

Utilizzo di misure da satellite a supporto dello studio dell'inquinamento atmosferico

Walter Di Nicolantonio¹, Alessandra Cacciari¹, Andrea Petritoli²,
Claudio Carnevale³, Enrico Pisoni³, Maria Luisa Volta³, Paolo Stocchi⁴, Ezio Bolzacchini⁵,
Luca Ferrero⁵, Cristina Ananasso⁶ e Claudio Tomasi²

¹Carlo Gavazzi Space c/o ISAC-CNR, via Gobetti 101, 40129-I Bologna, wdnicolantonio@cgspace.it

²Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, ISAC-CNR, Bologna

³Dipartimento di Elettronica e Automazione, Università di Brescia

⁴CETEMPS, Dipartimento di Fisica, Università de L'Aquila

⁵Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Milano Bicocca

⁶Agenzia Spaziale Italiana, Roma

RIASSUNTO

Il progetto pilota QUILSAT (2006-2009), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, è finalizzato alla realizzazione di un sistema prototipale avente le funzionalità di Monitoraggio, Previsione e Pianificazione della QA definita sull'area del Nord Italia. Partecipano al programma l'ARPA SIM (Servizio IdroMeteorologico) dell'Emilia Romagna e l'ARPA del Piemonte in qualità di utenti esperti. Si presentano i risultati di Versione 2 del sistema, che hanno permesso di definire (i) le mappe di concentrazione di PM_{2,5} derivate dai dati del sensore satellitare MODIS/Terra e Aqua con l'ausilio delle simulazioni modellistiche da MM5, e (ii) le mappe della concentrazione di NO₂, derivate dai dati del sensore satellitare OMI/Aura in sinergia con le simulazioni modellistiche da GAMES.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, la messa in orbita di sensori satellitari di Osservazione della Terra aventi risoluzioni spaziali e temporali e, insieme, accuratezze radiometriche via via crescenti ha aperto la strada ad un loro utilizzo a supporto dello studio delle tematiche riguardanti la Qualità dell'Aria (QA). La visione sinottica e in particolare il ciclo di ripetizione giornaliero della misura dei nuovi sensori satellitari forniscono la potenzialità di monitorare i cosiddetti fenomeni di inquinamento da trasporto transfrontaliero valutando anche le concentrazioni degli inquinanti in maniera spazialmente più distribuita rispetto a quanto è possibile realizzare con i campionamenti in situ da centralina e in accordo con quanto richiesto dall'ultima direttiva della Comunità Europea (Directive EC, 2008).

E' in tale contesto che si inseriscono i lavori sull'utilizzo del sensore satellitare MODIS, sulle piattaforme polari Terra e Aqua della NASA, riguardanti le correlazioni tra lo spessore ottico di aerosol satellitare, fornito alla risoluzione di 10x10 km² e le polveri sottili (PM) alla superficie (Wang e Christopher, 2003; Engel-Cox et al., 2005; Liu et al., 2005; Di Nicolantonio et al., 2007). Allo stesso tempo, grazie ad esempio al sensore satellitare OMI sulla piattaforma Aura/NASA, è possibile monitorare giornalmente il carico in troposfera di gas in traccia inquinanti, in particolare il biossido di azoto (NO₂), alla risoluzione di 13x24 km² (Boersma et al., 2007; Konovalov et al., 2008).

E' da tenere in considerazione che l'iniziale elaborazione degli spettri di radianza misurati dai sensori satellitari fornisce informazioni legate al carico degli inquinanti nell'intera colonna atmosferica. Di qui la necessità di integrare i dati colonnari satellitari con misure a terra e, insieme, con simulazioni da modelli meteo-chimici per poter dedurre una stima delle concentrazioni di inquinanti alla superficie utilizzando informazioni satellitari.

Su questa integrazione è basato QUILSAT (2006-2009), programma finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, finalizzato alla realizzazione di un sistema prototipale avente le funzionalità di Monitoraggio, Previsione e Pianificazione della QA. Al programma partecipano l'ARPA SIM (Servizio IdroMeteorologico) dell'Emilia Romagna e l'ARPA del Piemonte in qualità di utenti esperti e aventi il compito di fornire i requisiti del sistema e di individuare e valutare possibili applicazioni operative dei prodotti generati dal sistema stesso.

