

QUEI TRAMONTI SONO TROPPO ROSSI

# GLI EFFETTI DELLE ERUZIONI VULCANICHE SULL'ATMOSFERA

di M. Verdecchia, F. Masci, V. Rizi(\*), A. D'Altorio, G. Pitari, G. Visconti  
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi-L'Aquila

*LA ERUZIONE DEL PINATUBO, DEL GIUGNO SCORSO, HA DETERMINATO LA PRESENZA IN STRATOSFERA DI UNA GRANDE QUANTITÀ DI AEROSOL VULCANICI. CIÒ È ALL'ORIGINE DELLA ECCEZIONALE COLORAZIONE ROSSA DEI TRAMONTI. L'ALTO GRADO DI RIFLETTIVITÀ DELLE PARTICELLE NON SI LIMITA PERÒ A CARATTERIZZARE I TRAMONTI, SONO IN ATTO STUDI E CAMPAGNE DI MISURA, DA TERRA E CON SATELLITI, PER VALUTARE IN MODO APPROFONDITO IL RAPPORTO FRA QUESTO FENOMENO ED EVENTUALI VARIAZIONI DEI PARAMETRI CLIMATICI, NONCHÈ LE POSSIBILI CONSEGUENZE PER LA CONSISTENZA DELLO STRATO DI OZONO*

Negli ultimi mesi ci siamo sicuramente accorti che i tramonti sono diventati molto più rossi del normale. Si parte da un iniziale colore giallastro per arrivare verso la fine del tramonto ad un colore rosso-Blu soprattutto nella parte più alta del cielo passando attraverso tutta una serie di toni di rosso. La ragione di questo fenomeno è la presenza nella stratosfera degli aerosol vulcanici prodotti dall'eruzione del vulcano Pinatubo avvenuta nel Giugno scorso nelle Filippine. L'importanza di una eruzione di queste proporzioni non si limita naturalmente alla spettacolarità dei tramonti perché di fatto essa costituisce come nei casi di simili eventi verificatisi negli ultimi venti o trenta anni una occasione quasi unica per effettuare un esperimento globale sull'atmosfera e il sistema climatico. In pratica le ultime tre grandi eruzioni, St. Helen nel 1980, El Chichon nel 1982 e Pinatubo sono state seguite da una serie di misure particolarmente accurate e coordinate per studiare in dettaglio le reazioni del sistema atmosferico.

Quando un vulcano erutta in modo esplosivo come nel caso di Pinatubo vengono immerse nella bassa stratosfera milioni di tonnellate di anidride solforosa che vengono trasportate rapidamente dalle correnti zonali a coprire la fascia di latitudine alla quale si è

verificata l'eruzione e successivamente, ma più lentamente, vengono a diffondersi attraverso le diverse fasce di latitudine. Durante questo processo comunque l'anidride solforosa subisce delle trasformazioni chimiche il cui prodotto finale è acido solforico. Le condizioni della stratosfera sono tali che viene favorita la condensazione di acido solforico in acqua, con una soluzione tipica al 75%, in particelle con dimensioni tipiche di 0.1-1  $\mu$  che vanno a costituire una nube di gigantesche proporzioni. Nel caso di El Chichon la nube conteneva in totale qualcosa come dodici milioni di tonnellate di acido solforico mentre per l'eruzione di Pinatubo si stima che il totale possa essere tre volte tanto. Le caratteristiche ottiche di queste particelle sono tali che esse assorbono scarsamente la radiazione solare mentre hanno un alto grado di riflettività. Il risultato è che una nube vulcanica in linea di principio diminuisce la quantità di radiazione solare che raggiunge la superficie e quindi tende a raffreddare il sistema terra-atmosfera. Gli eventuali effetti climatici legati alle eruzioni vulcaniche per anni sono rimasti quelli più noti e in un certo senso anche quelli più temuti. Di fatto solo in casi veramente eccezionali (come nel caso dell'eruzione del Tambora del 1815) si sono avuti effetti evidenti sui normali andamenti stagionali. Da qualche anno però si è

