



Inserimento di un modulo di trasferimento radiativo nel codice FARM

Autori

D. Meloni, A. Di Sarra, G. Pace, C. Silibello

Riferimento

ARIANET R2009.30

Relazione ARIANET R2009.30

Autori: D. Meloni, A. Di Sarra, G. Pace, C. Silibello

Committente: ENEA-Bologna

INDICE

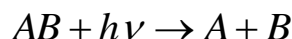
Introduzione.....	3
1 Modulo attualmente implementato per il calcolo dei ratei di fotolisi.....	4
2 Modulo di trasferimento radiativo TUV.....	9
3 Confronto tra i due moduli per la stima dei ratei di fotolisi ed analisi di sensibilità del modulo TUV.	11
4 Conclusioni	17
Bibliografia	18

Introduzione

Nell'ambito della Convenzione ENEA-Ministero dell'Ambiente è previsto l'inserimento di un modulo per il calcolo del trasporto radiativo al fine di meglio stimare i coefficienti di fotodissociazione in atmosfera e, conseguentemente, ottenere mappe di qualità dell'aria sul territorio nazionale maggiormente affidabili. Il modello FARM implementa attualmente un modulo che consente di stimare i coefficienti di fotodissociazione mediante l'utilizzo di tabelle che considerano unicamente la posizione del sole. L'effetto della presenza di nuvole su tali coefficienti viene quindi determinato moltiplicando i valori stimati in condizioni di cielo sereno con opportuni fattori correttivi. Nella realtà i processi fotochimici che avvengono in atmosfera sono influenzati anche da altri fattori quali la struttura e la composizione dell'atmosfera e l'albedo superficiale. Una indagine effettuata considerando i principali modelli di trasporto e chimica ha evidenziato che il modulo TUV (Tropospheric Ultraviolet-Visible Model; Madronich, 1987; Madronich e Flocke, 1999), disponibile presso il sito <http://www.acd.ucar.edu/TUV/>, risulta essere il modello di trasferimento radiativo maggiormente utilizzato per questo scopo. Nel presente rapporto vengono descritte le attività di verifica funzionale dell'inserimento di tale modulo TUV in un box-model; in particolare nei capitoli seguenti vengono illustrati il modulo attualmente implementato in FARM, il modulo TUV e successivamente vengono mostrati i risultati di un confronto tra i risultati forniti da tali moduli. Tale attività inoltre è propedeutica alle campagne sperimentali che verranno effettuate nel periodo maggio-luglio 2010 nella quale saranno misurati i ratei di fotolisi per le principali specie chimiche (in particolare la reazione di fotodissociazione dell'ozono che porta alla formazione di O(1D) e la reazione di fotodissociazione del biossido d'azoto).

1 Modulo attualmente implementato per il calcolo dei ratei di fotolisi.

Le reazioni di fotodissociazione hanno la seguente forma generale:



L'analisi cinetica di tale reazione porta ad introdurre, per ciascuna molecola AB considerata (es. NO₂, O₃, etc.) , un "coefficiente/rateo di velocità" solitamente rappresentato con il termine J [s⁻¹] che viene calcolato mediante l'utilizzo della seguente equazione:

$$J = \int f(\lambda) \sigma_0(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda$$

ove $f(\lambda)$, $\sigma_0(\lambda)$ e $\phi(\lambda)$ rappresentano rispettivamente il flusso attinico (che dipende dalle condizioni ottiche locali) l'assorbimento e il "rendimento quantico" (quantum yield) della molecola d'interesse. Il flusso attinico sulla superficie terrestre è influenzato dalla capacità di assorbimento e di scattering atmosferico, dalla presenza di nuvole, dalla riflessione della superficie delle nuvole e terrestre e dall'angolo di zenith. Le specie che contribuiscono all'assorbimento atmosferico sono costituite dall'ossigeno, dall'ozono e da altri costituenti che in condizioni inquinate possono attenuare ulteriormente tale flusso (NO₂ e SO₂). La presenza di tali specie in atmosfera permette di definire la cosiddetta regione attinica come l'intervallo di lunghezze d'onda dello spettro solare comprese fra ~ 290 nm (valore imposto dai fenomeni di cut-off causati dalle molecole presenti in atmosfera come ozono e ossigeno) e ~ 800 nm (il valore di lunghezza d'onda massimo associato ad un contributo energetico tale da rompere legami chimici). La radiazione UV è la maggiore responsabile della fotochimica atmosferica. Le velocità di alcune delle reazioni più importanti, come la fotolisi dell'ozono e del biossido di azoto, sono direttamente proporzionali al flusso attinico. L'inserimento di un modulo di trasferimento radiativo per il calcolo dei ratei di fotolisi delle diverse specie in un modello di chimica dell'atmosfera determina un significativo incremento del tempo di calcolo. Per tale ragione nel modello FARM i ratei di fotolisi delle diverse specie chimiche vengono calcolati mediante l'utilizzo di "look-up tables" assumendo condizioni di cielo sereno. Tali ratei vengono stimati al livello del suolo e quindi corretti per le quote superiori mediante l'utilizzo di formule empiriche (Peterson, 1976). Nella Figura 1 vengono mostrati i ratei di fotolisi del biossido di azoto ($NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$) e dell'ozono ($O_3 + h\nu \rightarrow O(^1D)$) calcolati al suolo in funzione dell'angolo solare zenitale. Come accennato in precedenza, la presenza di nuvole può modificare significativamente il flusso attinico al di sotto, all'interno ed al di sopra dello strato nuvoloso. Per ciascun livello verticale k il rateo di fotolisi di una generica specie chimica J^k viene quindi corretto, in presenza di nuvole, mediante l'utilizzo della seguente relazione: $J^k = J_{clear}^k \cdot \alpha^k$ ove J_{clear}^k individua il rateo di fotolisi in condizioni di cielo sereno e α^k il fattore di attenuazione/albedo.

Tale fattore viene calcolato come segue:

- al di sopra della "cloud top" (clear sky): $\alpha^k = 1$;
- immediatamente al di sopra della "cloud top": $\alpha^k = 1.3$ (aumento dovuto all'albedo);
- all'interno ed al di sotto della "cloud base": $\alpha^k = 1 - 0.55 TCC^{1.75}$ (riduzione del trasferimento della radiazione attraverso la nuvole / attenuazione dovuta alla presenza della nuvola, Kaiser and Hill, 1976).

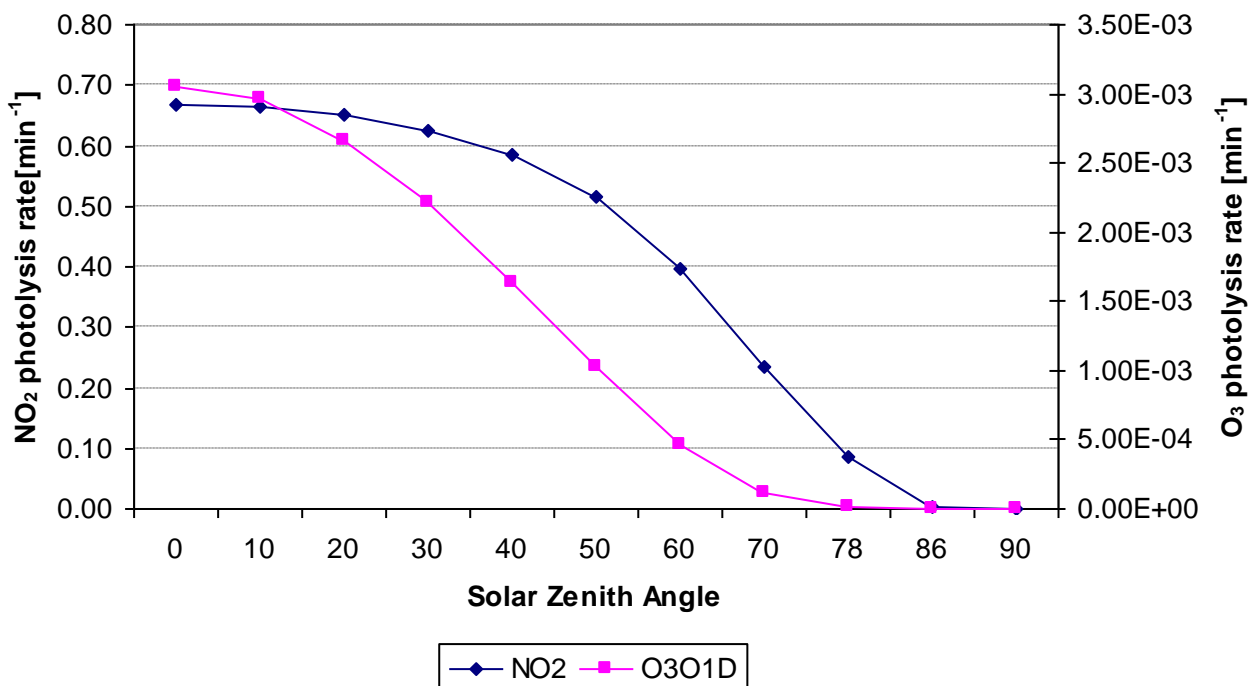


Figura 1 – Ratei di fotolisi del biossido di azoto e dell’ozono in funzione dell’angolo solare zenitale in condizioni di cielo sereno.

