permanente che scherma l’atmosfera sottostante da gran parte della radiazione ultravioletta, cosa che ha permesso lo sviluppo della vita così come la conosciamo (ozono “buono”). Più in basso, in troposfera (dal suolo fino alla stratosfera), l’ozono si forma per via fotochimica dalla fotolisi del diossido di azoto (NO₂) e la sua ulteriore formazione è stimolata dai cicli catalitici innescati dagli ossidi di azoto (NO_x) e dagli ossidi d’idrogeno (HO_x) nei processi ossidativi atmosferici dei composti organici volatili (COV) e del monossido di carbonio (CO). L’ozono si forma in bassa troposfera soprattutto sottovento a zone con forti sorgenti di NO_x e COV e in presenza di umidità ed insolazione elevate e staganzione delle masse d’aria (Jenkin and Clemitshaw, 2000). In alte concentrazioni (> 90 ppb) l’ozono può diventare tossico per esposizioni prolungate e causare danni all’apparato respiratorio (ozono “cattivo”). Poiché il 90% delle emissioni di NO_x in atmosfera sono dovute alle attività umane (tutti i processi di combustione) è ad esse che, insieme anche a significative emissioni di CO e COV, si attribuisce l’aumento dell’ozono troposferico dall’era pre-industriale. NO_x, CO e COV, oltre ad essere progenitori del nocivo ozono troposferico, possono essere anche essi stessi inquinanti nocivi alla salute della flora, della fauna e dell’uomo (es. diossido di azoto, monossido di carbonio, benzene, ecc.) quando raggiungono concentrazioni critiche. Gli

di modificare i flussi di radiazione nel sistema atmosferico determinando appunto una “forzatura” all’equilibrio preesistente.

³ Particelle liquide o solide in sospensione in atmosfera. Vengono solitamente distinte dalle gocce d’acqua sia per le dimensioni più piccole (< 10 microm o μm) sia per la composizione chimica (che non è prevalentemente acqua, ma altri composti di natura inorganica e organica). Tuttavia la separazione tra aerosol e gocce d’acqua non è un confine ben definito, ma piuttosto una convezione di comodo.

⁴ Tempo medio di residenza in atmosfera di una certa sostanza prima di essere distrutta chimicamente o depositata alla superficie.

