

SIMULAZIONI E MODELLI PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

In Italia si rilevano spesso elevate concentrazioni di ozono e particolato, che superano i limiti fissati dalla legislazione vigente. Per affrontare questo problema è possibile utilizzare sistemi di modelli deterministici, in grado di simulare gli effetti di differenti politiche di riduzione delle emissioni antropiche sulle concentrazioni di inquinanti. Si presentano in questo lavoro i primi risultati delle simulazioni effettuate sul Nord Italia (relative all'anno 2004) nell'ambito del progetto HPC-EUROPA, per creare una banca dati meteorologica da utilizzare in applicazioni modellistiche per la qualità dell'aria.

1. INTRODUZIONE

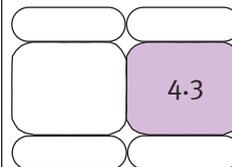
La normativa italiana sull'inquinamento atmosferico recepisce le direttive della Commissione Europea in materia, assegnando alle Regioni il ruolo di autorità preposte alla gestione e monitoraggio della qualità dell'aria. Al fine di raggiungere questi obiettivi, suggerisce un utilizzo integrato di differenti strumenti quali misure, inventari di emissioni, modelli di dispersione e di chimica e trasporto. Un corretto utilizzo dei modelli di chimica e trasporto è tanto cruciale quanto complesso, poiché è solitamente necessario che essi siano integrati in più ampi sistemi di modelli, che includano anche modelli delle emissioni, modelli per la creazione delle condizioni iniziali e al contorno e modelli meteorologici [1]. Questo studio è focalizzato sui modelli meteorologici che forniscono campi 3D da utilizzare come input alla simulazione della qualità dell'aria.

Attualmente ancora mancano delle linee guida generali e condivise sulle tecniche e gli approcci da utilizzare per valutare le prestazioni di modelli meteorologici; inoltre manca un ampio consenso sulle modalità da adotta-

re per analizzare differenti configurazioni dei modelli, legate ad esempio alla risoluzione orizzontale della griglia di simulazione, alla struttura verticale dei modelli ecc. [2]. Per quanto riguarda i modelli di chimica e trasporto, le linee guida europee forniscono direttive più precise. Per esempio ai fini della valutazione dell'effetto di riduzioni delle emissioni sulla qualità dell'aria, si richiede che le simulazioni abbiano una durata di almeno un anno; ciò comporta, dal punto di vista della meteorologia, l'esigenza di generare *dataset* meteorologici di dimensioni elevate e di disporre quindi di risorse di calcolo parallelo per far fronte alla pesantezza computazionale delle simulazioni. A titolo di esempio, su una macchina a singolo processore con caratteristiche standard e per un tipico dominio regionale, per ricostruire i campi meteo di un'ora di simulazione può essere necessario utilizzare circa 30 min di tempo di calcolo. Si capisce dunque come l'approccio "sequenziale" per questo tipo di simulazioni non sia proponibile. In quest'ottica si inserisce il lavoro presentato, che è stato svolto



Ekaterina Batchvarova
Giovanna Finzi
Enrico Pisoni



nell'ambito del progetto HPC-EUROPA (*Pan-European Research Infrastructure on High Performance Computing*) grazie alla possibilità di accedere a *cluster* di processori e ad un numero elevato di ore di calcolo. In particolare sono state realizzate simulazioni meteorologiche utilizzando il modello RAMS sul dominio della pianura padana. È stata effettuata una simulazione annuale considerando come riferimento il 2004. Oltre alla descrizione del modello e della sua configurazione operativa, nel seguito si presenta un primo confronto tra variabili meteorologiche misurate e simulate sull'area metropolitana milanese. È noto che la città di Milano è spesso interessata da fenomeni di inquinamento molto elevato [3] ed è dunque particolarmente importante descrivere in maniera accurata i campi meteorologici per questo sito.

2. IL MODELLO UTILIZZATO E LA SUA CONFIGURAZIONE

Il modello RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System* [4]), sviluppato dai ricercatori della *Colorado State University*, è un modello numerico per la simulazione e la previsione delle variabili meteorologiche e per la loro rappresentazione grafica. I principali moduli che compongono RAMS sono:

1. un modello atmosferico, che ricostruisce i campi meteorologici utilizzando complesse parametrizzazioni e sistemi di equazioni differenziali;
2. un preprocessore, che permette di formattare i dati iniziali a partire dalle misure o dalle simulazioni a grande scala, da utilizzare per fornire le condizioni iniziali e al contorno al modello;
3. un post processore, per la visualizzazione e l'analisi dei risultati.