Un metodo alternativo al calcolo del fattore di attenuazione/albedo α^k dovuto alla presenza di nuvole è stato proposto da Chang *et al.* (1987) e tiene conto della copertura nuvolosa, delle proprietà ottiche della nuvola (spessore ottico e trasmissività) e dell’angolo solare zenitale. Al di sotto della “cloud base” viene utilizzata la seguente relazione:

$$\alpha^k = 1 + TCC[1.6t_r \cos(\theta) - 1]$$

ove θ è l’angolo solare zenitale e t_r la trasmissività della nuvola calcolata mediante l’utilizzo della seguente relazione:

$$t_r = \frac{5 - e^{-\tau_{cloud}}}{3 + 3\tau_{cloud}(1 - f)}$$

ove τ_{cloud} individua lo spessore ottico della nuvola ed f un fattore assunto pari a 0.86 (“scattering phase function asymmetry factor”). Per il calcolo dello spessore ottico è possibile utilizzare la seguente relazione (Seinfeld e Pandis, 2006):

$$\tau_{cloud} = \frac{3Lh}{2r\rho_w}$$

ove L individua il contenuto d’acqua liquida nella nuvola [g m^{-3}], h lo spessore della nuvola, r il raggio delle goccioline nella nuvola (10^{-5} m) e ρ_w la densità dell’acqua liquida (10^6 g m^{-3}). Per valori di τ_{cloud} inferiori a 5 non viene effettuata alcuna correzione. In CMAQ (Rosselle *et al.*, 1999) viene utilizzata la seguente formula empirica proposta da Stephens (1978) che dipendendo dal prodotto $W=Lh$ [g m^{-3}] “liquid water path” non necessita di alcuna ipotesi circa la distribuzione dimensionale delle goccioline:

$$\log(\tau_{cloud}) = 0.2633 + 1.7095 \ln[\log(W)]$$

Nella figura seguente viene mostrato il confronto tra i valori dello spessore ottico τ_{cloud} calcolati utilizzando le due relazioni appena descritte. Tali valori sono stati calcolati in funzione del contenuto d'acqua liquida considerando una nuvola avente uno spessore pari a 1000 m.

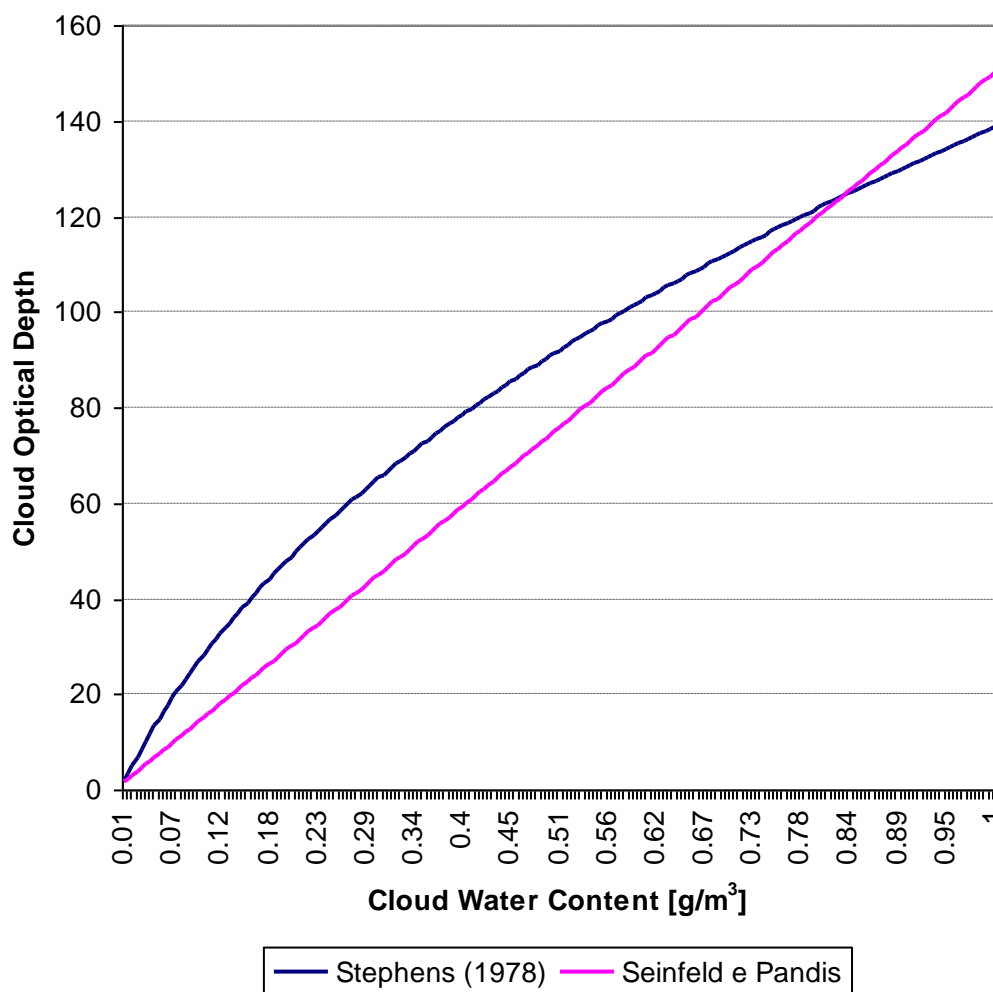


Figura 2 – Confronto tra i valori di spessore ottico τ_{cloud} calcolati utilizzando le relazioni proposte in Stephens (1978) e in Seinfeld e Pandis (2006) diverse condizioni di copertura nuvolosa.

Nella figura seguente (Figura 3) viene mostrato il confronto tra i fattori di attenuazione α al di sotto della nuvola calcolati mediante le relazioni proposte in Kaiser and Hill (1976) e Chang *et al.* (1987), in funzione del contenuto d'acqua liquida e dell'angolo solare zenitale, considerando una nuvola avente uno spessore pari a 1000 m ed una copertura nuvolosa pari a 1. Osserviamo che la relazione proposta in Kaiser and Hill (1976) dipende dalla sola copertura nuvolosa mentre la relazione suggerita da Chang *et al.* presenta un più complesso andamento in funzione sia del contenuto d'acqua liquida sia dell'angolo solare zenitale. L'analisi di tale figura evidenzia che l'utilizzo della relazione suggerita da Chang *et al.* determina, in generale, una maggiore attenuazione della radiazione rispetto alla formula attualmente implementata in FARM.