ipotizzato che le eruzioni vulcaniche potrebbero costituire un pericolo per l'ozono stratosferico. Sin dai tempi dell'eruzione di Agung nel 1963, si era notato che esisteva una anticorrelazione fra la presenza di aerosol vulcanici e l'ozono ma solo nel 1989 Susan Solomon e David Hoffman formulavano l'ipotesi che la correlazione era da ricercarsi

in una complessa interazione fra aerosol e chimica dell'ozono. Le uniche prove sufficientemente analitiche disponibili erano quelle relative all'eruzione di El Chichon ma esse rimanevano scarse e contraddittorie. Nel caso dell'eruzione del Pinatubo le condizioni sono migliori perché non solo un programma di ricerche ha programmato misure in correlazione fra aerosol e ozo-



*Nguruhoe, in Nuova Zelanda, Foto M. Majrani, tratta dalla rivista «natura», novembre 1991*

(\*) Istituto Nazionale di Geofisica

no ma soprattutto perché il satellite UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) permetterà di ottenere dei dati su tutta una serie di composti chimici di interesse per l'ozono.

Altri effetti sono stati attribuiti alle eruzioni vulcaniche, come la possibilità di triggerare o facilitare l'insorgere di El Nino o come quella di influenzare il regime dell'oscillazione quasi biennale (QBO) in stratosfera. Queste ipotesi si basano comunque su dati che sono assai marginali.

### I TRAMONTI ROSSI

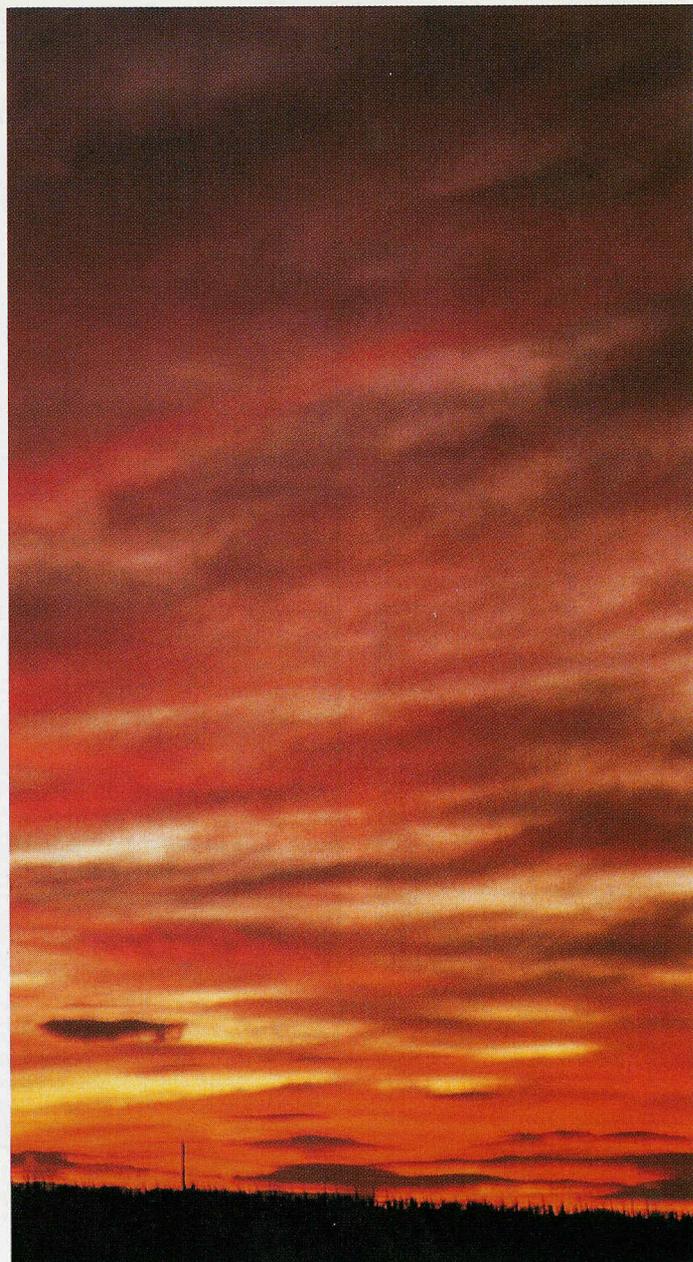
La luce solare è visibile in un campo di lunghezze d'onda che va dal violetto (lunghezza d'onda,  $\lambda = 0.4\text{m}$ ) al rosso ( $\lambda = 0.8\text{m}$ ) ma quando attraversa l'atmosfera viene assorbita dai gas che si trovano in essa e principalmente da ozono e vapor d'acqua. Dopo aver tagliato l'ultravioletto l'ozono assorbe in una banda debole (detta di Chappuis) che è centrata attorno a  $0.59\mu$  cioè nel giallo. Questo significa che quando il sole è basso sull'orizzonte la sua luce viene depauperata del giallo e se il percorso è sufficientemente lungo la luce che rimane è essenzialmente rossa. Come è illustrato in fig. 1 questo «raggio» rosso viene diffuso dalla nube di aerosol che si trova ad alta quota per cui un osservatore a terra vedrà, spostando lo sguardo dall'orizzonte verso l'alto, luce che passa dal bianco al giallo e al rosso o al rosso-blu. La variabilità del fenomeno è piuttosto pronunciata perché dipende in larga misura dalle locali condizioni meteorologiche. Di fatto le perturbazioni arrivano prevalentemente da ovest per cui può succedere che in procinto di un cambiamento del tempo delle nuvole ad ovest blocchino i raggi più radenti impedendo pertanto che questi vengano diffusi ad alta quota. In questo caso il cielo non risulterà particolarmente rosso. Per inciso questo è anche il meccanismo dal quale si origina il detto popolare: rosso di sera buontempo si spera.