Qui di seguito vengono presentati i risultati delle elaborazioni del sottosistema di Monitoraggio di QUILSAT (versione 2) relativi ai due prodotti finali che in sinergia con dati a terra e simulazioni modellistiche forniscono stime di concentrazioni alla superficie di PM_{2.5} ed NO₂ utilizzando i dati dei sensori MODIS e OMI rispettivamente. Per entrambi i prodotti l'area di studio è il Nord Italia (da 43,15 a 46,65°N, da 6,32 a 14,38°E).

STIMA DI PM ALLA SUPERFICIE BASATA SULL'IMPIEGO DEL SENSORE SATELLITARE MODIS

Le elaborazioni degli spettri di radianza nel range (400-2100) nm acquisiti dai sensori satellitari forniscono una misura dell'abbondanza degli aerosol atmosferici in termini di spessore ottico colonnare di aerosol (AOD, aerosol optical depth) definito come l'integrale su tutta la colonna atmosferica del coefficiente di estinzione dell'aerosol (Kokhanovsky et al., 2007). Tale quantità è una misura dell'accumulo in atmosfera di polveri sottili di natura antropogenica, in particolar modo in assenza di fenomeni di trasporto di aerosol naturale (come ad esempio di sabbie sahariane) (Bäumer et al., 2008).

La relazione tra lo spessore ottico colonnare di aerosol e i PM alla superficie dipende dalla regione, dalla stagione, nonché dal tipo, dalle proprietà microfisiche e dal profilo verticale dell'aerosol. In particolare, l'AOD, essendo una misura dell'estinzione dell'aerosol nel range delle lunghezze d'onda del visibile, è fortemente correlato con concentrazioni di particolato che hanno un diametro compreso tra 0.1 e 2-3 μm .

Inoltre è necessario tenere conto che le concentrazioni di PM misurate in situ sono relative a particolato a bassa umidità relativa (RH): i più comuni campionatori di PM riscaldano il particolato campionato che risulta quindi trovarsi ad una umidità relativa inferiore a quella dello stesso particolato sospeso nell'ambiente. D'altra parte le proprietà ottiche degli aerosol, e quindi l'AOD, dipendono significativamente dall'umidità relativa, in particolare per valori al di sopra del 50-60%.

In questa analisi focalizzata sul Nord Italia e relativa alla versione 2 di QUILSAT viene considerata la dipendenza di AOD e corrispondente PM dal valore di RH alla superficie, assumendo che il profilo di RH sia costante con l'altezza. Viene assunta l'ipotesi di particolato ben rimescolato fino ad altezza di rimescolamento, Hmix. Un'altra assunzione che viene adottata è che il tipo di aerosol, e quindi la composizione chimica e le proprietà microfisiche relative alle ore della giornata di passaggio satellitare non varino significativamente da giorno a giorno in un dato mese, ma varino principalmente da stagione a stagione.

Dietro queste assunzioni, come anche più specificatamente riportato in (Di Nicolantonio et al., 2007), una valutazione delle concentrazioni alla superficie di PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) può essere basata sullo spessore ottico colonnare da satellite, AOD a 550 nm, dovuto alla frazione fine del particolato sospeso, tenendo anche conto di parametri meteorologici come l'altezza di rimescolamento e dell'umidità relativa dello strato più vicino alla superficie, stimabili entrambi da modelli meteo.

Sono stati presi in considerazione i dati satellitari di livello 2 di aerosol da MODIS forniti dalla NASA, collezione 005 sulle piattaforme Terra e Aqua (Levy et al., 2007), relativi a tutto il 2004 e a 3 mesi estivi del 2007 (da maggio a luglio) e 3 invernali del 2008 (da gennaio a marzo). I granuli relativi all'area in studio contengono informazioni alla risoluzione di 10x10 km² sull'AOD a 550 nm e sulla frazione di AOD relativa al *fine mode*.

Inoltre sono stati simulati i campi meteo orari alla risoluzione spaziale di 12x12 km² impiegando il sistema modellistico MM5. Sono state quindi estratte le mappe di Hmix e di RH alla superficie in corrispondenza dei prodotti MODIS di aerosol.