Essendo RAMS un modello deterministico che risolve al suo interno sistemi di equazioni differenziali molto pesanti dal punto di vista computazionale, le simulazioni vengono frequentemente implementate su macchine per il calcolo parallelo. Al suo interno, infatti, il codice RAMS implementa un paradigma di decomposizione geografica del dominio di simulazione; in pratica il dominio viene suddiviso in sottodomini, ogni sottodominio viene assegnato ad un processore, ed una proce-

dura ad hoc si occupa di mettere in comunicazione i sottodomini tra loro, in modo che questi possano scambiarsi le informazioni "al contorno" delle simulazioni stesse. Al termine della simulazione i risultati dei sottodomini vengono di nuovo uniti in un unico campo, contenente i risultati della simulazione sul dominio globale. Il modello è principalmente pensato per essere utilizzato su sistemi Unix e Linux, ed è quasi interamente scritto nel linguaggio di programmazione Fortran 90.

RAMS può essere utilizzato per differenti scopi. In questo studio il modello viene utilizzato per fornire campi meteorologici ad un modello di chimica e trasporto. L'analisi si concentra sul Nord Italia, un'area caratterizzata da elevate concentrazioni di inquinanti secondari, che comportano una notevole complessità nell'analisi e implementazione di politiche di controllo efficienti delle emissioni inquinanti. Il dominio include la regione Lombardia, area ad elevata industrializzazione, nella quale vivono 10 milioni di abitanti. Inoltre, date le peculiari condizioni meteorologiche caratterizzate da basse velocità del vento e inversioni di temperatura, e data la morfologia complessa del dominio, risulta vitale una corretta ricostruzione delle variabili meteorologiche sul dominio al fine di effettuare una simulazione affidabile dei campi di concentrazione degli inquinanti con un modello di chimica e trasporto. La creazione di un *dataset* meteorologico potrà consentire in futuro di utilizzare sul dominio di studio il sistema di supporto alle decisioni GAMES [5], sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Brescia. Dal punto di vista della configurazione del modello, l'applicazione implementata in questo progetto utilizza tre griglie innestate (come mostrato nella Figura 1). Ciò significa che vengono lanciate contemporaneamente differenti simulazioni modellistiche - una su un dominio europeo, una su un dominio sub-europeo e una sulla pianura padana - e che queste simulazioni sono in comunicazione tra loro scambiandosi informazioni tra livelli superiori ed inferiori, e viceversa. In questo modo si è in grado di descrivere, tramite i diversi livelli di simulazione, sia la meteorologia di tipo sinottico (a grande scala), sia la meteorologia locale, condizionata dalla meteorologia del sito oggetto di studio.

La risoluzione spaziale delle tre griglie è rispettivamente 128, 32 e 8 km, mentre il numero di celle considerate per le simulazioni risulta rispettivamente 40×40 , 86×86 e 102×102 . Dal punto di vista della risoluzione verticale, il modello considera 33 livelli con spaziatura crescente all'aumentare dell'altezza, giungendo sino a circa 20 km di quota. La risoluzione temporale di simulazione è di un'ora.

La simulazione è stata estesa a tutto l'anno 2004; dal punto di vista dell'implementazione effettiva della simulazione, sono state effettuate un totale di 72 simulazioni di 126 h ciascuna, considerando un tempo di *spin-up* (in pratica di "riscaldamento" del modello) di circa 6 h. Il modello è stato lanciato utilizzando 20 CPU per ogni simulazione, per un totale di circa 10000 h di calcolo. I *dataset* utilizzati per le simulazioni sono: USGS (*United States Geological Survey*) per l'orografia e l'uso del suolo (ad una risoluzione di $30''$) e la temperatura superficiale del mare (medie climatologiche ad una risoluzione di 1°). Le condizioni iniziali e al contorno sono fornite dai dati di rianalisi di NCAR (*National Centre for Environmental Research*) [6]. Questi *file* meteorologici sono ottenuti dai *run* di un modello a grande scala gestito dal *National Centre for Environmental Prediction* (NCEP) e hanno una risoluzione spaziale di 2.5° , temporale di 6 h.