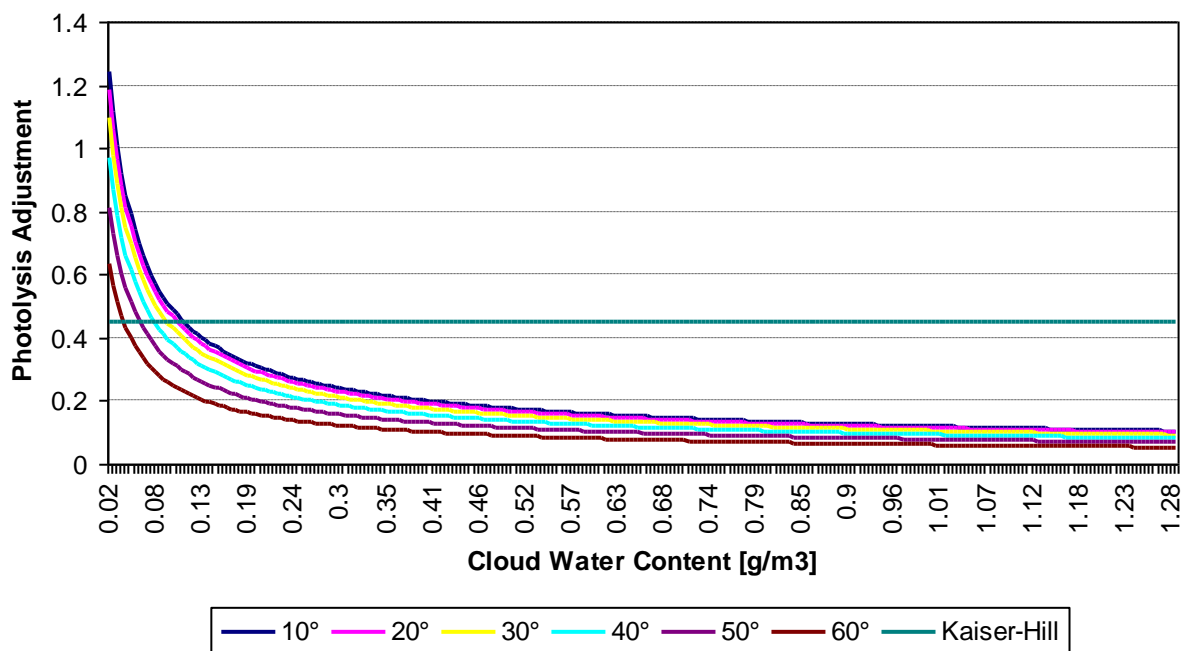


Figura 3 – Confronto tra i valori di α al di sotto della nuvola calcolati mediante le relazioni proposte in Kaiser and Hill (1976) e Chang *et al.* (1987), in funzione del contenuto d'acqua liquida e dell'angolo solare zenitale.

Al di sopra della nuvola viene utilizzata la seguente relazione (Chang *et al.* 1987):

$$\alpha^k = 1 + TCC\gamma_i(1 - t_r) \cos(\theta)$$

ove γ_i rappresenta un fattore che varia tra 0.7 e 1.3 per ciascuna specie chimica *i*-esima coinvolta nei processi fotochimici. Nella figura seguente viene mostrato il confronto tra il fattore di albedo α al di sopra della nuvola calcolati mediante la relazione proposta in Chang *et al.* (1987) ed il valore costante utilizzato in FARM, in funzione del contenuto d'acqua liquida e dell'angolo solare zenitale. Nel calcolo è stata considerata una nuvola avente le caratteristiche precedentemente descritte e per γ_i un valore pari a 1.

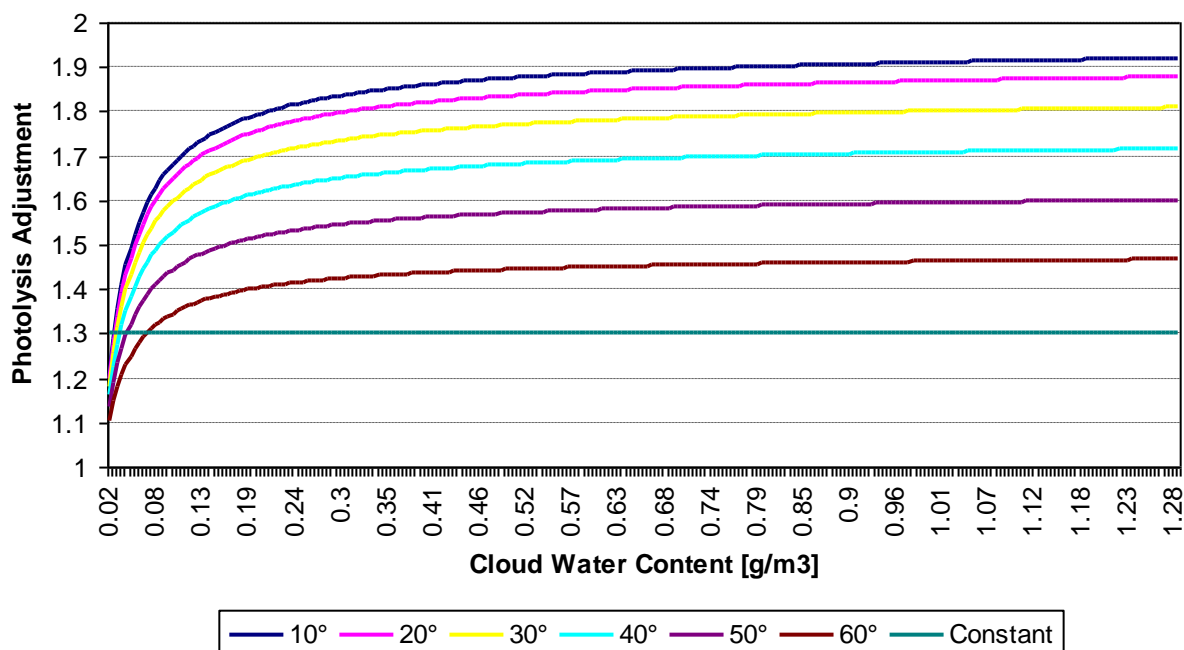


Figura 4 – Confronto tra i valori di α al di sopra della nuvola calcolati mediante la relazione proposta in Chang *et al.* (1987) in funzione del contenuto d'acqua liquida e dell'angolo solare zenitale.

Osserviamo che la relazione suggerita da Chang *et al.* presenta valori di albedo generalmente superiori a quelli attualmente considerati in FARM e che tali valori sono estesi a tutti i livelli verticali al di sopra del top della nuvola e non solo al livello immediatamente superiore.

Di seguito vengono mostrati i ratei di fotolisi del biossido di azoto ($NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$) e dell'ozono ($O_3 + h\nu \rightarrow O(^1D)$) stimati al suolo in funzione dell'angolo solare zenitale in condizioni di cielo sereno ed in diverse condizioni di copertura nuvolosa utilizzando le precedenti relazioni per l'attenuazione al di sotto della "cloud base".

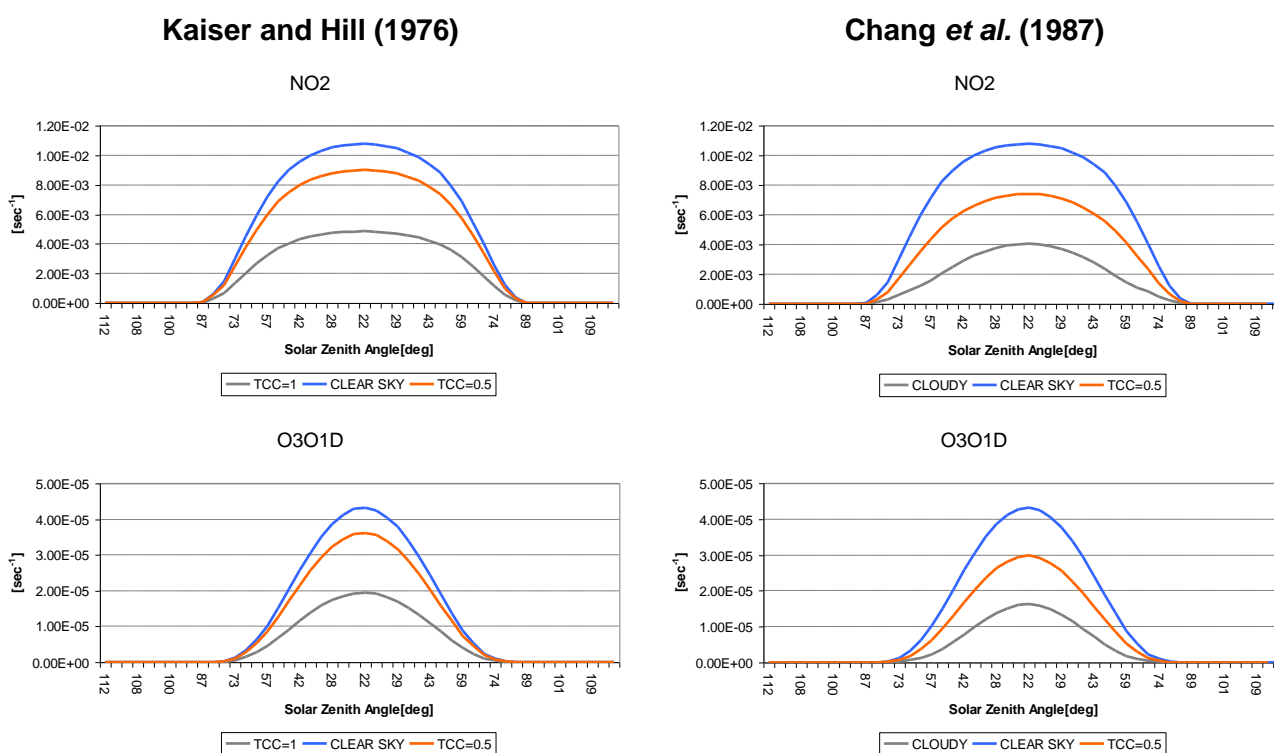


Figura 5 – Ratei di fotolisi del biossido di azoto e dell'ozono in funzione dell'angolo solare zenitale ed in diverse condizioni di copertura nuvolosa.