E' possibile stabilire visualmente l'altezza dello strato con una certa approssimazione stimando il tempo dopo il tramonto quando il bagliore scompare sotto l'orizzonte. Ovviamente una stima più

precisa si può ottenere da misure fotometriche di attenuazione della luce stellare o del sole al tramonto e su questo era in gran parte basato il lavoro di Richard Goody e Fritz Volz sull'eruzione dell'Agung prima che Giorgio Fiocco utilizzasse il laser attorno agli stessi primi anni '60.

### IL MONITORAGGIO DEGLI AEROSOL VULCANICI

Da terra lo strumento più semplice e redditizio per studiare gli aerosol vulcanici è appunto il radar ottico (LIDAR in inglese dall'acronimo, Light Detection and Ranging) che è costituito da un laser impulsato ad alta potenza che emette impulsi verso l'atmosfera. La luce diffusa viene raccolta da un telescopio e convertita in un segnale che viene analizzato nel tempo. L'altezza di questo segnale in funzione del tempo dà un'indicazione della densità atmosferica o della sezione d'urto di scattering in funzione della quota. Ai tempi pionieristici in cui Fiocco applicava la sua invenzione all'Agung il segnale veniva analizzato su migliaia di fotografie di un oscilloscopio a memoria, oggi basta una scheda montata su un PC per avere in tempo reale il profilo di aerosols. Il dato più interessante da questo punto di vista è il cosiddetto rapporto di back-scattering cioè il rapporto fra il segnale osservato e quello che si avrebbe da un'atmosfera molecolare. Questo rapporto è lo stesso che c'è fra le sezioni d'urto di scattering



