Bollettino Geofisico (Boll. Geof.), anno 17 N.3, pp 31-38 luglio-settembre 1994

MISURE LIDAR DI OZONO ED AEROSOLS STRATOSFERICI DOPO L'ERUZIONE DEL VULCANO PINATUBO

Fabrizio Masci*, Vincenzo Rizi, Alfonso D'Altorio**, Guido Visconti****

*** Istituto Nazionale di Geofisica, Roma**
****Dipartimento di Fisica Università degli Studi, L'Aquila**

Vengono riportati i risultati delle misure simultanee di ozono ed aerosol stratosferici dopo l'eruzione del vulcano filippino Pinatubo effettuate nella Stazione Lidar di L'Aquila nel periodo Agosto 1991 - Marzo 1993. L'analisi dei segnali lidar a tre lunghezze d'onda ha permesso sia di ricavare le proprietà delle particelle presenti in statosfera sia di correggere i profili di ozono dall'interferenza ottica dovuta alla presenza degli aerosol stessi. Il confronto dei profili di ozono con quelli ottenuti in altri siti con tecniche differenti mostra la validità del metodo utilizzato per invertire i segnali DIAL.

Introduzione

L'eruzione del vulcano filippino Pinatubo, durante il periodo 12-16 Giugno 1991, ha immesso in stratosfera dalle 20 alle 30 megaton nellate di diossido di zolfo (SO_2) fino ad una quota di circa 30 km. La conversione dell' SO_2 in particelle composte da una soluzione di H_2SO_4/H_20 è stata abbastanza veloce: dopo circa un mese, il 95% degli aerosol del Pinatubo erano composti da una soluzione di acido solforico in acqua (Deshler et al.,1992).

Il tempo di residenza in atmosfera di tali particelle è di alcuni anni per cui la loro presenza può influenzare sia la concentrazione di ozono, attivando la chimica etero genea anche a medie latitu dini, come mostrato da Hofman e Solomon (1989), e il bilancio radiativo del sistema Terra-Atmosfera (Minnis et al., 1992) che evidentemente perturba i pro cessi fotochimici e dinami ci che regolano il contenuto locale di ozono. L'eruzione del Pinatubo rappresenta quin di un'opportunità unica per validare tali teorie, cosicchè si rende necessario un conti nuo monitoraggio sia della concentrazione di ozono che degli aerosol stratosferici.

La Stazione Lidar di L'Aquila (SLAQ), (42.35°N, 13.33°E, 680m s.l.m.) comprende due sistemi di misura: un sistema DIAL (DIfferential Absorption Lidar) per la misura di ozono,