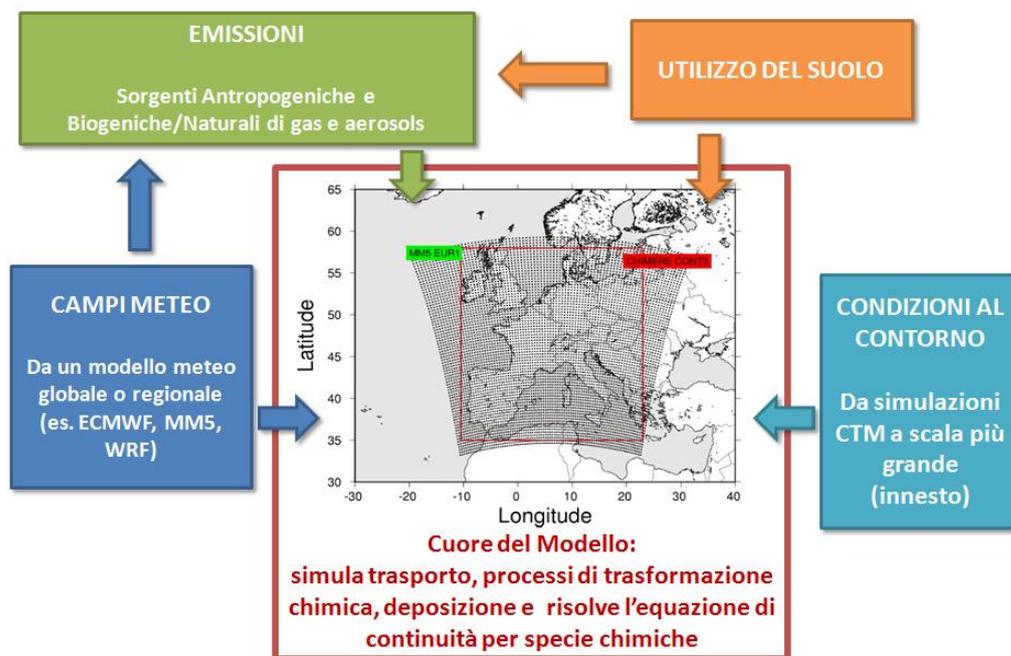


Figura 1. Flusso di dati in un modello di chimica e trasporto (CTM). In un modello CTM si risolvono su una griglia discreta tri-dimensionale i processi che determinano l'evoluzione della composizione chimica atmosferica. I campi meteorologici non vengono calcolati direttamente nel CTM, ma sono forniti in ingresso dalla simulazione di un modello di circolazione generale o a scala regionale (GCM o RCM). Altri dati in ingresso sono i flussi di emissioni da sorgenti naturali o legati all'attività antropica e dati sull'utilizzo del suolo. Per i CTM ad area limitata (non globale, come in figura) sono necessarie in ingresso alle concentrazioni chimiche al contorno del dominio simulato.

aerosol sono emessi direttamente in atmosfera da numerose sorgenti sia naturali che antropiche (es. deserti, oceani, traffico, industrie, ecc.) sia si formano per via secondaria da reazioni fotochimiche simili a quelle che coinvolgono l'ozono (Poschl, 2005). Gli aerosol più fini ($< 1 \mu\text{m}$) e più dannosi per la salute umana si formano per via fotochimica in atmosfera soprattutto a seguito dell'ossidazione di composti emessi da attività antropiche. I gas e gli aerosol solitamente inclusi negli studi che riguardano il degrado della qualità dell'aria hanno vita media molto breve rispetto ai gas serra (da pochi minuti a pochi mesi), ma contribuiscono anch'essi ai cambiamenti climatici, perché: (1) pur avendo vita breve rispetto a CO_2 o CH_4 , sono continuamente prodotti e distrutti in modo da risultare presenti in quantità sufficienti per costituire un importante forzante sui flussi radiativi; (2) perché sostengono il cosiddetto "potere ossidante" dell'atmosfera, ovvero ciò che rende possibile le reazioni fotochimiche cui abbiamo fatto cenno, trasformando in definitiva CO e COV in CO_2 . Che ci si concentri sul problema della qualità dell'aria o del riscaldamento globale, le specie e le reazioni chimiche coinvolte sono essenzialmente le stesse, ma la restrizione che viene fatta solo su alcune in un caso e nell'altro è dovuta esclusivamente alla diversa scala temporale di interesse. La qualità dell'aria, così come la meteorologia, osservata e mediata su tempi lunghi, non diventa altro che lo studio del clima!

La concentrazione delle specie chimiche in atmosfera, a prescindere dal nostro punto di vista limitato a scale temporali brevi o lunghe, è regolato da quattro categorie di processi: l'emissione, il trasporto, la trasformazione chimica e la deposizione. I modelli numerici tri-dimensionali dell'atmosfera forniscono una rappresentazione matematica della nostra attuale conoscenza su questi processi e producono una descrizione della variabilità nel tempo e nello spazio delle specie chimiche atmosferiche (Jacob, 1999). I modelli di cui parleremo in questa sede sono i cosiddetti modelli di chimica e trasporto (CTM), che si distinguono dai modelli di circolazione generale (GCM). I modelli CTM non calcolano i campi meteorologici da sé, ma li prendono in ingresso da un modello GCM, che invece simula sia la dinamica atmosferica sia la composizione. I modelli CTM, poiché risparmiano risorse di calcolo notevoli non simulando la meteorologia, permettono di