3. L'APPLICAZIONE MODELLISTICA

Si presentano ora i risultati di una prima validazione effettuata sulle simulazioni realizzate nell'ambito del progetto. Le misure per validare le simulazioni modellistiche sono state scaricate dal sito NCEP *Global Surface Observations ADP* (*Automated Data Processing*), usando il database *ds464.o* (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.o/>), che contiene numerose misure meteorologiche a livello globale. In particolare sono state estratte le serie temporali di temperatura, velocità e direzione del vento, per il periodo che va dal 15 gennaio al 15 febbraio 2004. Questa finestra temporale è stata scelta poiché nei mesi invernali la pianura padana è caratterizzata da episodi di inquinamento significativi e frequenti, e dunque è



FIGURA 1

L'orografia dei tre domini considerati per la simulazione modellistica

importante la corretta ricostruzione della meteorologia in questo periodo dell'anno.

Nel dettaglio si è scelto di utilizzare, per una prima validazione delle simulazioni modellistiche, la stazione di misura dell'aeroporto di Milano Linate (molto vicino alla città di Milano, nella parte orientale della città stessa). È importante notare che la validazione viene fatta tra i dati della stazione di misura e il valore medio calcolato per la cella di simulazione (dimensione 8×8 km) più vicina alle coordinate della stazione stessa.

La figura 2 A mostra come esempio la mappa di temperatura alle ore 12:00 del 10 febbraio 2004. Si può osservare che le temperature vengono descritte correttamente sul dominio dal punto di vista spaziale, con valori più bassi sulle Alpi e valori relativamente omogenei sulla pianura padana.

La figura 2 B mostra invece il confronto tra la temperatura media giornaliera ricostruita da modello e quella misurata. Si nota una generale sottostima del modello con alcune eccezioni tra il 20 e il 30 gennaio, periodo in cui i valori sono meglio riprodotti (o leggermente sovrastimati) dal modello.

La figura 3 mostra un'analoga analisi per la velocità media oraria del vento, valutata a 10m di altezza. La figura 3 A mostra la velocità e la direzione del vento sul dominio di studio, per la stessa ora di simulazione considerata per il campo di temperatura. Il campo di ven-

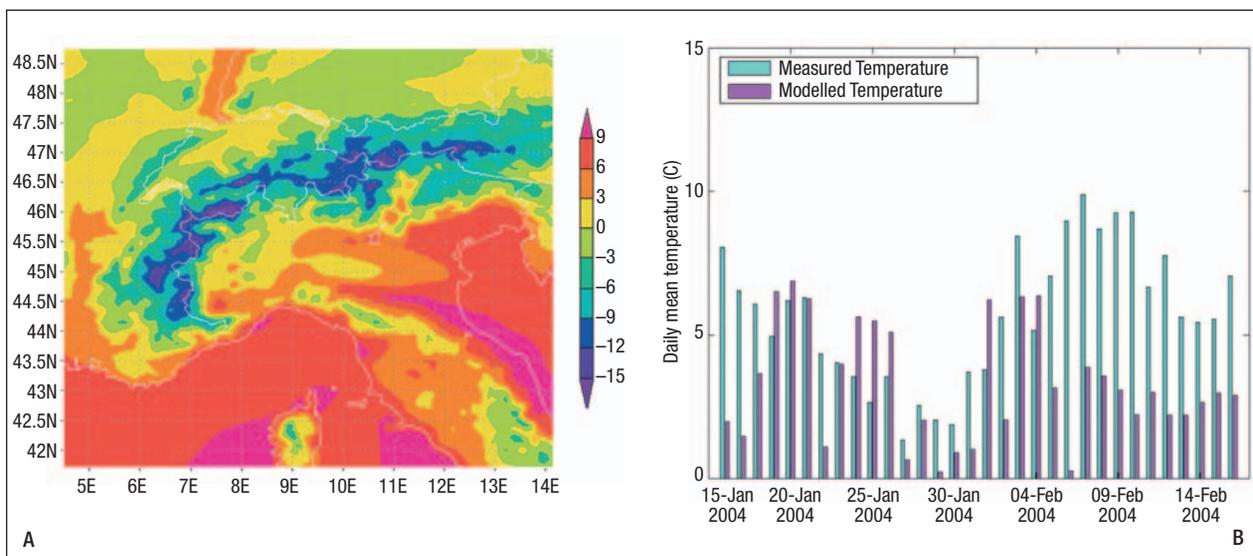


FIGURA 2

A - Campi di temperatura (gradi) a 2 m di altezza, come simulata dal modello, alle ore 12:00 del 10 febbraio 2004; B - confronto sulla media giornaliera di temperatura a 2 m, tra modello e misura, per il sito di Milano Linate, per il periodo tra il 15 gennaio e il 15 febbraio 2004