L'esame di tali figure conferma quanto precedentemente riportato circa una maggiore stima dell'attenuazione della radiazione mediante l'utilizzo della relazione suggerita da Chang *et al.* che determina ratei di fotodissociazione inferiori rispetto a quelli attualmente calcolati in FARM.

2 Modulo di trasferimento radiativo TUV.

Il modulo di trasferimento radiativo TUV (Tropospheric Ultraviolet-Visible Model; Madronich, 1987) viene utilizzato nello spettro di lunghezze d'onda compreso tra 121 e 750 nm per calcolare l'irradianza spettrale, il flusso attinico spettrale, i coefficienti di fotodissociazione (J) e l'irradianza biologicamente efficace. Il codice, scaricabile dal sito web www.acd.ucar.edu/TUV, è scritto in FORTRAN 77 è ben documentato e si presta pertanto ad essere utilizzato all'interno di modelli di trasporto e chimica dell'atmosfera. Tale modulo presenta, tra le altre, le seguenti caratteristiche:

- possibilità di utilizzare diverse "griglie" di lunghezze d'onda e di livelli verticali;
- dipendenza dei coefficienti di fotodissociazione dalla temperatura e dalla pressione;
- assorbimento dovuto alla presenza di ossigeno, ozono, biossido di azoto e zolfo;
- scattering dovuto all'aria, alle nuvole ed all'aerosol;
- utilizzo di differenti schemi di trasferimento radiativo.

L'inserimento del modulo TUV nel codice FARM è stato effettuato seguendo un approccio analogo a quanto effettuato con il modello STEM (Tang *et al.*, 2003), dal quale deriva FARM, ove i parametri utilizzati da tale modulo, ovvero le caratteristiche delle nuvole, i profili verticali di aerosol, O₃, SO₂ e NO₂ ed i parametri meteorologici vengono forniti direttamente dal modello di trasporto e chimica. In tal modo viene tenuto conto della mutua interazione tra la radiazione e la composizione chimica e la struttura dell'atmosfera così come viene "vista" dal modello. Di seguito vengono presentati i risultati del confronto tra il modulo TUV, l'algoritmo precedentemente implementato in FARM (Kaiser e Hill, 1976) e l'algoritmo proposto in Chang *et al.* (1987). Tale confronto è stato effettuato mediante l'utilizzo di un box-model che include il meccanismo chimico SAPRC99 (Carter, 2000) ed il modulo di aerosol aero3 (Binkowski, 1999; Binkowski e Shankar, 1995) Binbi. L'integrazione numerica delle equazioni chimiche viene effettuata mediante l'interfaccia KPP (Kinetic PreProcessor; Damian *et al.*, 2002; Daeuscu *et al.* 2003; Sandu *et al.* 2003, 2006) associata al solver LSODE (Radhakrishnan e Hindmarsh, 1993). Nelle simulazioni che seguono il modulo di aerosol non è stato attivato.

Al fine di verificare la corretta implementazione del meccanismo chimico gassoso è stato considerato uno scenario noto in letteratura con il nome LAND (Poppe *et al.*, 1996; Kuhn *et al.*, 1998) ove si considera box posto ad una latitudine di 45°N e ad una longitudine 0°W, alle seguenti condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa: 288.15 [K], 101325. [Pa], 50. [%] ed in assenza di nuvole. In tale scenario la miscela iniziale ("clean air condition") è così costituita (le concentrazioni sono espresse in ppm):

O3	0.030
NO	0.0001
NO2	0.0001
HNO3	0.0001
CO	0.100
H2O2	0.002
HCHO	0.001
AIR	1.0000E+06
O2	2.0900E+05
H2O	1.0000E+04
H2	5.0000E-01
CH4	1.7000E+00

Nella figura seguente vengono mostrati gli andamenti orari delle concentrazioni relative ad alcune specie chimiche calcolate dal box-model che evidenziano un ottimo accordo con i valori riportati nell'articolo suddetto.

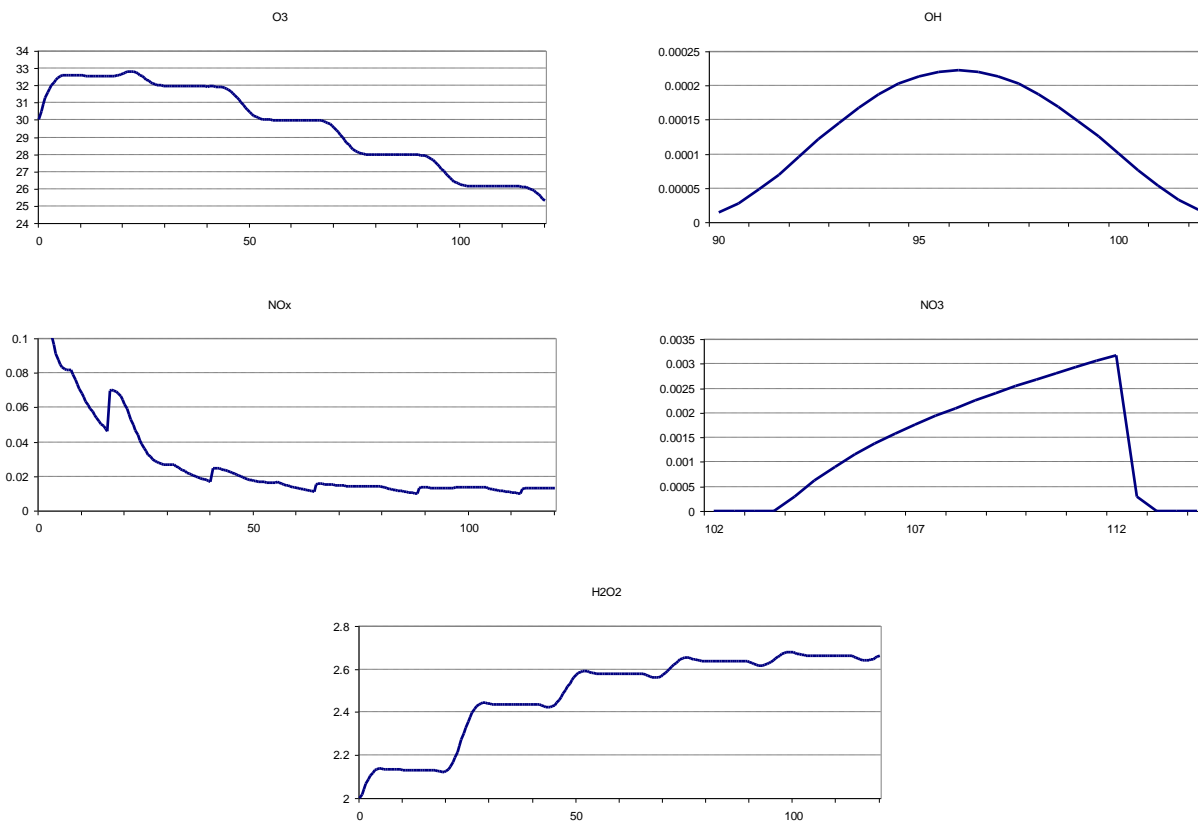


Figura 6 – Concentrazioni [ppb] calcolate con il box-model relative allo scenario LAND a diverse ore.

3 Confronto tra i due moduli per la stima dei ratei di fotolisi ed analisi di sensibilità del modulo TUV.

Il confronto tra il modulo TUV e gli algoritmi precedentemente descritti per il calcolo dei ratei di fotolisi è stato effettuato utilizzando un box-model che costituisce di fatto il *core* chimico del modello FARM. Il primo set di simulazioni è stato effettuato considerando un box posto ad una latitudine di 45°N e ad una longitudine 9°W (time zone +1), alle seguenti condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa: 298.15 [K], 101325. [Pa], 50. [%]. L'albedo superficiale è stato posto a 0.1 mentre è stato considerato un profilo di ozono climatologico (US Standard Atmosphere: 1976 – media annuale -, 45°N, ozono totale pari a 349.82 DU). Le simulazioni hanno una durata di un giorno (21 giugno 1983) e vengono considerate le seguenti due condizioni: cielo sereno e presenza di uno strato di nuvole con le seguenti caratteristiche: copertura nuvolosa, altezza della base, altezza del top e contenuto di acqua liquidi rispettivamente pari a 1., 1000. m 1500. m e 0.5 [g/m³]. Di seguito vengono mostrati i ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono nelle due condizioni e, per quanto riguarda il modulo TUV considerando 140 lunghezze d'onda (approccio analogo a quello utilizzato nel modello *STEM*) e 17 lunghezze d'onda (FTUV=Fast TUV, implementato nel modello MOZART-2 - Model for OZone And Related chemical Tracers).