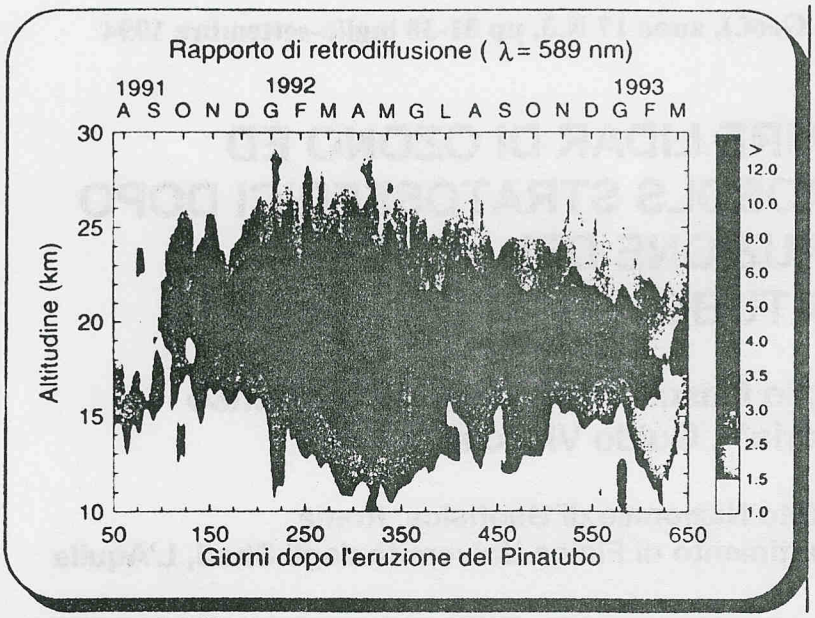


Fig. 1 - Evoluzione temporale dei profili del rapporto di retrodiffusione alla lunghezza d'onda di 589 nm nell'intervallo di quota 10-30 km da Agosto 1991 a Marzo 1993.

operante dal Luglio 1991, ed un sistema lidar per il moni toraggio degli aerosol stra tosferici. Gli apparati speri mentali sono descritti in D'Altorio e Visconti (1983) e in Masci et al., (1991).

I due sistemi della SLAQ hanno operato simultaneamen te sin dai primi mesi dopo l'eruzione del vulcano Pinatu bo in modo da sondare l'atmo sfera con tre lunghezze d'on da (λ_i =308 nm, 351 nm e 589 nm) simultaneamente. Dall'analisi dei segnali lidar, utilizzando un modello di aerosol di origine vulcanica (Bohren et al., 1983), sono stati ricavati i parametri della distribuzione di particelle (D'Altorio et. al, 1993c) che, oltre a caratterizzare gli aerosol presenti in stratosfe ra, hanno permesso di correggere i profili DIAL di ozono dall'interferenza ottica causata dalla presenza degli aerosol del Pinatubo (D'Alto rio et. al, 1993b). Vengono riportati solo i risultati dal periodo seguente l'eruzione del Pinatubo fino a Marzo 1993.

Le misure lidar di aerosol vulcanici

In figura 1 viene riportata l'evoluzione temporale dei profili di retrodiffusione alla lunghezza d'onda di 589 nm osservati nella SLAQ da Agosto 1991 a Marzo 1993.

Il rapporto di retrodiffu sione, alla lunghezza d'onda λ, è definito come:

$$R_\lambda = 1 + \frac{\beta_\lambda^a}{\beta_\lambda^R}$$

dove β_λ^R e β_λ^a sono rispettivamente il coefficiente di retrodiffusione di un'atmo sfera puramente molecolare e il coefficiente di retrodiffusio ne degli aerosol (Bohren et al., 1983). La dipendenza con la quota è implicita.

I profili del rapporto di retrodiffusione riportati in Fig. 1 sono stati calcolati secondo l'algoritmo descritto in D'Altorio et al., (1993b).

La sequenza temporale dei profili evidenzia come gli aerosol vulcanici sono stati osservati nella SLAQ a partire dall'inizio di Agosto 1991 quando un piccolo strato di aerosol è stato individuato a circa 16 km di quota. Dopo circa tre mesi dall'eruzione sono stati osservati strati più consistenti a quote superiori la cui presenza è sicuramente dovuta al trasporto a larga scala della nube originaria dai