Relativamente all'anno 2004 sono stati considerati i campionamenti gravimetrici di PM_{2.5} (medie giornaliere) di ARPA Piemonte e di diversi siti in Lombardia resi disponibili da Università di Milano Bicocca. Inoltre per i periodi relativi all'estate 2007 e all'inverno 2008 sono stati considerati i campionamenti gravimetrici realizzati dalle ARPA Lombardia ed Emilia Romagna e sui siti urbani di Bologna e Milano, rurali di San Pietro Capofiume (BO) e Oasi Bine (MN), e montani di Monte Cimone e Bormio previsti all'interno del progetto QUILSAT.

Per ogni mese e per ogni sito di campionamento sono stati raggruppati i dati in coincidenza spaziotemporale relativi ai 3 data set (dati satellitari, simulazioni modellistiche e campionamenti gravimetrici).

Questo raggruppamento è servito, quindi, alla determinazione, su base mensile e sui diversi siti, dei coefficienti di conversione da AOD a PM_{2.5} individuati quali parametri di regressione della relazione che lega lo spessore ottico colonnare di aerosol alle concentrazioni di PM_{2.5} alla superficie. Tali coefficienti sono stati quindi spazialmente interpolati sull'intero dominio in modo da ottenere mappe mensili di coefficienti di conversione utilizzati nella determinazione delle mappe giornaliere di PM_{2.5} alla risoluzione di 10x10 km² (Di Nicolantonio et al., 2007).

Queste mappe sono state elaborate per tutto l'intero periodo (2004, estate 2007 e inverno 2008). La Figura 1 mostra un esempio di tale elaborazione, dai dati MODIS/Terra relativamente ad un giorno invernale ed uno estivo, da cui risultano evidenti le elevate concentrazioni di PM_{2.5} d'inverno, ma anche gli sfioramenti di soglia (PM_{2.5} > 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante l'estate su diverse aree della pianura padana.

Data la presenza di nubi in generale le mappe giornaliere dei mesi invernali risultano particolarmente deficitarie di informazioni. Per ogni pixel MODIS si va, in effetti, da una potenziale frequenza di due stime al giorno (da MODIS/Aqua e da MODIS/Terra) a frequenze effettive massime di 25-30 al mese in estate che si riducono anche del 70% d'inverno.

Figura 1- Mappe di PM2.5 derivate dai dati MODIS/Terra relative al 2 Febbraio 2008 e al 17 Luglio 2007.

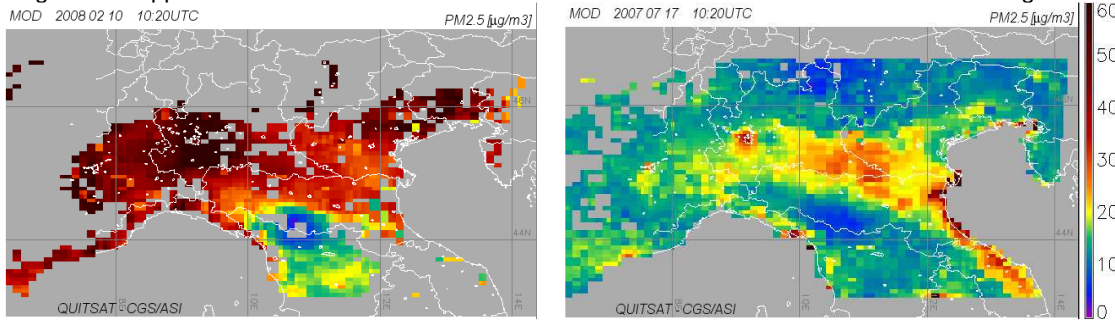


Figura 2 - Mappe di valori medi di PM2.5 derivate dai dati MODIS/Aqua del 2004: (a) media di giugno, (b) media di agosto, (c) media di tutti i martedì estivi, (d) media di tutte le domeniche estive.