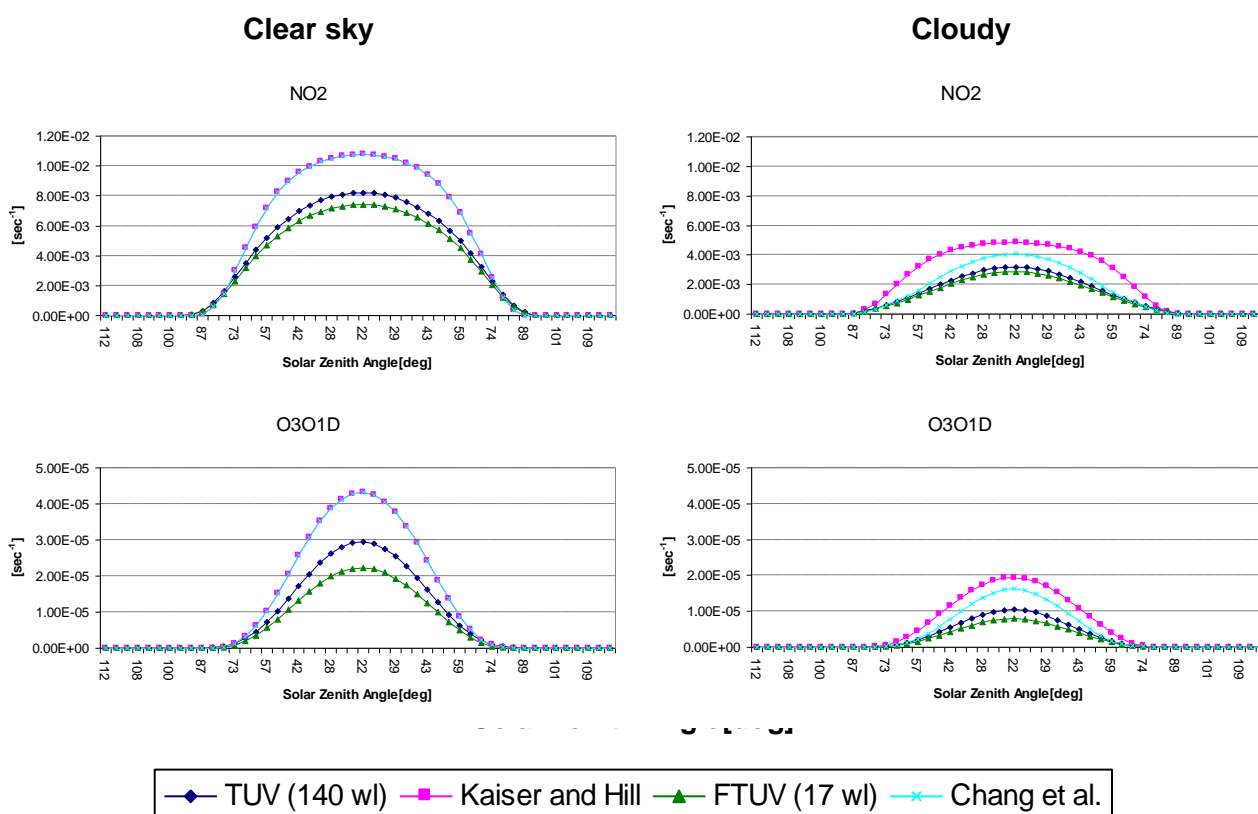
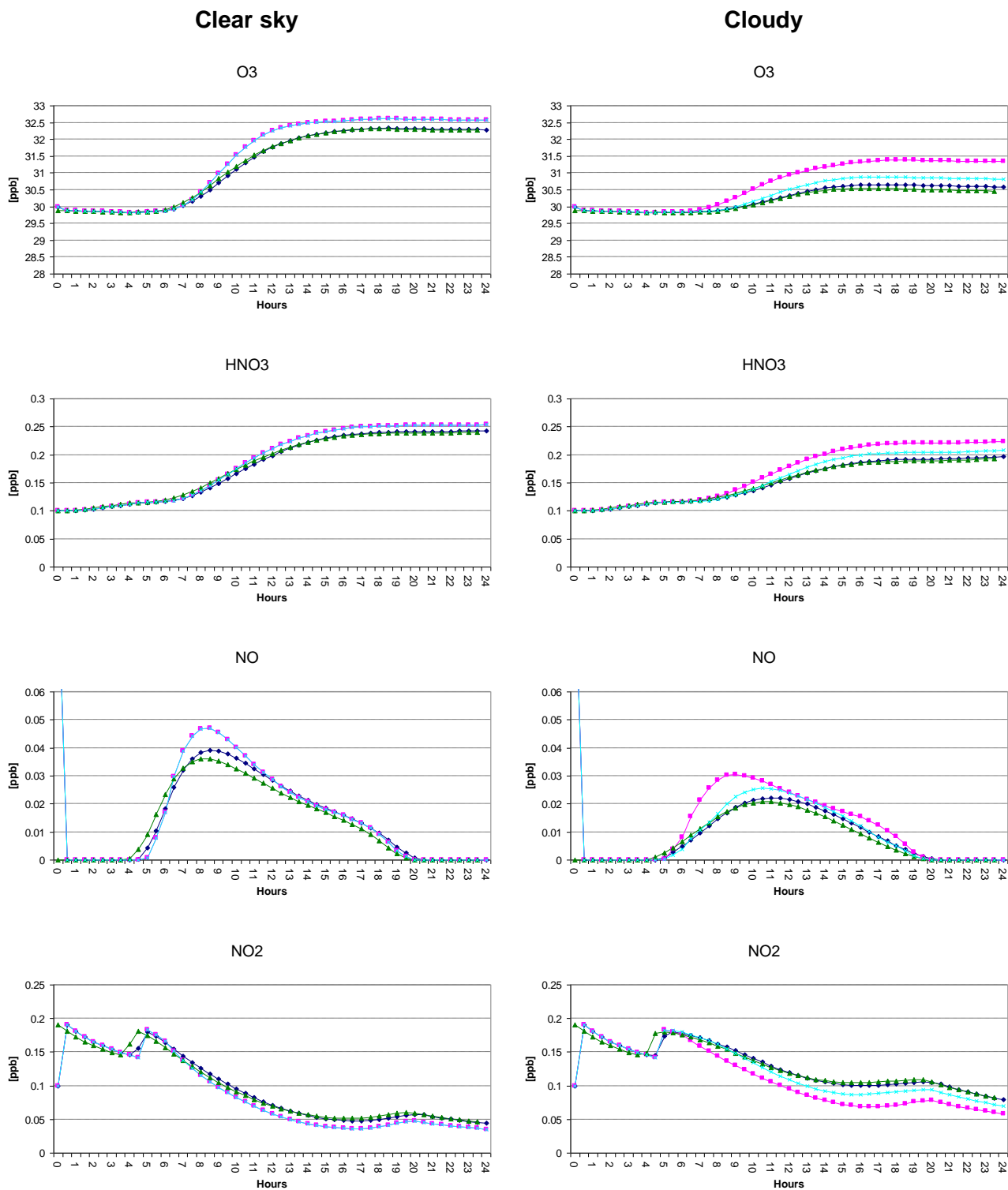
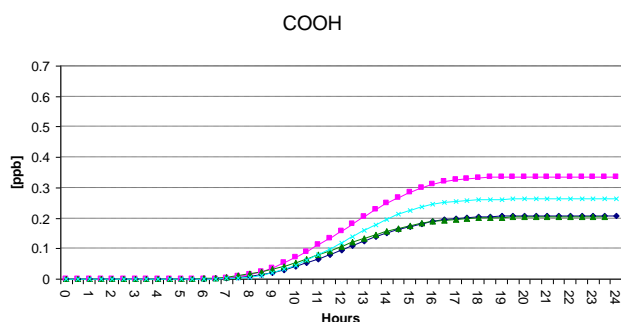
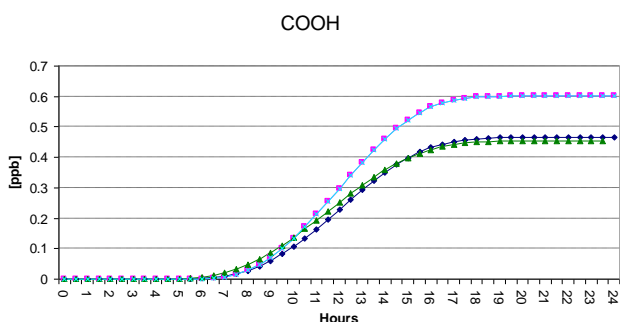
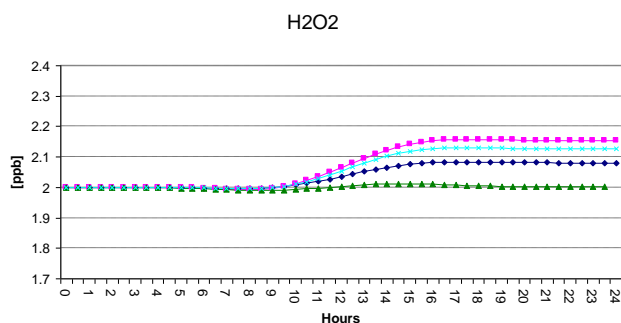
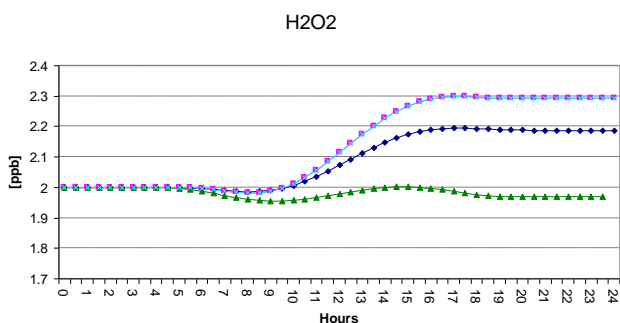
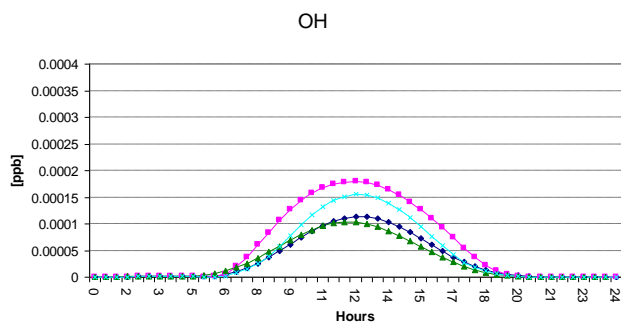
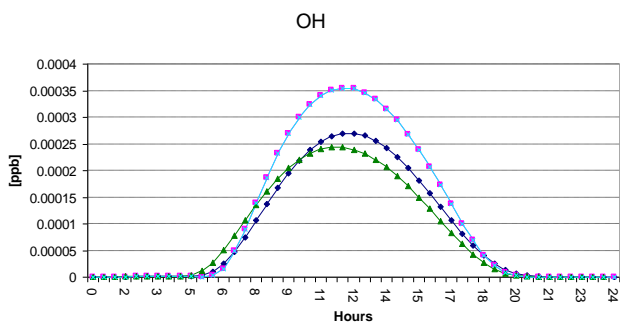
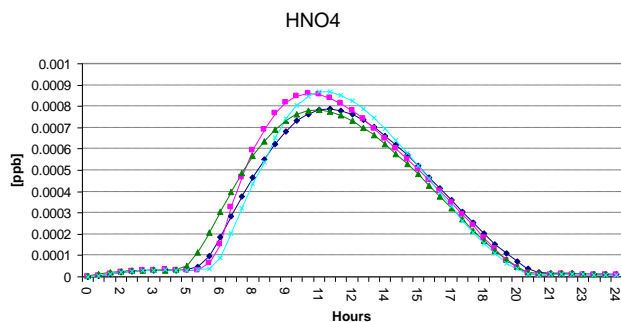
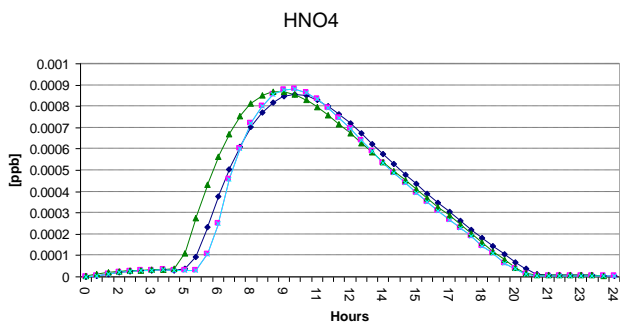
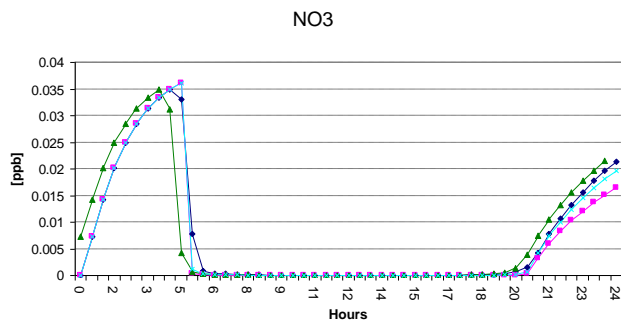
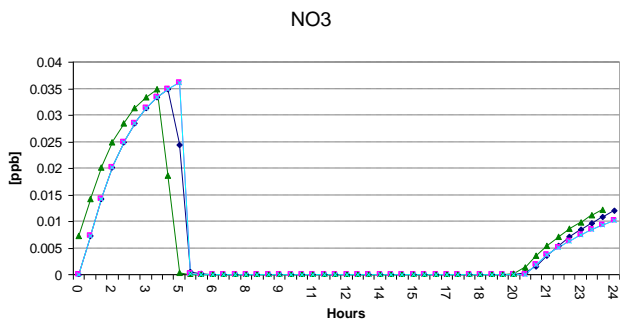