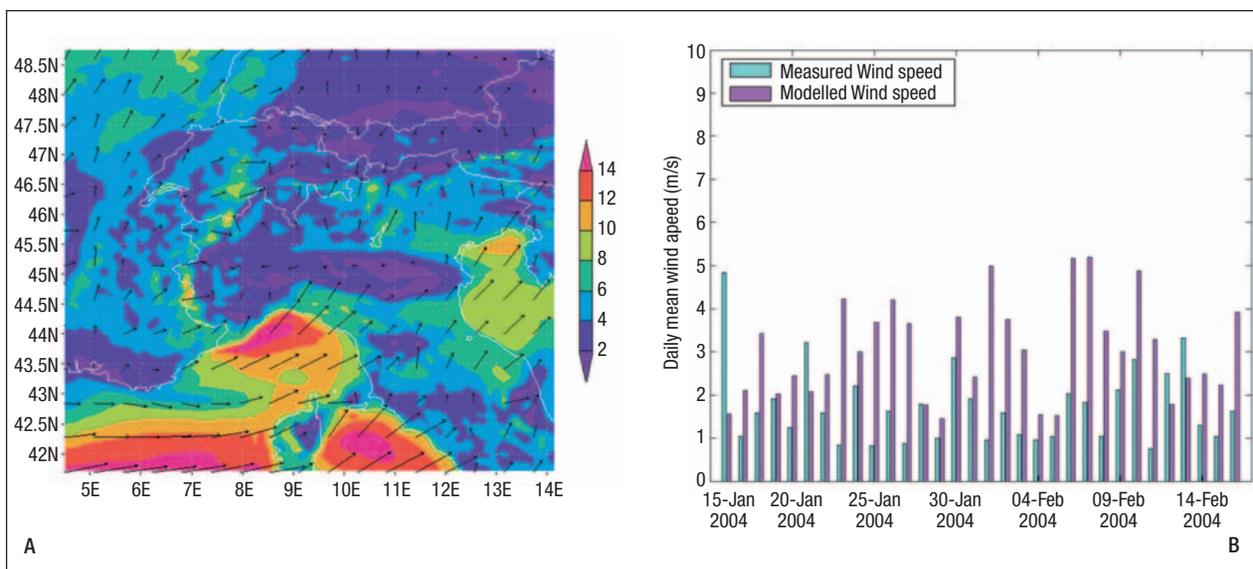


FIGURA 3

A - Campo di vento orario a 10 m di altezza, come simulato dal modello (i colori rappresentano la velocità del vento in m/s, mentre le frecce la direzione del vento), alle ore 12:00 del 10 febbraio 2004; B - confronto sulla velocità del vento media giornaliera (misura e modello) sul sito di Milano Linate, per il periodo dal 15 gennaio al 15 febbraio 2004

to, sull'asse centrale della pianura padana, evidenzia la tipica direzione prevalente est-ovest, associata a velocità del vento generalmente basse. Sul Mar Mediterraneo si notano invece velocità del vento più elevate associate a direzioni provenienti da ovest/sud-ovest. Queste caratteristiche sono probabilmente legate più alle dinamiche meteorologiche a scala sinottica che alle dinamiche locali (influen-

zate ad esempio dall'orografia). La figura 3 B mostra un confronto tra la velocità del vento media giornaliera simulata e misurata per il sito dell'aeroporto di Milano Linate. Si nota la forte difficoltà del modello a riprodurre le basse velocità del vento, con una costante sovrastima; questa caratteristica è comune a molte simulazioni meteorologiche presenti in letteratura implementate sul Nord Italia.

4. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati mostrati i primi risultati della validazione delle simulazioni meteorologiche sul Nord Italia, effettuate utilizzando il modello RAMS nel quadro del progetto HPC-EUROPA. Per questo tipo di simulazioni di lungo periodo, con elevata risoluzione spaziale e tre griglie innestate è risultato fondamentale l'utilizzo di *cluster* di processori, che hanno consentito di ottenere risultati in tempi di calcolo accettabili. In particolare sono state realizzate simulazioni meteorologiche estese a tutto l'anno 2004 sul dominio della pianura padana, predisponendo così un *database* di campi meteorologici 3D utilizzabili per alimentare ulteriori applicazioni modellistiche per la valutazione della qualità dell'aria, sul dominio preso in considerazione.