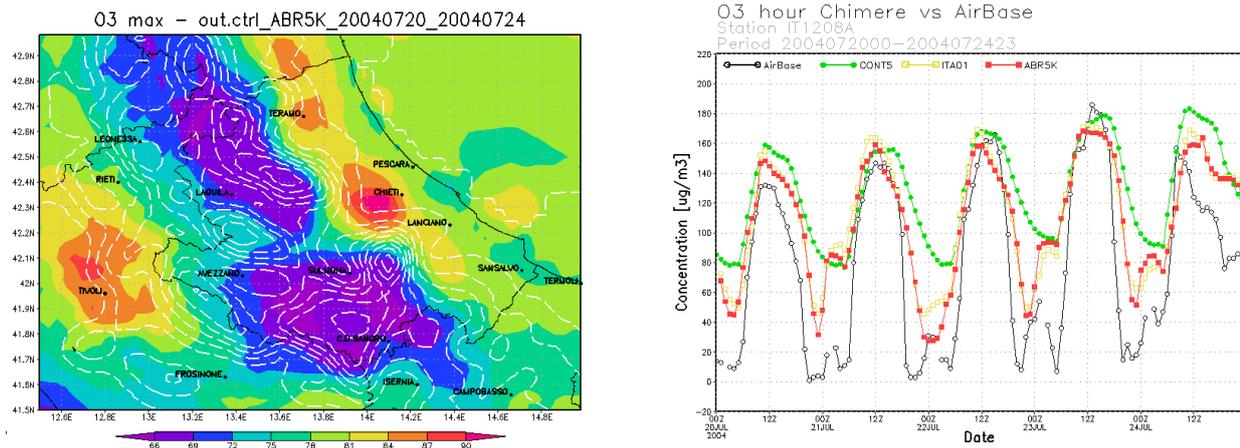


Figura 2. Simulazione della concentrazione di ozono sul territorio Abruzzese. A sinistra, la media della concentrazione giornaliera massima a terra per un periodo estivo: si nota come i picchi di concentrazione vengano raggiunti sottovento ai principali centri urbani (es. Pescara e Roma), dove vengono raggiunte le condizioni più favorevoli alla produzione fotochimica di ozono. A destra, la concentrazione di ozono simulato a diverse risoluzioni spaziali (colori: verde 50 km, giallo 12 km, rosso 5 km) è confrontato con le misure di una centralina di monitoraggio di Pescara.

includere molti più dettagli nella simulazione della composizione atmosferica rispetto ai GCM, rispetto ai quali, quindi, svolgono una funzione complementare. Con l'aumentare delle risorse di calcolo queste due gerarchie di modelli si stanno fondendo sempre più, andando essenzialmente verso la futura generazione di modelli onnicomprensivi denominati Earth System Models (ESM), che descrivono in modo dettagliato tutti i processi relativi a suolo-oceano-atmosfera-biosfera e le reciproche interazioni.

Il flusso di dati in un generico modello CTM a scala regionale (su un'area limitata, non globale) è schematizzato in Figura 1. I dati in ingresso relativi a meteorologia, emissioni naturali e antropiche, utilizzo del suolo e condizioni al contorno vengono forniti al cuore del modello che, semplificando al massimo la notazione matematica, risolve per ogni cella del dominio tri-dimensionale un sistema di equazioni differenziali che danno la variazione nel tempo della concentrazione delle specie chimiche:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla C_i + P_i - D_i \quad \{i = 1, \dots, n\}$$

dove C_i è la frazione molare della i -esima specie chimica, t è il tempo, \mathbf{U} è il vettore vento, P_i e D_i sono i termini di produzione e distruzione di C_i , n è il numero di specie considerate. Il primo termine a destra dell'equazione rappresenta i processi di trasporto (avvezione, diffusione turbolenta, ecc.). I termini P_i e D_i includono emissione, produzione/distruzione chimica e deposizione.

Similmente a quanto è avvenuto per i modelli meteorologici, un forte impulso allo sviluppo dei modelli di composizione atmosferica è stato dato dall'avvento di satellite (Palmer, 2008; Kaufman et al., 2002). Le misure da satellite hanno molte limitazioni, in termini di sensibilità e numero di variabili, rispetto alle misure che è possibile effettuare da terra, tuttavia sono le uniche a garantire una copertura globale capace di fornire una visione d'insieme del fenomeno studiato. Le misure di telerilevamento effettuate da terra e le misure da piattaforma aerea possono essere utilizzate come elemento di collegamento tra la scala globale del satellite e la scala locale delle misure a terra.