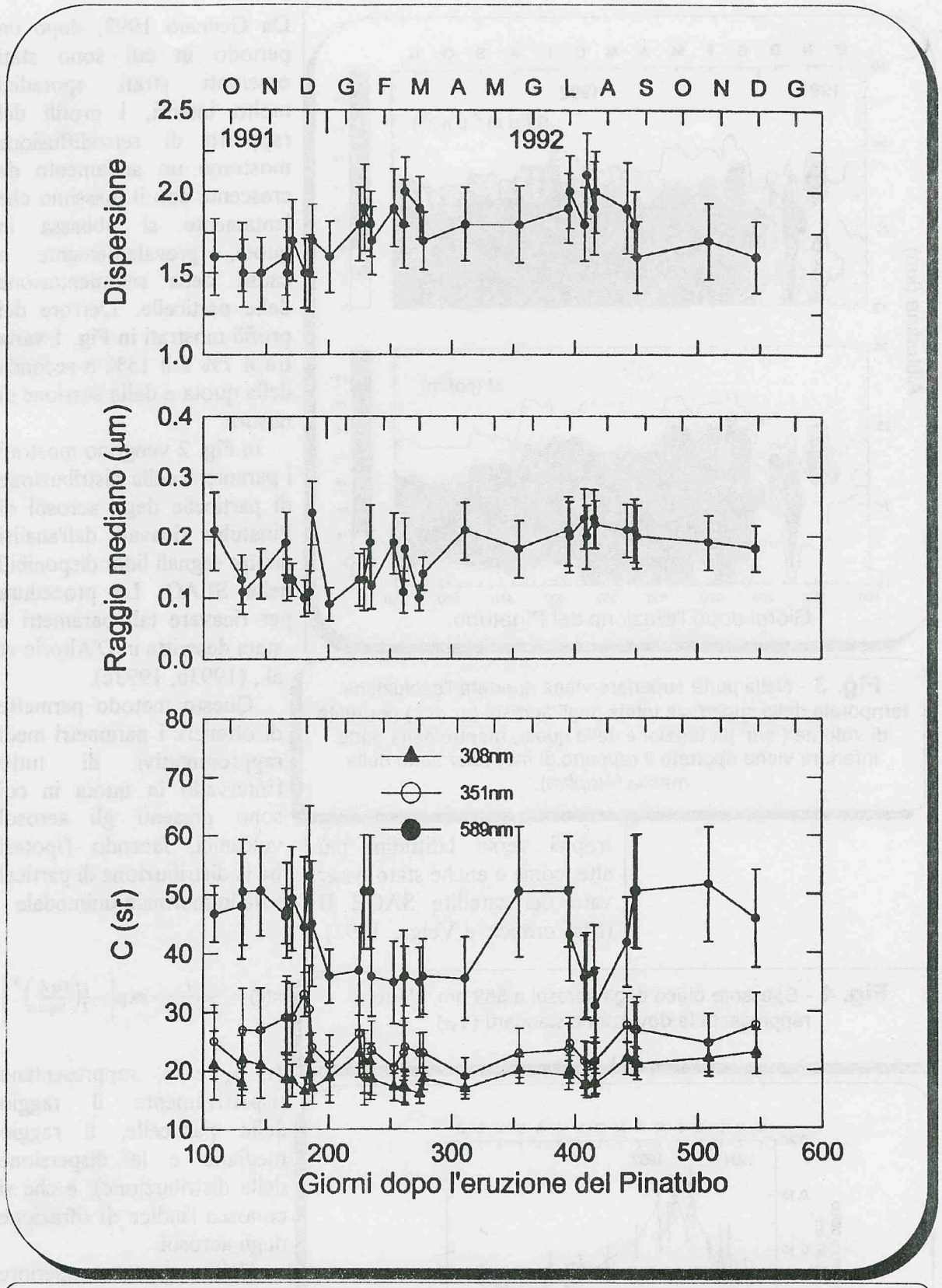


Fig. 2 - Nella parte superiore sono riportate la dispersione ed il raggio mediano della distribuzione di particelle in funzione del tempo dopo l'eruzione del Pinatubo. Nella parte inferiore viene mostrato lo sviluppo temporale del rapporto tra il coefficinte di estinzione e il coefficiente di retrodiffusione alle tre lunghezze d'onda. Gli errori nelle figure rappresentano la deviazione standard (1σ).