Tramonto «rosso» su collina bolognese, ottobre 1991, Foto G. Naldi

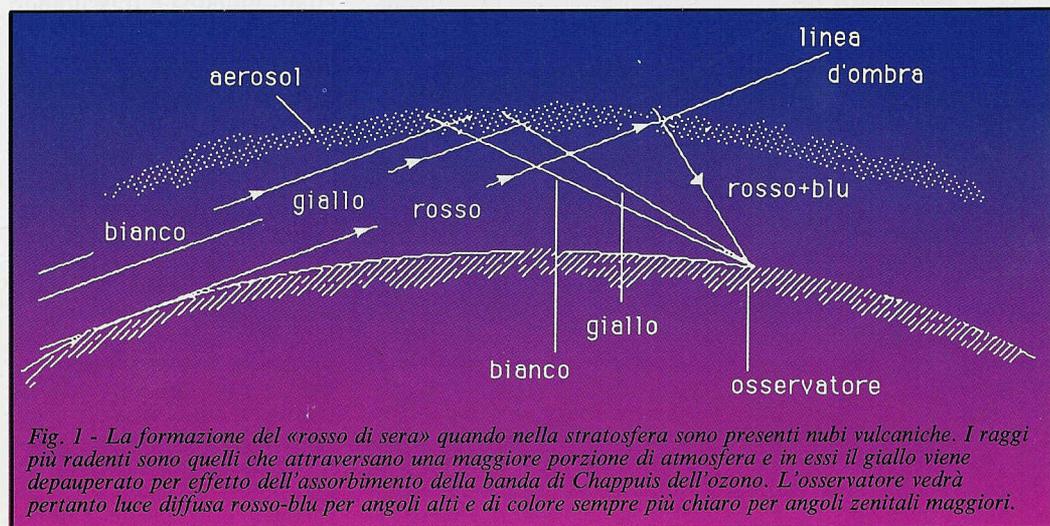


Fig. 1 - La formazione del «rosso di sera» quando nella stratosfera sono presenti nubi vulcaniche. I raggi più radenti sono quelli che attraversano una maggiore porzione di atmosfera e in essi il giallo viene depauperato per effetto dell'assorbimento della banda di Chappuis dell'ozono. L'osservatore vedrà pertanto luce diffusa rosso-blu per angoli alti e di colore sempre più chiaro per angoli zenitali maggiori.

dell'atmosfera e degli aerosol e quindi da esso si può ottenere direttamente lo spessore ottico della nube di aerosol se se ne conoscono le caratteristiche ottiche. In fig. 2 sono riportati alcuni esempi di misure effettuate dalla stazione lidar dell'Università di L'Aquila che danno anche un'idea dell'evoluzione della nube di Pinatubo. Gli ultimi dati danno uno spessore ottico  $\tau$  della nube attorno a 0.3 ad una lunghezza d'onda di 0.59 $\mu$ m. Lo svantaggio del lidar è quello di misurare la distribuzione degli aerosol in un solo punto per cui l'analisi dei dati richiede il confronto con altre stazioni analoghe situate ad esempio a diverse latitudini. Misure globali sono effettuate da satelliti come ad esempio l'esperimento SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment). Altre misure estese a diverse latitudini sono effettuate da LIDAR aerotrasportati.

Accanto al LIDAR che misura la distribuzione degli aerosol, sempre all'Università di L'Aquila, viene utilizzato un radar ottico nella versione DIAL (Differential Absorption Lidar) per la misura dell'ozono. Questo strumento utilizza un laser che emette due lunghezze d'onda a 0.308 $\mu$ m e 0.351 $\mu$ m la prima delle quali viene fortemente assorbita dall'ozono. In questo modo analizzando i segnali dai due canali è possibile risalire alla distribuzione di ozono in quota. Più avanti vedremo qual è l'utilità di questi profili ma per il momento ci interessa il fatto che la presenza degli aerosol è rilevabile anche sulle lunghezze d'onda DIAL e dall'analisi dei rapporti di scattering sulle tre lunghezze d'onda è possibile risalire ad alcune caratteristiche ottiche degli aerosol.

**GLI EFFETTI CLIMATICI**

La trasformazione dell'anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) in acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e quindi in goccioline di acqua avviene progressivamente nei primi mesi che seguono l'eruzione quando gran parte del gas eruttato si trova confinato ancora nella fascia di latitudine dell'eruzione che in questo caso è quella tropicale. Le medie ed alte latitudini sono quindi invase nei mesi successivi da