Figura 7 – Ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono in condizioni di cielo sereno ed in presenza di nuvole.

Dall'esame di tale figura risultano differenze significative per i ratei di fotolisi calcolati nelle due condizioni (cielo sereno e presenza di nuvole) considerando i due approcci: "look-up tables" (Kaiser and Hill e Chang et al.) e TUV (140 e 17 wl). Tali differenze risultano invece piuttosto contenute considerando, con il modulo TUV, le due griglie di lunghezze d'onda. Volendo estendere tale analisi alle concentrazioni calcolate nelle figure seguenti vengono mostrati analoghi confronti

in termini di concentrazioni calcolate mediante il box-model considerando la miscela iniziale relativa al precedente scenario (LAND). Le simulazioni sono state condotte considerando condizioni di cielo sereno e nuvole aventi le caratteristiche precedentemente descritte. La scelta di porre ad 1 la copertura nuvolosa deriva dal fatto che il modulo TUV assume implicitamente tale condizione.





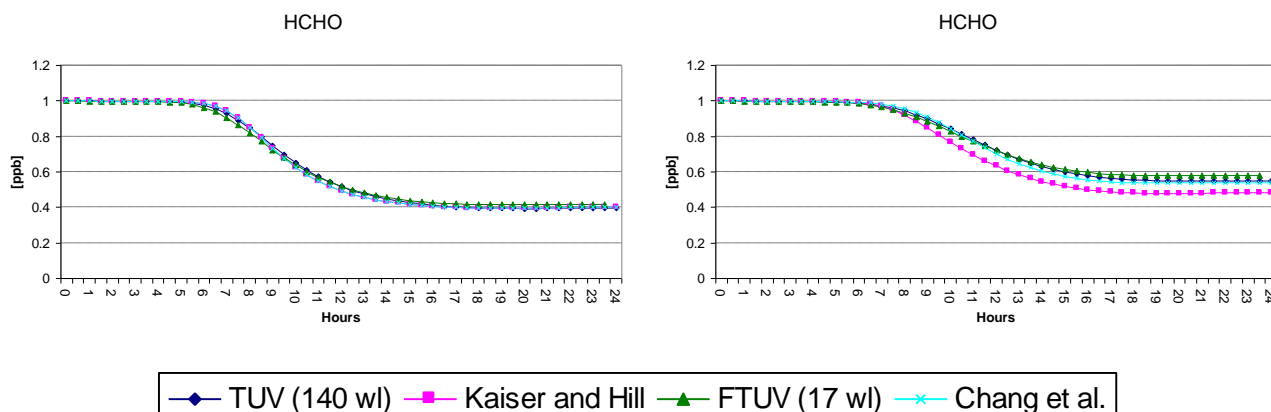


Figura 8 – Concentrazioni calcolate mediante il box-model in condizioni di cielo sereno ed in presenza di nuvole.