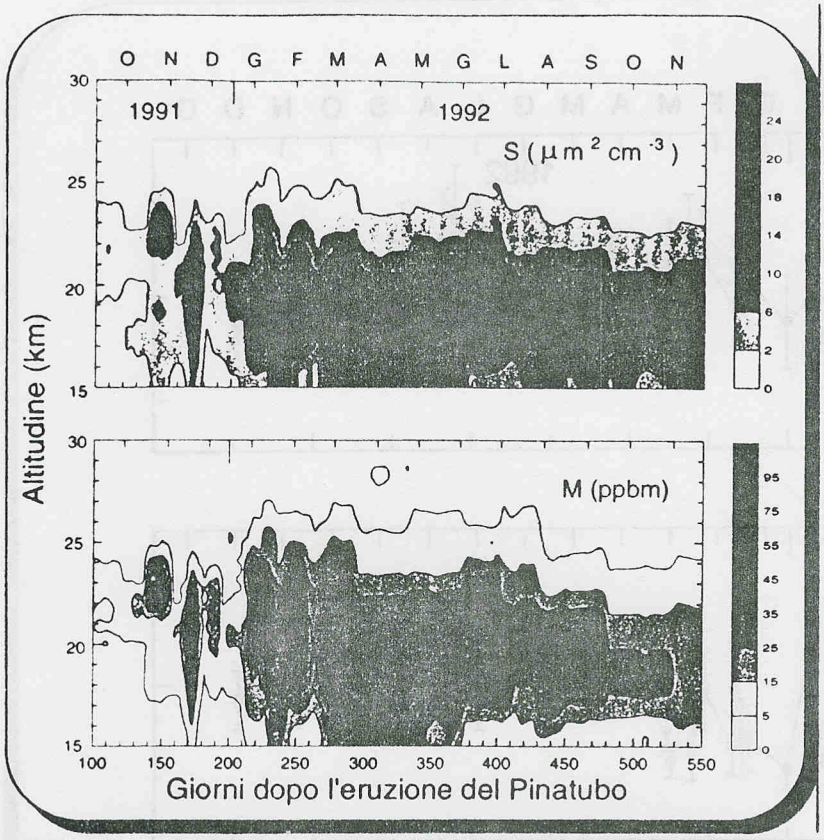
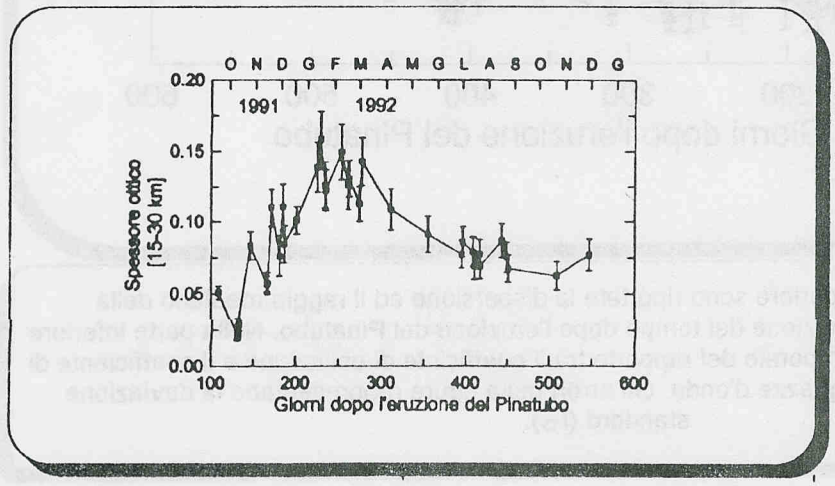


Fig. 3 - Nella parte superiore viene riportata l'evoluzione temporale della superficie totale degli aerosol (μm^2) per unità di volume (cm^3)in funzione della quota, mentre nella parte inferiore viene riportato il rapporto di mescolamento della massa M(*ppbm*).

tropici verso latitudini più alte, come è anche stato osser vato dal satellite SAGE II (McCormick e Veiga, 1992).

Fig. 4 - Spessore ottico degli aerosol a 589 nm. L'errore rappresenta la deviazione standard (1σ).



Da Gennaio 1992, dopo un periodo in cui sono stati osservati strati sporadici molto intensi, i profili del rapporto di retrodiffusione mostrano un andamento de crescente con il massimo che lentamente si abbassa in quota, prevalentemente a causa della sedimentazione delle particelle. L'errore dei profili mostrati in Fig. 1 varia tra il 7% e il 15% a seconda della quota e della sessione di misura.