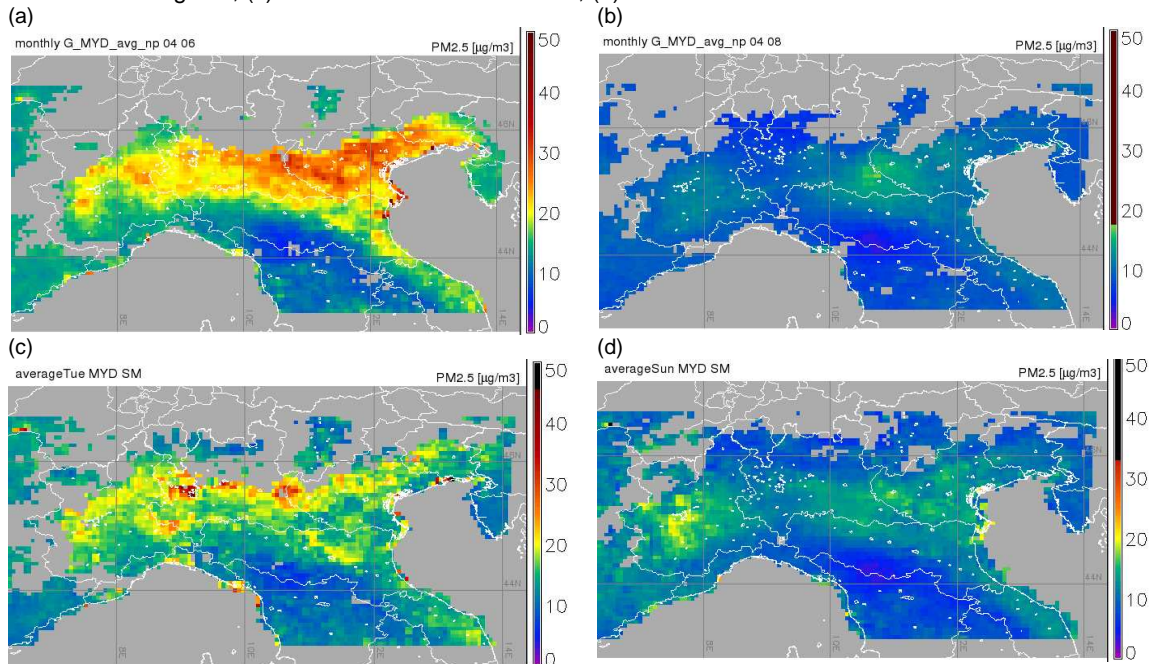
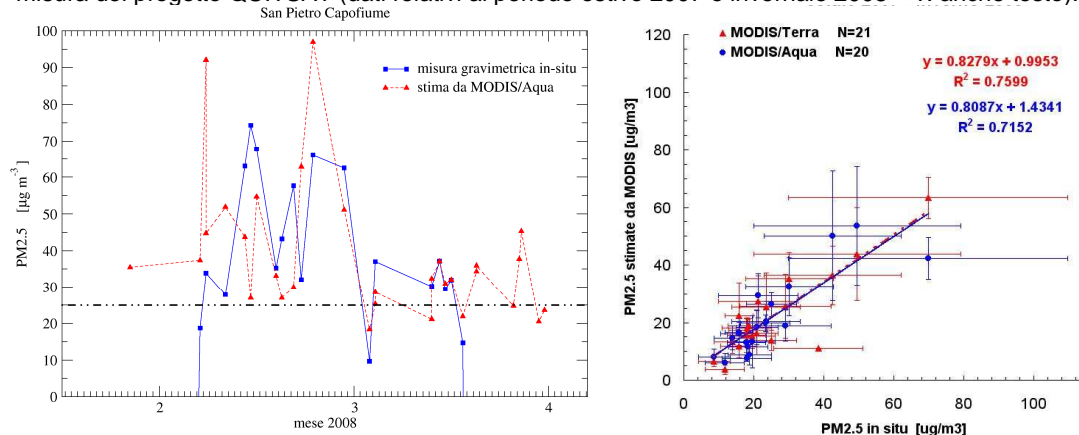


Figura 3 – Confronto tra i valori di PM2.5 stimati da satellite e i corrispondenti campionamenti in situ. A sinistra, un esempio su S. Pietro Capofiume (BO) (febbraio-marzo 2008). A destra, confronto di valori medi mensili sui 6 siti di misura del progetto QUITSAT (dati relativi al periodo estivo 2007 e invernale 2008 – v. anche testo).