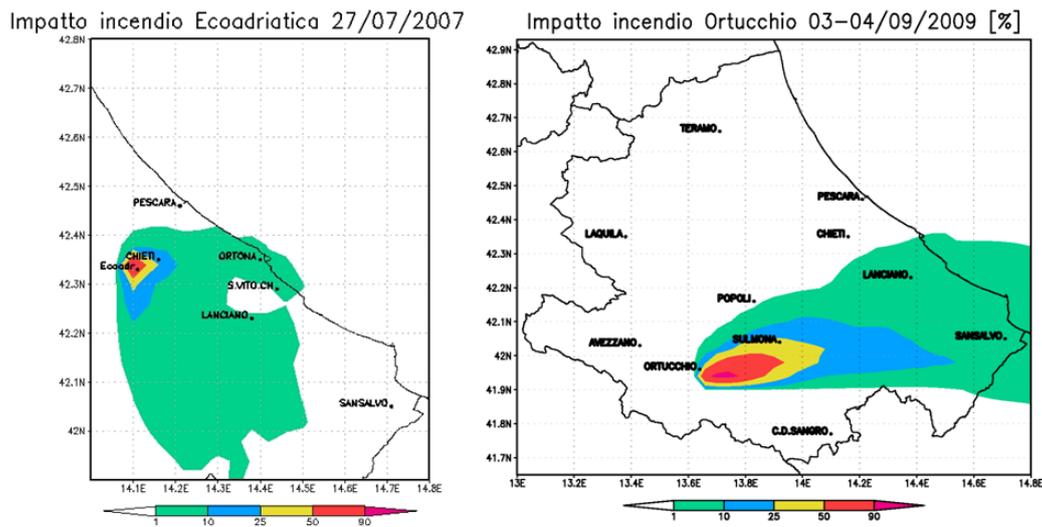


Figura 3. Simulazione dell'impatto di incendi dolosi sul territorio Abruzzese. A sinistra, incendio all'impianto di raccolta rifiuti Eoadriatica vicino Chieti il 27 Luglio 2007. A destra, quello di un deposito di Ortucchio il 3 Luglio 2009. I colori indicano la stima della percentuale di materiale depositato rispetto al punto di massimo impatto (quello dell'incendio stesso).

Presso il CETEMPS vengono utilizzati diversi modelli per lo studio della composizione atmosferica: ne diamo una breve panoramica delle più recenti applicazioni. Cominciamo con quelle di più stretto interesse per la comunità scientifica della Regione Abruzzo. Esse riguardano l'implementazione del CTM francese CHIMERE (Bessagnet et al., 2008) sul territorio nazionale e regionale.

In Figura 2, mostriamo la simulazione dei livelli di ozono sul territorio regionale. In questo caso il risultato del CTM è utile per individuare le aree dove ci si aspetta il massimo impatto dello "smog fotochimico" conseguente alle emissioni concentrate soprattutto nei grandi agglomerati urbani. Il caso estivo preso in considerazione presenta una situazione tipica in cui la brezza marina spinge l'aria costiera verso l'interno durante il giorno. In queste condizioni, il modello predice che la massima concentrazione di ozono sull'Abruzzo è raggiunta sottovento all'area di Chieti-Pescara e che il pennacchio fotochimico può incanalarsi tra le montagne fino a raggiungere la zona di Sulmona. Questa informazione può essere, ad esempio, utilizzata per pianificare il posizionamento di nuove centraline di monitoraggio.

In Figura 3, mostriamo un'altra applicazione del CTM CHIMERE al territorio Abruzzese. Si tratta della simulazione dell'impatto di due incendi dolosi. In questi casi, poiché il flusso e la composizione esatta delle emissioni non è nota (almeno non lo è prima di dettagliate analisi) si è scelto di simulare la diffusione del pennacchio dell'incendio con un tracciate chimicamente inerte, ma in grado di depositarsi. Questa simulazione può fornire delle prime indicazioni sulle aree più fortemente interessate dal deposito di inquinanti, in modo da permettere una pianificazione più stringente dei rilievi da parte delle autorità di competenza.

La simulazione su scala locale deve tener conto, come spiegato in precedenza, dell'effetto delle emissioni anche al di fuori del dominio di simulazione tramite le condizioni al contorno, che servono a tener conto del trasporto di composti chimici verso il dominio di interesse. Un esempio di tale trasporto è rappresentato dall'evento eruttivo del vulcano islandese Eyjafjallajökull, che

nell'Aprile del 2010 ha tenuto sotto scacco i cieli Europei con le sue ceneri. Con lo stesso modello utilizzato per le simulazioni sull'Abruzzo, ma su un dominio di applicazione più vasto, il CETEMPS ha effettuato nei giorni immediatamente successivi alla prima eruzione un'attività di monitoraggio e previsione modellistica dell'evoluzione del pennacchio di ceneri. In Figura 4 riportiamo la previsione effettuata per il 21 Aprile 2010 ore 00 UTC a confronto con la previsione ufficiale del Volcanic Ash Advisory Center (VAAC). Un resoconto della concitata attività del centro durante l'Aprile 2010 può essere reperito sul web⁵.