In Fig. 2 vengono mostrati i parametri della distribuzione di particelle degli aerosol di Pinatubo ricavati dall'analisi dei tre segnali lidar disponibili nella SLAQ. La procedura per ricavare tali parametri è stata descritta in D'Altorio et al., (1993b, 1993c).

Questo metodo permette di ottenere i parametri medi rappresentativi di tutto l'intervallo in quota in cui sono presenti gli aerosol vulcanici, facendo l'ipotesi che la distribuzione di particel le sia lognormale-unimodale

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, r \log \sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log \frac{r}{r_o}}{\log \sigma} \right)^2 \right]$$

(r, r_o e σ, rappresentano rispettivamente il raggio delle particelle, il raggio mediano e la dispersione della distribuzione), e che si conosca l'indice di rifrazione degli aerosol.

Nella parte superiore della figura viene mostrato l'andamento temporale della dispersione e del raggio mediano della distribuzione di particelle. Nella parte

inferiore vengono mostrati i valori del rapporto tra il coefficiente di estinzione e il coefficiente di retrodiffu sione, C_λ, delle particelle alle tre lunghezze d'onda.

Conoscendo i parametri della distribuzione di particel le sono state ricavate altre quantità come la superficie totale degli aerosol per unità di volume:

$$S = 4\pi r_o^2 \quad N \quad \exp\left(2 \log^2 \sigma\right)$$

il rapporto di mescolamento della massa:

$$M = \rho_a \tfrac{4}{3}\pi r_o^3 \quad N \quad \exp\left(\tfrac{9}{2} \log^2 \sigma\right)$$

e lo spessore ottico:

$$\tau_y = C_\lambda \int_{z_b}^{z_t} dz\, \beta_\lambda^R [R_\lambda - 1]$$

Nelle equazioni precedenti N rappresenta la densità di particelle data da:

$$N = \beta_\lambda^R [R_\lambda - 1] \tfrac{1}{\beta_\lambda^a}$$

dove β_λ^a, determinata dal processo di fitting riportato in (D'Altorio et. al, 1993c), è stata normalizzata ad una distribuzione di particelle unitaria, mentre la densità della massa degli aerosol ρ_a è stata assunta pari a 1.6 $gr\ cm^{-3}$.

Queste quantità sono di maggior interesse per la valutazione sia dell'influenza degli aerosol vulcanici sulla concentrazione di ozono che sulle perturbazioni del bilan cio radiativo.

In Fig. 3 vengono mostrati l'andamento temporale della superficie totale degli aerosol per unità di volume (S) e del rapporto di mescolamento della massa (M) nell'intervallo di quota 15-30 km. Entrambe le quantità sono affette da una grande incertezza diretta mente legata all'indetermina zione del raggio mediano e della dispersione della distri buzione di particelle. Per quanto riguarda la superficie totale degli aerosol, la deviazione standard varia tra il 50% e il 65%, mentre per quanto riguarda il rapporto di mescolamento della massa, varia tra il 60% e il 90%.