Possibili sviluppi scientifici di questo tipo di applicazioni meteorologiche prevedono l'utilizzo di tecniche di *data assimilation* e di modelli *online*. Per *data assimilation* si intende quell'insieme di tecniche nate per migliorare l'affidabilità della stima dei campi meteorologici, integrando i risultati delle simulazioni modellistiche con le misure disponibili sul dominio. I modelli *online* invece permettono di risolvere, in maniera accoppiata, le equazioni differenziali sia dei modelli meteorologici che dei modelli di chimica e trasporto, utilizzando gli stessi *time-step* di integrazione e consentono di simulare le mutue relazioni di *feedback*.

EKATERINA BATCHVAROVA, PhD e DSc, è ricercatrice senior all'istituto nazionale di meteorologia e idrologia dell'Accademia delle Scienze di Sofia, Bulgaria. I suoi campi di ricerca sono principalmente relativi a: strato limite planetario su aree ad orografia complessa, su aree pianeggianti e su aree urbane; turbolenza atmosferica, modellistica e monitoraggio della qualità dell'aria. È autrice di circa 50 pubblicazioni in riviste internazionali e ha partecipato a numerose conferenze. Si occupa inoltre dell'organizzazione di conferenze internazionali sull'inquinamento atmosferico, è membro del comitato scientifico delle conferenze NATO/SPS ITM e HARMO, ed è vicepresidente di EUROSAP (EUROSAP, European Association for the Science of Air Pollution).
Ekaterina.Batchvarova@meteo.bg

GIOVANNA FINZI è professore ordinario di Automatica presso l'Università di Brescia, dove coordina il gruppo di modellistica ambientale (<http://automatica.ing.unibs.it/esma/esma.html>). L'attività scientifica, svolta in collaborazione con centri di ricerca nazionali e internazionali, riguarda essenzialmente la modellistica e la gestione dei sistemi ambientali, con particolare interesse per il controllo dell'inquinamento atmosferico. È rappresentante nazionale in Comitati di Gestione di Azioni Europee COST nel settore Earth System Science and Environmental Management e nella Task Force UNECE on Measurements and Modelling.
finzi@ing.unibs.it

ENRICO PISONI è ricercatore all'Università di Brescia. Si è laureato nel 2002 in Ingegneria Ambientale al Politecnico di Milano, e ha ottenuto il dottorato di ricerca in Ingegneria dell'Informazioni all'Università di Brescia nel 2007. Si occupa, come attività di ricerca, di modellistica e simulazione di sistemi non lineari, identificazione di modelli e tecniche di ottimizzazione. Il suo lavoro è principalmente legato ad applicazioni nel campo della qualità dell'aria.
enrico.pisoni@ing.unibs.it

Ringraziamenti

Si ringrazia HPC-EUROPA Transnational Access Programme, finanziato dalla Comunità Europea, nell'ambito del sesto programma quadro di ricerca FP6 "Support to Research Infrastructure action" e il CINECA di Bologna per il supporto scientifico, computazionale e organizzativo.

Bibliografia

- [1] Carnevale C., Pisoni E., Volta M.: Selecting effective ozone exposure control policies solving a two-objective problem. *Ecological Modelling*, Vol. 204, 2007, p. 93-103.
- [2] Batchvarova E., Cai X., Gryning S.E., Steyn D.: Modelling internal boundary layer development in a region with complex coastline. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 90, 1999, p. 1-20.
- [3] Vecchi R., Marazzan G., Valli G., Ceriani M., Antoniazzi C.: The role of atmospheric dispersion in the seasonal variation of PM1 and PM2.5. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, 2004, p. 4437-4446.
- [4] Cotton W.R., Pielke Sr. R.A., Walko R.L., Liston G.E., Tremback C.J., Jiang H., McAnelly R.L., Harrington J.Y., Nicholls M.E., Carrio G.G., McFadden J.P.: RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 82, 2001, p. 5-29.
- [5] Volta M., Finzi G.: GAMES, a comprehensive Gas Aerosol Modelling Evaluation System. *Environ. Model. Software*, Vol. 21, 2006, p. 587-594.
- [6] Kalnay, et al.: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 77, 1996, p. 437-470.