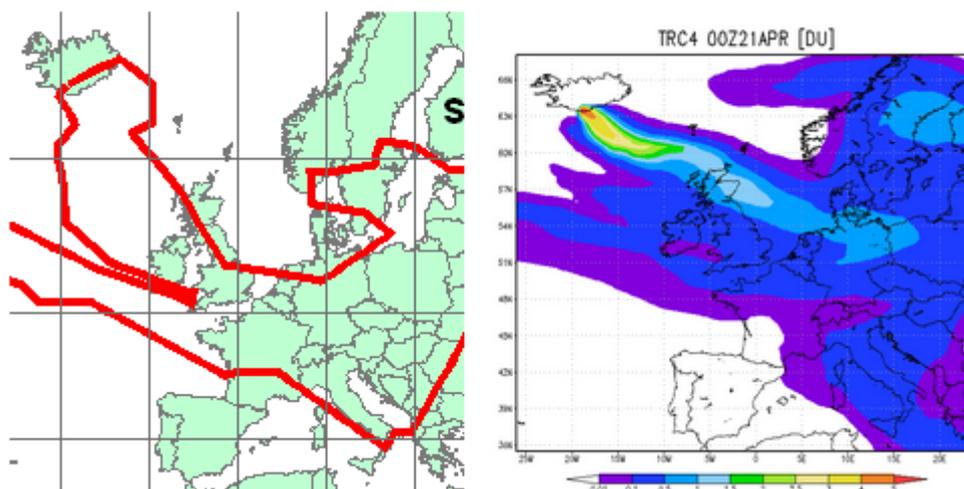


Figura 4. Simulazione dell'evoluzione del pennacchio vulcanico del vulcano islandese Eyjafjallajökull nell'Aprile 2010. A sinistra, la previsione ufficiale del VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) sulla distribuzione delle ceneri il 21 Aprile 2010 alle 00 UTC. A destra, la previsione effettuata dal CETEMPS per lo stesso periodo temporale.

Il modello CTM CHIMERE può essere utilizzato, come appena illustrato, oltre che per riprodurre eventi passati, anche per prevedere l'evoluzione della composizione atmosferica. Particolarmente utile può risultare la previsione del superamento delle soglie regolamentate dall'Unione Europea per garantire una buona qualità dell'aria (Dir. 2008/50/CE). Un servizio sperimentale, denominato ForeChem, è operativo presso il CETEMPS e fornisce la previsione dei livelli di inquinamento da polveri sottili (PM10, PM2.5), ozono e diossido d'azoto per il giorno stesso e i due giorni successivi sul territorio italiano ed europeo (Curci, 2010). Le previsioni sono disponibili in formato grafico sul web⁶.

Bibliografia

- Bessagnet, B., L. Menut, G. Curci, A. Hodzic, B. Guillaume, C. Liousse, S. Moukhtar, B. Pun, C. Seigneur and M. Schulz (2008). Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe - Focus on Secondary Organic Aerosols, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 61, 175-202.
- Curci, G. (2010). An Air Quality Forecasting tool over Italy (ForeChem), in *Proceedings of 31st Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, Torino, Italy, Sep 2010.
- Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

⁵ <http://cetemps.aquila.infn.it/Cetemps/it/eruzione-del-vulcano-islandese-eyjafjallajoekull.html>

⁶ http://pumpkin.aquila.infn.it/forechem/index_it.html

- EEA Report (2007). Air pollution in Europe 1990–2004, European Environmental Agency Report No. 2/2007, ISSN 1725-9177, <http://www.eea.europa.eu/>.
- IPCC (2007). Climate change: The scientific basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>.
- Jacob, D. J. (1999). Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press.
- Jenkin, M. E., and K. C. Clemitshaw (2000), Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer, *Atmospheric Environment*, 34, 2499-2527.
- Kaufman, Y. J., D. Tanré, and O. Boucher (2002), A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419, 215-223.
- Palmer, P. I. (2008), Quantifying sources and sinks of trace gases using space-borne measurements: current and future science, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366, 4509-4528.
- Poschl, U. (2005), Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects, *Angewandte Chemie Int. Ed.*, 44, 7520-7540.