I valori delle concentrazioni medie mensili di PM2.5 delle mappe di Figura 2 (a) e (b), da dati MODIS/Aqua relativi a giugno e agosto 2004, sono stati calcolati soltanto su pixel che presentano almeno 10 valori al mese. Si può notare una sensibile riduzione di valori di PM durante il mese di agosto. La Figura 2 (c) e (d), sempre derivata dai dati MODIS/Aqua, rappresenta invece una media sull'intero periodo estivo del 2004 delle concentrazioni relative ad un giorno feriale ed uno festivo che, quindi, risultano più elevate per il

martedì e sensibilmente minori per la domenica. In questa stessa figura valori alti delle concentrazioni relativi a diversi pixel cosiddetti di costa non sono affidabili in quanto lo stesso retrieval di AOD risulta poco accurato perché tipicamente effettuato in presenza di condizioni di riflettanza superficiale particolarmente elevata.

La selezione di un data set di campionamenti, non utilizzati per il calcolo dei coefficienti di conversione ed effettuati durante le campagne di misura di QUITSAT sui 6 siti indicati, ha permesso di operare un confronto tra i valori di PM basati su misure MODIS e valori di PM in situ. Un esempio relativo ai mesi invernali del 2008 su un sito rurale è riportato nell'immagine a sinistra della Figura 3, dove si nota un buono accordo sul numero di sforamenti registrati rispetto alla soglia dei 25 µg/m³. L'immagine a destra della Figura 3 riporta lo scatter plot dei valori medi mensili delle concentrazioni di PM_{2.5} con le relative deviazioni standard derivate dai dati MODIS (Terra e Aqua) sui 6 siti di confronto e relativi al periodo estivo 2007 e invernale 2008. Si nota un buono accordo sui valori delle concentrazioni. Il coefficiente di regressione lineare, R², è maggiore di 0.71 per entrambe le piattaforme. La pendenza della regressione lineare mostra una tendenza a sottostimare i valori delle concentrazioni mediamente del 20% da parte del sensore satellitare.

STIMA DI CONCENTRAZIONI DI GAS AL SUOLO MEDIANTE L'USO COMBINATO DI MISURE SATELLITARI DAL SENSORE OMI E MODELLI CTM

Le misure satellitari di contenuto colonnare troposferico di biossido di azoto sono oramai un prodotto consolidato nell'ambito della comunità scientifica internazionale usate ampiamente per studiare la produzione ed il trasporto anche su scala continentale e planetaria di NO₂ (vedi Konovalov et al., 2008 ad esempio). La loro limitazione principale per quanto riguarda l'utilizzo in campo ambientale è il fatto di essere misure colonnari, quindi integrali, ossia non facilmente attribuibili a concentrazioni a livello del suolo.

Il lavoro che è stato svolto ha avuto come obiettivo una integrazione di tali osservazioni di NO₂ con un modello CTM a scala regionale al fine di migliorare le previsioni modellistiche di concentrazione di NO₂ al suolo.

Sono state utilizzate a tale proposito misure di contenuto colonnare troposferico di NO₂ ottenute con il sensore OMI su AURA (Boersma et al., 2007, dati di livello 2 disponibili su <http://www.temis.nl>) e run modellistici dal modello GAMES (Volta e Finzi, 2006). Il primo ha una risoluzione spaziale dell'ordine di 12x24 km² con un effettivo overpass giornaliero mentre per il secondo sono state utilizzate medie orarie giornaliere su una griglia di 10x10 km². L'area di studio osservata è il nord Italia.

La metodologia di integrazione dati-modello usata (v. Petritoli et al., 2008 per ulteriori dettagli) ha avuto come obiettivo di base la velocità di calcolo, oltre che ovviamente l'efficacia, al fine di poter essere proposta come possibile *tool* per il monitoraggio in tempo quasi reale dell'area in oggetto. A tale scopo l'informazione del satellite non è stata introdotta nel modello con metodi classici di assimilazione che prevedono lunghi tempi di rielaborazione, ma con una correzione immediata del prodotto modellistico (un approccio simile, ma ottenuto in modo indipendente, è stato proposto da Lamsal et al., 2008). La colonna modellistica da 0 km a 4 km circa, C_M, simultanea all'osservazione satellitare, C_S, è regrigliata sulla risoluzione OMI e da entrambe si ottiene una nuova colonna (C_C)

$$C_C = \frac{\left[\left(\frac{C_S^2}{\Delta C_S} + \frac{C_M^2}{\Delta C_M} \right) \right]}{\left[\left(\frac{C_S}{\Delta C_S} + \frac{C_M}{\Delta C_M} \right) \right]} \quad (1)$$

come media pesata sull'errore della misura (ΔC_S) e sulla varianza del modello nell'area osservata dal satellite (ΔC_M). Il profilo medio modellistico è così riscalato alla nuova colonna C_C ed il valore al suolo è il nuovo valore di concentrazione ottenuto (che chiameremo concentrazione QM3).