Dall'esame della Figura 8 risulta evidente l'effetto dei differenti approcci al calcolo dei ratei di fotolisi sulle concentrazioni calcolate. Come evidenziato da tale figura il modulo TUV stima una maggiore attenuazione della radiazione ad opera delle nuvole rispetto alla implementazione effettuata in FARM e conseguentemente una significativa riduzione dei processi fotochimici che determina una più ridotta capacità ossidativa dell'atmosfera confermata dall'aumento di NO_2 (minore J_{NO_2}), dalla conseguente diminuzione di O_3 (il biossido di azoto è la sorgente di O_3 troposferico) e dalla diminuzione di radicali OH prodotti a loro volta dalla fotodissociazione dell'ozono. Dall'esame di tale figura risulta inoltre che le relazioni proposte da Chang et al. (1987) presentano un migliore accordo con le stime fornite dal più accurato modello radiativo TUV rispetto alle formule attualmente implementate in FARM.

Come accennato in precedenza precedentemente il modulo TUV assume implicitamente la condizione di completa copertura nuvolosa ($\text{TCC}=1$). Per tener conto della variazione di tale parametro è prassi comune nei modelli di chimica dell'atmosfera (si veda ad esempio CAMx e CMAQ) utilizzare tale modulo considerando condizioni di cielo sereno e correggere successivamente i ratei di fotolisi così ottenuti mediante l'utilizzo delle relazioni proposte da Chang et al. (1987). Al fine di verificare tale approccio sono stati quindi confrontati i valori dei ratei di fotolisi precedentemente calcolati dal modello TUV (140 wl) in presenza di nuvole con quelli ottenuti mediante tale approccio. I risultati mostrati nella figura seguente evidenziano la correttezza e l'accuratezza di tale metodo.

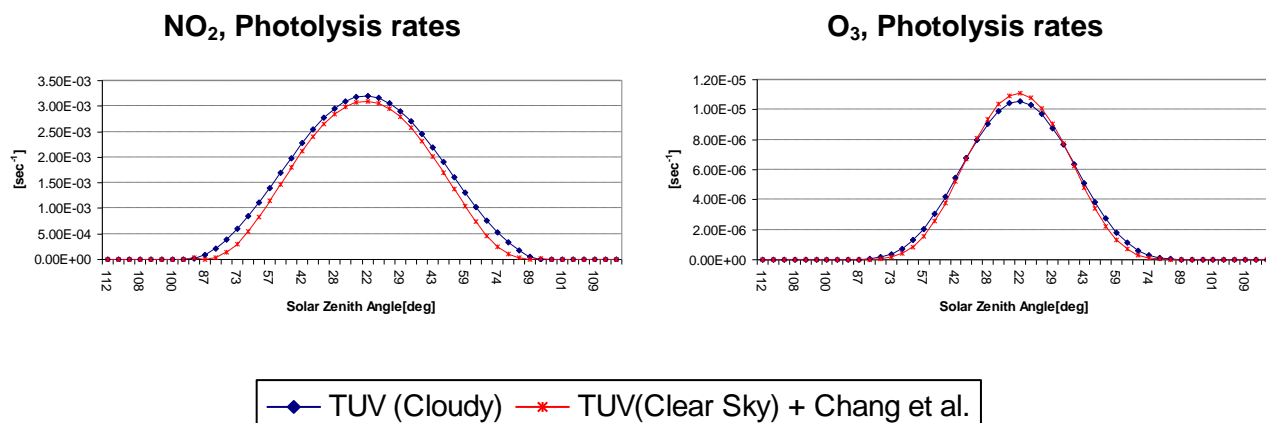


Figura 9 – Ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono in condizioni di completa copertura nuvolosa ($\text{TCC}=1$) calcolati dal modello TUV (140 wl) e ottenuti correggendo i valori stimati in condizioni di cielo sereno con le formule proposte da Chang et al. (1987).

Nelle figure seguenti vengono mostrati ulteriori test di sensibilità effettuati considerando le condizioni di cielo sereno precedentemente descritte e facendo variare l'albedo superficiale e il contenuto di ozono colonnare. Dall'esame di tali figure risulta significativo l'effetto dell'albedo superficiale sui ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono (Figura 10), mentre per quanto riguarda l'ozono colonnare (Figura 11) tale effetto risulta significativo per la fotodissociazione dell'ozono (non viene riportato il confronto relativamente al biossido di azoto per il quale le variazioni di ozono colonnare non hanno effetti sui ratei di fotolisi).

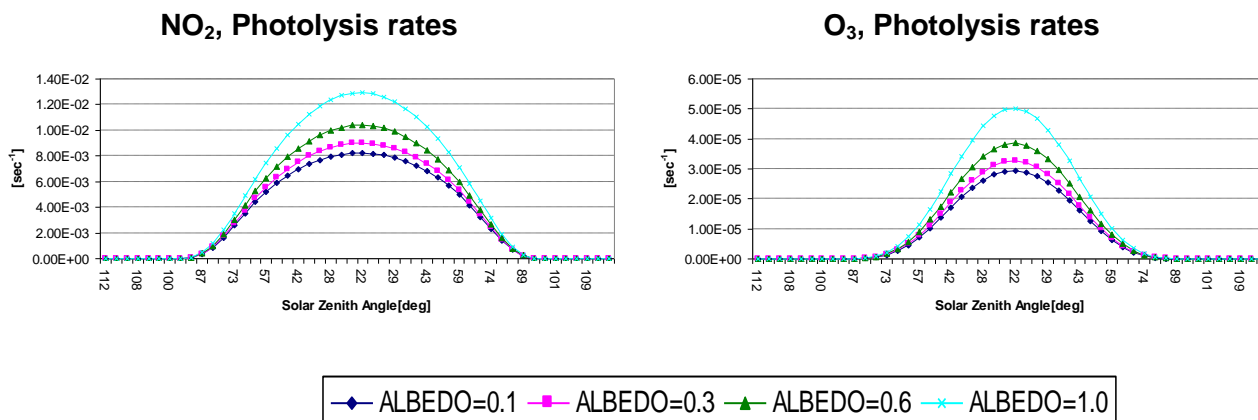


Figura 10 – Ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono in condizioni di cielo sereno al variare dell'albedo superficiale.

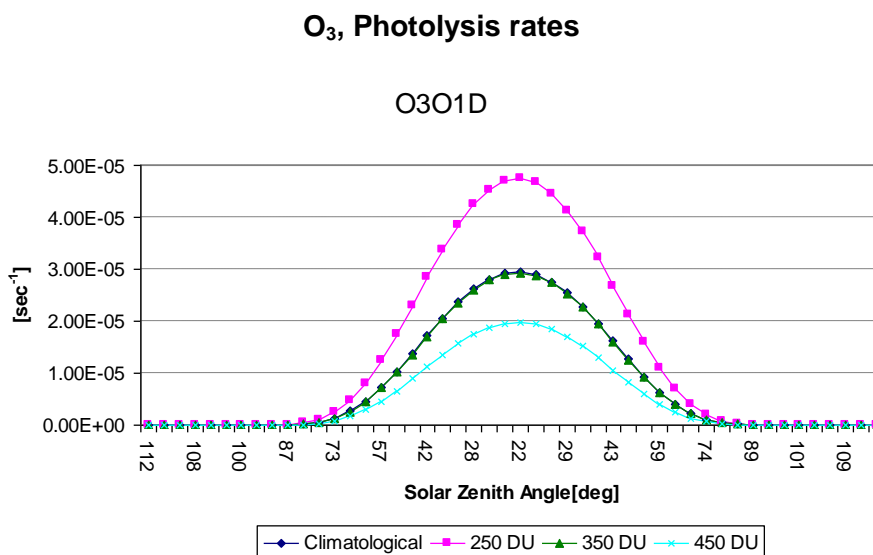


Figura 11 – Ratei di fotolisi del biossido d'azoto e dell'ozono in condizioni di cielo sereno al variare dell'ozono colonnare.

Nella figura seguente viene mostrato infine il confronto tra i tempi necessari alla esecuzione del box-model nelle diverse configurazioni che conferma quanto atteso, ovvero che l'inserimento del modulo TUV determina un significativo aumento del tempo di calcolo rispetto all'approccio

precedentemente implementato in FARM. Tale incremento può tuttavia essere significativamente ridotto diminuendo il numero di lunghezze d'onda utilizzate dal modello radiativi (FTUV).