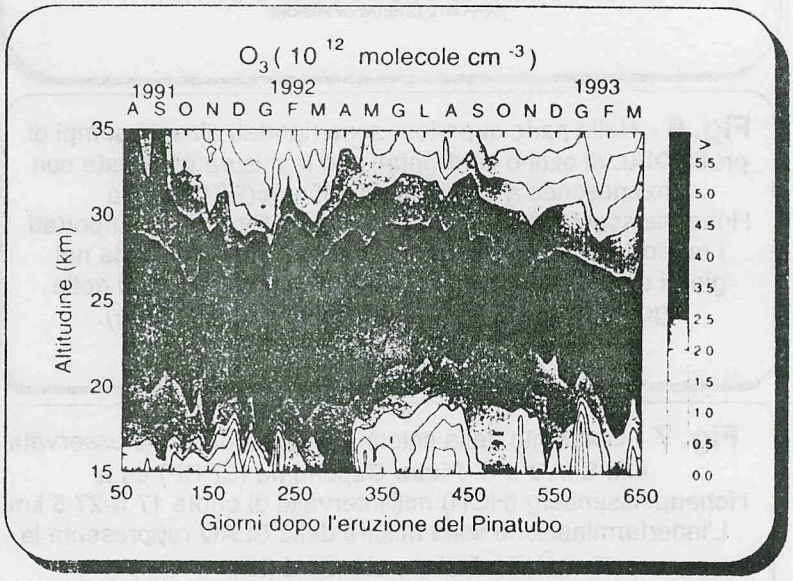


Fig. 5 - Evoluzione temporale dei profili DIAL di ozono nell' intervallo di quota 15-35 km da Agosto 1991 a Marzo 1993.

Nonostante la grande incertez za i valori di tali quantità si confrontano molto bene con quelli ottenuti da Deshler et al., (1993) con misure dirette *in situ* delle dimensioni delle particelle.

In Fig. 4 viene mostrato l'evoluzione temporale dello spessore ottico a 589 nm calcolato tra z_b= 15 km e z_t = 30 km. Lo spessore ottico è determinato con un

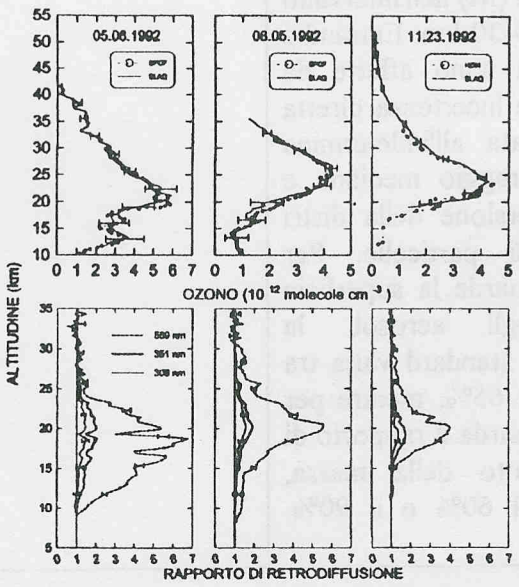
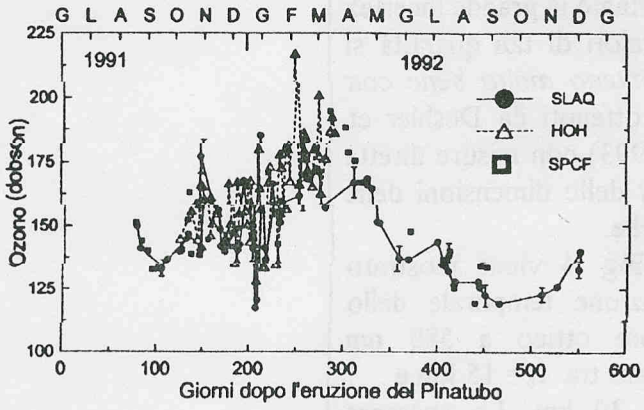


Fig. 6 - Nella parte superiore sono riportati alcuni esempi di profili DIAL di ozono confrontati con le misure effettuate con ozonosonde a S. Pietro Capofiume(SPCF) ed a Hohenpeissenberg (HOH). Nella parte inferiore sono riportati i rapporto di retrodiffusione alle tre lunghezze d'onda nei giorni corrispondenti alle misure di ozono. Gli errori nelle figure rappresentano la deviazione standard (Iσ).