In Figura 4 è riportato un esempio di QM3 per il 13 marzo 2008. Le regioni A e B in basso a sinistra della figura mostrano due esempi in cui l'integrazione tra modello e satellite altera in modo significativo l'informazione sui valori di NO₂ simulati dal modello. La regione B, in particolare, è per entrambi una regione ad alta presenza di NO₂, ma la correzione della colonna come descritto in precedenza sbilancia i pesi relativi ed il pattern di concentrazione di NO₂ che ne viene fuori è significativamente diverso da quello simulato dal modello. Resta evidente che la comparazione tra le due mappe in alto della Figura 4 deve essere fatta con cautela rappresentando la prima la colonna e la seconda la concentrazione al suolo. La regione B è invece indicativa del fatto che alcuni eventi di trasporto off-shore, non evidenziati in questo caso dal modello, possono essere "recuperati" e tenuti opportunamente in considerazione quando la misura

Figura 4 - In alto a sinistra, contenuto colonnare di NO₂ troposferico da OMI per il 13-03-2008. In alto a destra, concentrazione al suolo di NO₂ da GAMES per il medesimo giorno. In basso a sinistra, il prodotto QM3. In basso a destra, media di QM3 su un periodo di sei mesi a tra Maggio 2007 e Marzo 2008.

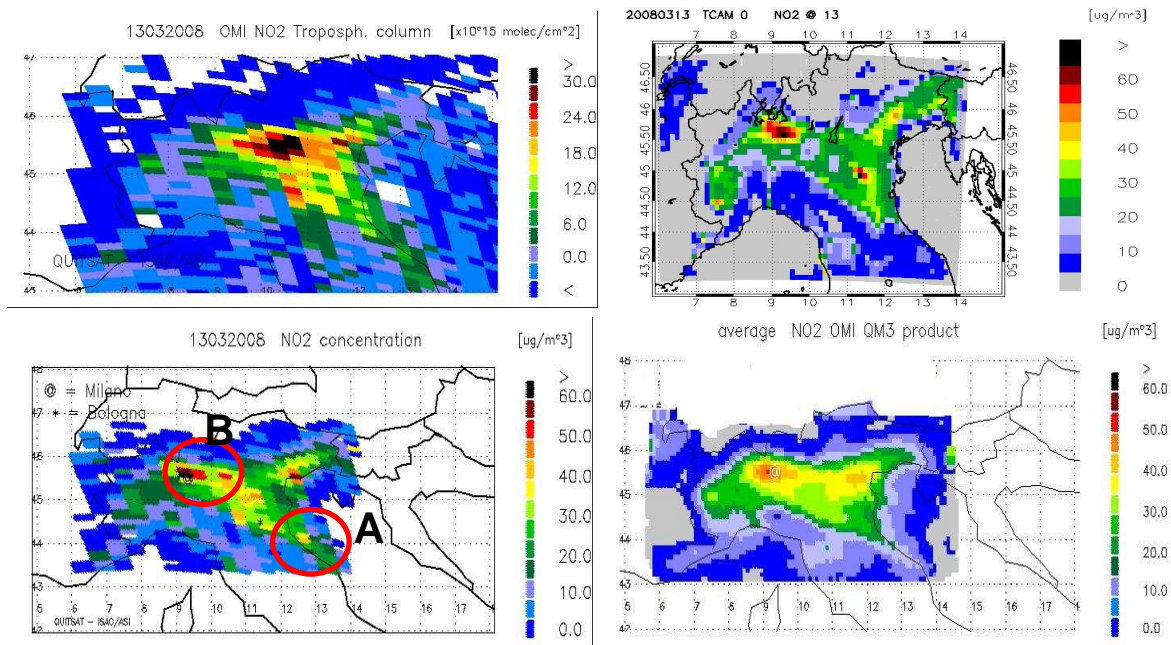
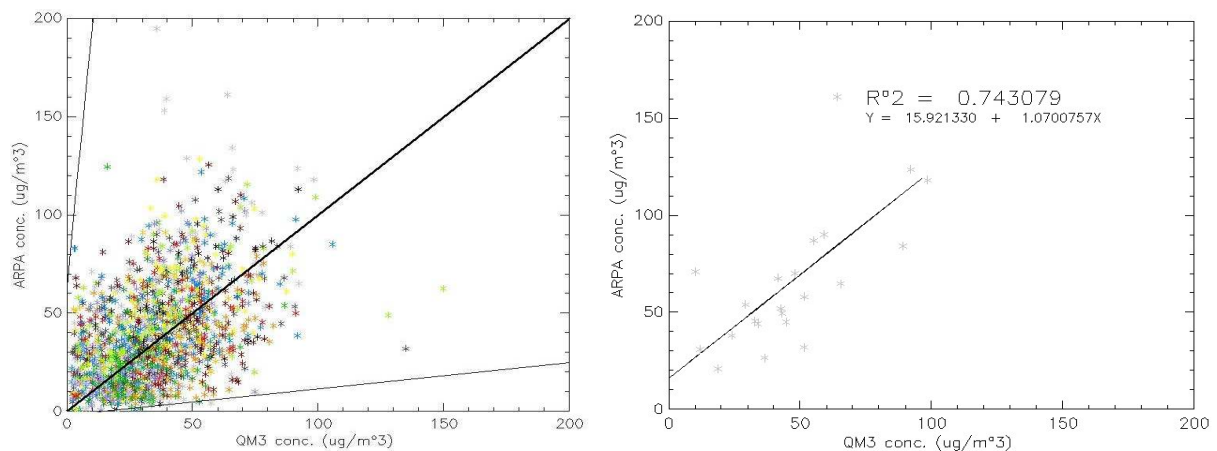