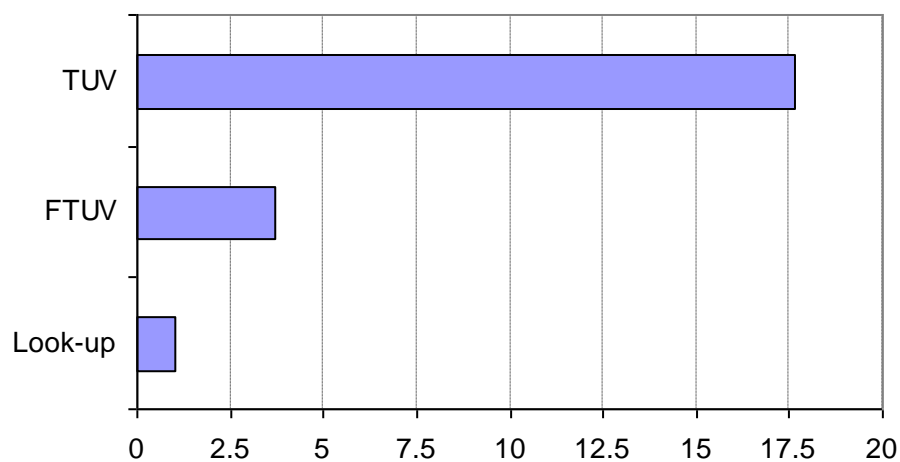


Figura 12 – Tempo di calcolo normalizzato per l'effettuazione delle simulazioni: TUV=140wl; FTUV=17 wl e "Look-up" = approccio attualmente implementato in FARM. Il tempo di calcolo è normalizzato rispetto all'approccio "Look-up".

4 Conclusioni

I risultati ottenuti evidenziano la rilevanza di una corretta modellazione dei processi radiativi e l'opportunità di includere nel modello FARM un adeguato modello di trasferimento radiativo. Il modulo TUV utilizzato in questo studio necessita tuttavia di un significativo tempo di calcolo che può essere ridotto diminuendo il numero di lunghezze d'onda. Dall'esame delle simulazioni effettuate si può ritenere che per simulazioni tridimensionali complesse il modulo TUV con la griglia di lunghezze d'onda FTUV possa rappresentare un ragionevole compromesso tra il tempo di calcolo e la necessaria accuratezza della stima dei ratei di fotolisi. Per ridurre ulteriormente l'onere di tale calcolo nelle simulazioni tridimensionali è comunque possibile ragionevole utilizzare tale modulo un numero limitato di volte all'interno di un'ora invece che ad ogni passo temporale. Il modulo TUV assume implicitamente la condizione di completa copertura nuvolosa, per tener conto della variazione di tale parametro è prassi comune nei modelli di chimica dell'atmosfera utilizzare tale modulo considerando condizioni di cielo sereno e correggere successivamente i ratei di fotolisi così ottenuti mediante l'utilizzo delle relazioni proposte da Chang *et al.* (1987). Il confronto tra i ratei di fotolisi calcolati dal modello TUV in presenza di nuvole con quelli ottenuti mediante tale approccio ha evidenziato la correttezza e l'accuratezza di tale approccio che sarà quindi preso in considerazione per un suo eventuale utilizzo nel modello FARM. L'utilizzo di tali relazioni, in luogo di quelle attualmente utilizzate in FARM per tener conto degli effetti di attenuazione/aumento della radiazione in presenza di nuvole, consentirebbe inoltre di ottenere stime dei ratei di fotolisi più accurate e non molto differenti da quelle fornite dal modello radiativo TUV. Le simulazioni hanno evidenziato inoltre l'importanza di una corretta stima dell'albedo superficiale e dell'ozono colonnare ai fini di una migliore stima dei ratei di fotolisi. A questo proposito è qui opportuno evidenziare che il processore SURFPro è in grado di fornire i campi di albedo superficiale e che Arianet ha recentemente messo a punto un processore che provvede all'estrazione dei campi giornalieri di ozono colonnare a scala globale prodotti da sensori *OMI* su aree selezionate dall'utente, alla scrittura di tali campi in formato NetCDF ed all'eventuale interpolazione dei dati mancanti utilizzando diversi criteri (valore medio, Cressmann, Optimal Interpolation).

Bibliografia

- Binkowski F. S. (1999) The aerosol portion of Models-3 CMAQ. In Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Part II: Chapters 9-18. D.W. Byun, and J.K.S. Ching (Eds.). EPA-600/R-99/030, National Exposure Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 10-1-10-16.
- Binkowski, F.S. and U. Shankar (1995) The regional particulate matter model, 1. mode description and preliminary results. *J. Geophys. Res.*, **100**, 26191-26209.
- Carmichael, G. R., Uno I., Phadnis M. J., Zhang Y., Sunwoo, Y. (1998) Tropospheric ozone production and transport in the springtime in east Asia, *J. Geophysical Research*, **103**, 10649-10671.
- Carter, W.P.L. Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment. Final Report to California Air Resources Board, Contract 92-329 and 95-308, SAPRC, University of California, Riverside, CA, 2000.
- Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell, and C.J. Walcek, 1987: A three-dimensional eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation. *J. Geophys. Res.* **92** (D12), 14681-14700.
- Daescu, D., Sandu, A., Carmichael, G. R. Direct and adjoint sensitivity analysis of chemical kinetic systems with KPP: II – validation and numerical experiments. *Atmospheric Environment*, **37**, 5097–5114, 2003.
- Damian, V. , Sandu, A., Damian, M., Potra, F., Carmichael, G. R.. The kinetic preprocessor KPP – a software environment for solving chemical kinetics. *Computers and Chemical Engineering*, **26**, 1567–1579, 2002.
- Kaiser J.A.C. and Hill R.H. Irradiance at sea. *J. Geophysical Research*, **81**, 395, 1976.
- Kuhn, M. , Builtjes, P.J.H., Poppe, Simpson, D., Stockwell, W.R., Andersson-Skold, Y. Baart, A. Das, M., Fiedler, F. , Hov, O., Kirchner, F., Makar, P. A., Milford, J. B., Roemer, M.G.M., Ruhnke, R., Strand, A., Vogel B., Vogel H. (1998) Intercomparison Of The Gas-Phase Chemistry In Several Chemistry And Transport Models *Atmospheric Environment*, **32**, 693–709.
- Madronich, S. Photodissociation in the atmosphere: 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. (1987) *J. Geophysical Research*, **92**, 9740–9752.
- Madronich, S., Flocke, S. *The role of solar radiation in atmospheric chemistry*, in Handbook of Environmental Chemistry, edited by P. Boule, pp. 1– 26, Springer-Verlag, New York, 1999.
- Peterson, J.T (1976) *Calculated actinic fluxes (290-700nm) for air pollution photochemistry applications*. EPA-600/14-76-025.
- Poppe, D., Andersson-Skold, Y., Baart, A., Builtjes, P. J. H., Das, M., Fiedler, F., Hov, O., Kirchner, F., Kuhn, M., Makar, P. A., Milford, J. B., Roemer, M. G. M., Ruhnke, R., Simpson, D., Stockwell, W. R., Strand, A., Vogel, B. and Vogel, H. (1996) Gas-Phase Reactions in Atmospheric Chemistry and Transport Models: a Model Intercomparison. EUROTRAC Special Publication, ISS, Garmisch-Partenkirchen.
- Radhakrishnan, K. and Hindmarsh (1993) A. *Description and use of LSODE, the Livermore solver for differential equations*, NASA reference publication 1327.
- Roselle, S.J., Schere, K.L., Pleim, J.E., Hanna A.F. (1999) PHOTOLYSIS RATES FOR CMAQ In Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Part II: Chapter 14. D.W. Byun, and J.K.S. Ching (Eds.). EPA-600/R-99/030, National

Exposure Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 10-1-10-16.

Sandu, A., Daescu, D., Carmichael, G. R. (2003) Direct and adjoint sensitivity analysis of chemical kinetic systems with KPP: I – Theory and software tools. *Atmospheric Environment*, **37**, 5083–5096.

Sandu, A., Sander, R. Simulating Chemical Kinetic Systems in Fortran90 and Matlab with the Kinetic PreProcessor KPP-2.1. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 187–195, SRef-ID: 1680-7324/acp/2006-6-187.

Seinfeld J.H. and Pandis S. N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley&Sons, Inc.

Stephens, G.L. (1978) Radiation profiles in extended water clouds. II.: Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2123-2132.

Tang, Y., Carmichael, G. R., Uno, I., Woo, J., Kurata, G., Lefer, B., Shetter, R. E., Huang, H., Anderson, B. E., Avery, M. A. Impacts of aerosols and clouds on photolysis frequencies and photochemistry during TRACE-P: 2. Three-dimensional study using a regional chemical transport model. , *J. Geophysical Research*, **108**, 43-1-43-15, 2003.