Fig. 7 - Confronto della colonna parziale di ozono osservata alla SLAQ a S. Pietro Capofiume (SPCF) ed a Hohenpeissenberg (HOH) nell'intervallo di quota 17.5-27.5 km. L'inderterminazione sulla misura della SLAQ rappresenta la deviazione standard (Iσ).



errore pari al 15%. Dalla figura si può notare che l'andamento temporale dello spessore ottico dopo l'eruzione è composto da due fasi. Nella prima fase lo spessore ottico aumenta con una velocità pari a 0.025 al mese raggiungendo il valore massimo di 0.15 a Dicembre 1991; tale fase evidenzia il trasporto degli aerosol dalle basse latitudini verso latitudini più alte. Dall'inizio del 1992 invece lo spessore ottico inizia a diminuire molto lentamente; ciò è dovuto prevalentemente a causa dei processi di sedimentazione delle particelle.

Le misure di ozono

In Fig. 5 viene mostrato l'andamento temporale dei profili di ozono ottenuti con il sistema DIAL della SLAQ. Nel caso delle misure DIAL di O_3, l'interferenza ottica degli aerosol vulcanici deve essere rimossa dai segnali lidar alle due lunghezze d'onda. In letteratura sono stati sviluppati molti metodi di correzione dei profili DIAL di O_3 (Browel et al., 1985, D'Altorio et al., 1992) ottenuti in presenza di aerosol. Questi metodi si basano sulla conoscenza *a priori* della dipendenza con la lunghezza d'onda del segnale di retrodiffusione dovuto agli aerosol. I profili presentati in Fig. 5 sono stati ottenuti con un nuovo algoritmo sviluppato nella SLAQ (D'Altorio et al., 1993b). Questo metodo utilizza i parametri ottici degli aerosol ricavati direttamente

dai segnali lidar alle tre lunghezze d'onda per correg gere i profili di ozono sia dall'influenza della retrodif fusione che da quella dell'estinzione delle particelle.

Ad ogni modo questa correzione introduce un erro re elevato sul profilo di ozo no nelle quote in cui sono presenti gli aerosol vulcanici. L'errore totale sui profili di ozono, dato dalla somma dell'errore sistematico e dell'errore statistico, nella zona in cui sono presenti gli aerosol varia tra il 15% e il 35%. Ad ogni modo la validità del metodo di cor rezione viene evidenziato dal confronto delle misure DIAL della SLAQ con le misure *in situ* effettuate con ozono-sonde a San Pietro Capofiu me (BO) e ad Hohenpeissen berg (Germania) rispettiva mente a circa 300 e 600 Km di distanza da L'Aquila. Nella parte superiore della Fig. 6 vengono mostrati alcuni esempi di tali confronti, mentre nella parte inferiore vengono riportati i rapporti di retrodiffusione ottenuti nelle stesse giornate alle tre lunghezze d'onda. Si può notare come i due tipi di misure coincidano molto bene anche nella zona in cui sono presenti gli aerosol vulcanici.

Come ulteriore conferma della validità del metodo, in Fig. 7 viene riportato l'andamento temporale della colonna parziale di ozono ottenuta dall'integrazione dei profili di ozono delle tre stazioni di misura nell'interval lo di quota tra 17.5 e 27.5 km, maggiormente interessa to dalla presenza degli aero-sol vulcanici.

Conclusioni

Sono stati riportati i risultati ottenuti con un nuovo metodo, basato sull'uti lizzo di tre segnali lidar a differente lunghezza d'onda, sviluppato sia per ottenere l'evoluzione temporale dei parametri della distribuzione di particelle degli aerosol di Pinatubo, sia per correggere i profili DIAL di ozono dall'interferenza ottica degli aerosol. Nonostante l'elevata indeterminazione sui parame tri della distribuzione di parti celle, la validità del metodo è stata mostrata con il confronto delle misure DIAL con altri tipi di misura di ozono. In generale i confronti risultano soddisfacenti anche nella zona in cui sono presenti gli aerosol vulcanici. A causa della mancanza di dati di ozono negli anni precedenti all'eruzione del Pinatubo nulla di definitivo può essere detto circa l'influenza degli aerosol sulla concentrazione di O_3, anche se un'analisi preliminare indica una diminuzione di ozono a medie latitudini (D'Altorio et al., 1993a) confermata dal lavoro di Gleason et al., (1993).