Figura 5 - Confronto tra NO₂ al suolo ottenuto dall'integrazione modello satellite (QM3) e misure ARPA simultanee : a sinistra l'intero data set estate 2007 e inverno 2008, a destra confronto giornaliero relativo al 14 febbraio 2008.



satellitare è usata secondo la metodologia proposta. Qualcosa di simile, seppur meno evidente, è stato osservato per lo stesso giorno nell'area di Bologna.

Le correzioni apportate dal metodo proposto alle simulazioni modellistiche risultano mediamente migliorare le prestazioni modellistiche stesse. Questo è stato verificato confrontando i valori QM3 con delle misure indipendenti al suolo ottenute dalle centraline ARPA. Laddove possibile sono state prese in considerazione solo aree geografiche in cui almeno due centraline fossero disponibili per coprire il corrispettivo pixel a terra di OMI. In questo caso la media dei valori simultanei (in termini di medie orarie) all'overpass del satellite sono stati confrontati con i valori QM3 ottenuti secondo la metodologia sopra descritta. In Figura 5 è riportato in un grafico a dispersione l'esito del confronto sul periodo temporale sopra descritto ed un caso particolare relativo al 14 febbraio 2008.

L'andamento degli accordi può variare giornalmente di molto, ma statisticamente come si deduce dal grafico in Figura 5, la nuvola di dati si adagia sulla bisettrice del primo quadrante. I giorni di ottima correlazione come quello mostrato indicano in questo caso un buon rimescolamento orizzontale che rende effettivamente confrontabili misure puntuali con misure areali su 12 x 24 km². Quando cio' non accade, QM3 fornisce semplicemente un'informazione media sul pixel che puo' essere significativamente diversa dalla media di qualche puntuale non uniformemente distribuito sull'area in oggetto.

CONCLUSIONI

I risultati mostrati sulle mappe di concentrazione di PM_{2,5} derivate dai dati del sensore satellitare MODIS/Terra e Aqua, con l'ausilio delle simulazioni modellistiche da MM5 e i campionamenti gravimetrici a terra, e le mappe di concentrazioni di NO₂, derivate dai dati del sensore satellitare OMI/Aura in sinergia con le simulazioni modellistiche da GAMES, confermano il potenziale uso del telerilevamento satellitare nel monitoraggio della QA. La possibilità di avere un monitoraggio spazialmente distribuito e giornaliero è una peculiare caratteristica della rilevazione satellitare e può essere d'aiuto a rispondere alle richieste della nuova Direttiva EC laddove si parla di limiti sui valori medi annuali e sul numero di sforamenti da rispettare 'ovunque'. I prodotti sono stati generati usando la versione 2 del sistema QUITSAT.

Lo sviluppo della versione 3 dello stesso sistema (estate 2009) vedrà l'ottimizzazione degli algoritmi in termini di accuratezza. In particolare per le mappe di PM_{2.5} verranno usate informazioni derivate dall'analisi dei dati Lidar e da pallone per tenere meglio in considerazione le caratteristiche della struttura verticale degli aerosol in atmosfera. Si terrà anche conto delle informazioni fornite da misure radiometriche *in situ* al fine di tener conto degli effetti dell'umidità relativa dell'aria sull'accrescimento igroscopico del particolato e quindi sull'algoritmo di conversione da AOD a PM_{2.5}. Per le mappe di NO₂ verrà utilizzata strumentazione DOAS a terra per valutare meglio il cosiddetto rimescolamento orizzontale. Infatti il gradiente orizzontale nel pixel osservato da OMI è uno dei principali fattori delle differenze tra il prodotto QM3 e le misure in situ al suolo. Valutare il suo effetto quantitativamente permetterà una prima validazione della deviazione standard da associare alle stime di concentrazioni al suolo.

Si cercheranno di ottimizzare anche i tempi di elaborazione dei due prodotti: un monitoraggio in *near real time* è richiesto infatti dalle applicazioni operative sulla QA.

Bibliografia

- Bäumer, D., Rinke, E., and Vogel B., Weekly periodicities of Aerosol Optical Thickness over Central Europe – evidence of an anthropogenic direct aerosol effect, *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8, 39-90.
- Boersma, K.F., H.J. Eskes, J.P. Veefkind, E.J. Brinksma, R.J. van der A, M. Sneep, G.H.J. van den Oord, P.F. Levelt, P. Stammes, J.F. Gleason and E.J. Bucsela, Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI, *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, 2013-2128, sref:1680-7324/acp/2007-7-2103.
- Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, *Official Journal L152*, 11/06/2008 P. 1-44.
- Di Nicolantonio W., Cacciari A., Bolzacchini F., Ferrero L., Volta L., Pisoni E., Modis aerosol optical properties over North Italy for estimating surface-level PM_{2.5}, *Proc. of the Envisat Symposium 2007*, Montreux, Switzerland, ESA SP-636, July 2007.
- Engel-Cox, J. A., C. H. Holloman, B. W. Coutant, and R. M. Hoff, Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality, *Atmos. Environ.*, 2004, 38, 2495-2509.
- Kokhanovsky, A., F.-M. Breon, A. Cacciari, E. Carboni, D. Diner, W. Di Nicolantonio, R. Grainger, W. Grey, R. Höller, K. Lee, P. North, A. Sayer, G. Thomas, W. von Hoyningen-Huene, Aerosol remote sensing over land: satellite retrievals using different algorithms and instruments, *Atmos. Res.*, 2007, 85, 372-394
- Konovalov I.B., M.Beekmann, J.P.Burrows, and A.Richter, Satellite measurement based estimates of decadal changes in European nitrogen oxides emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8, 2623-2641.
- Lamsal L. N., R. V. Martin, A. van Donkelaar, M. Steinbacher, E. A. Celarier, E. Bucsela, E. J. Dunlea, and J. P. Pinto, Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument, *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, D16308, doi:10.1029/2007JD009235.
- Levy, R.C., Remer, L.A., Mettoo, S., Vermote, E.F., and Kaufman Y.J. Second generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance, *J.Geophys. Res.*, 2007, 112, D13211.
- Liu, Y., Sarnat, J., Kilaru, V., Jacob, D., Koutrakis, P., Estimating ground level PM_{2.5} in the Eastern United States using satellite remote sensing, *Environ. Sci. Technol.*, 2005, 39, 3269-3278.
- Petritoli A., E. Palazzi, G. Giovanelli, W. Di Nicolantonio, G. Ballista, C. Carnevale, E. Pisoni, M. L. Volta, Combined use of space-borne observations of NO₂ and regional CTNM model for air quality monitoring in northern Italy, *Proc. of the International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, in press 2008.
- Volta, M. and Finzi, G., GAMES, a comprehensive Gas Aerosol Modelling Evaluation System, *Environ. Model. Software*, 2006, 21, 587-594.
- Wang, J., and Christopher, S.A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies, *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30, 2095.