Ringraziamenti

La stazione Lidar di L'Aquila per le misure di ozono è stata in parte finanziata dall'Istituto Nazio nale di Geofisica (I.N.G.) in

collaborazione con l'Universi tà degli Studi di L'Aquila.

Si ringrazia il Prof. Enzo Boschi, Presidente dell' I.N.G., per il costante interesse e incoraggiamento.

Bibliografia

Bohren C.F., Huffinan D.R.: Absorption and Scattering of Light by Small Particles. J. Wiley & Sons, New York (1983)

Browel E.V., Ismail S., Shipley S.T.: Ultarviolet dial measurement of 0_3 profiles in regions of spatizlly inhomogeneous aerosols. *Appl. Optics* 24, 2827-2836 (1985)

D'Altorio A., Visconti G.: Lidar observations of dust layers transience in the stratosphele following the El Chichòn volcanic eruption. *Geoph. Res. Lett.* 10, 27-30 (1983)

D'Altorio A., Masci F., Visconti G., Rizi V., Boschi E. Stratospheric aerosol and ozone lidar measurements after the Pinatubo eruption. *Geoph. Res. Lett.* 19, 393-396 (1992)

D'Altorio A., Masci F., Pitari G., Visconti G., Rizi V., Cervino M., Giovannelli G.: Ground-Based monitoring of Pinatubo aerosol and ozone at L'Aquila, Italy: I.- Evidence for ozone depletion during 1991/1992 winter months. *Il Nuovo Cimento C* 16 (1), 91-95 (1993a)

D'Altorio A., Masci F., Rizi V., Visconti G., Boschi E.: Continuous lidar measurements of stratospheric aerosols and ozone after the Pinatubo eruption. In: Dial ozone retrieval in presence of stratospheric aerosol layers (part I), *Geoph. Res. lett.* in press (1993b)

D'Altorio A., Masci F., Rizi V., Visconti G., Verdecchia M.: Continuous lidar measurements of stratospheric aerosols and ozone after the Pinatubo eruption. In.: Time evolution of ozone profiles and of aerosol properties (part II), *Geophys. Res. Lett.*, in press (1993c)

Deshler T., Johnson B.J., Rozier W.R: Balloonborne measurements of Pinatubo aerosol size distribution and volatility at Laramie Wyoming during the summer of 1991, *Geoph. Res. Lett.* 19, 199-202 (1992)

Deshler T., Johnson B.J, Rozier W.R.: Balloonborne measurements of Pinatubo aerosol during 1991 and 1992 at 41°N: vertical profiles, size distribution and volatility. *Geoph. Res. Lett.* 20, 1435-1438 (1993)

Gleason J.K., Bhartia P.K., Herman J.R., McPeters R., Newman P., Stolarski R.S., Flynn L., Labow G., Larko D., Seftor C., Wellemeyer C., Komhyr W.D., Miller A.J., Planet W.: Record low global ozone in 1992. *Science* 260, 523-526 (1993)

Hofmann D.J., Solomon S.: Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichón. *J. Geoph. Res.* 94, 5029-5041 (1989)

Masci F., D'Altorio A., Visconti G., Rizi V.: Preliminary results from the ozone lidar at the University of L'Aquila. *Il Nuovo Cimento C* 14 (6), 651-654 (1991)

McCormick M.P., Veiga R.E.: SAGE II measurements of early Pinatubo aerosols. *Geoph. Res. lett.* 19, 155-158 (1992)

Minnis P., Harrison E.F., Stowe L.L., Gibson G.G., Denn F.M., Doelling D.R., Smith W.L. Jr.: Radiative climate forcing by the Mount Pinatubo Eruption. *Science* 250, 1411-1415,1992.