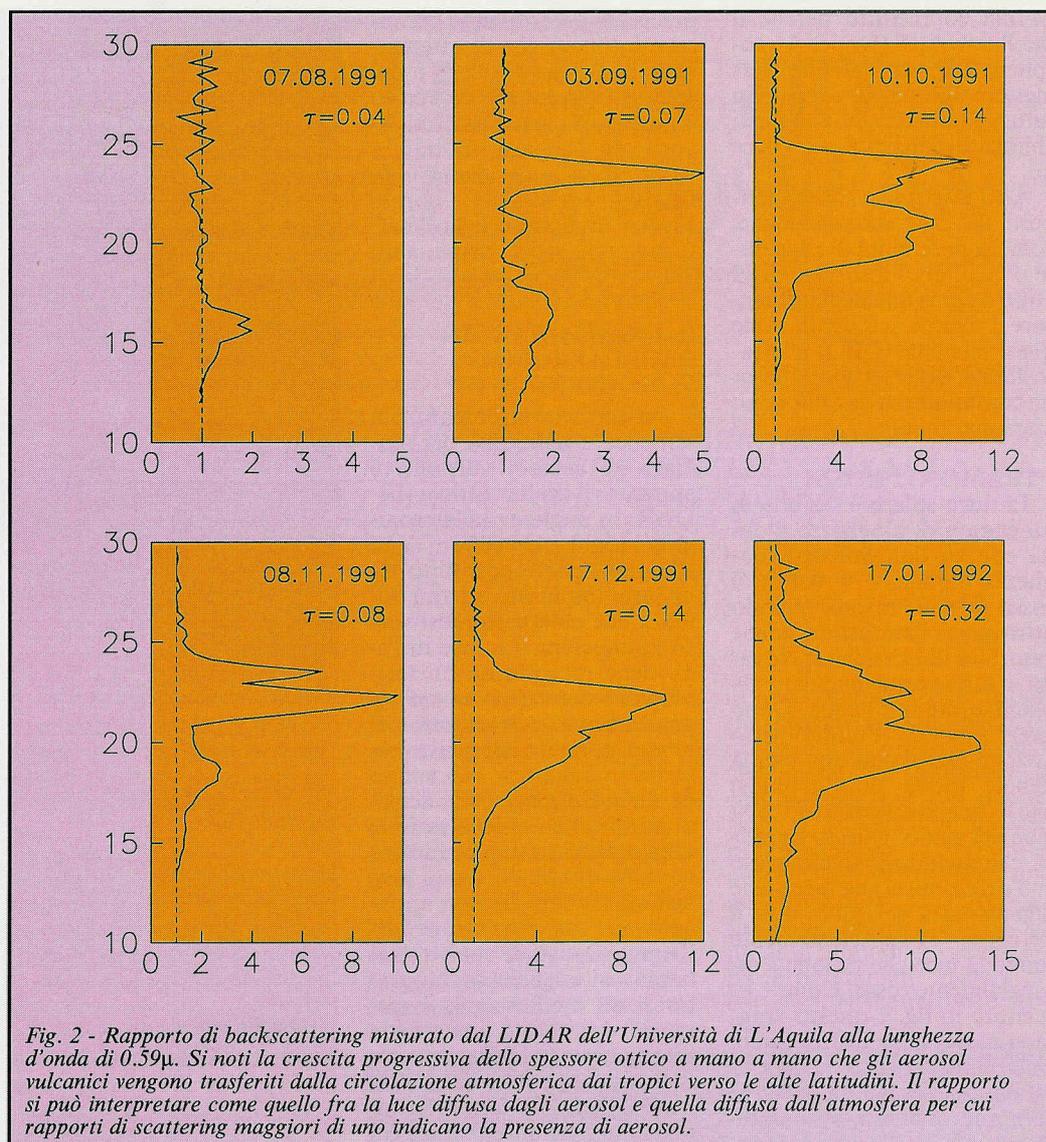


Fig. 2 - Rapporto di backscattering misurato dal LIDAR dell'Università di L'Aquila alla lunghezza d'onda di 0.59 $\mu$ m. Si noti la crescita progressiva dello spessore ottico a mano a mano che gli aerosol vulcanici vengono trasferiti dalla circolazione atmosferica dai tropici verso le alte latitudini. Il rapporto si può interpretare come quello fra la luce diffusa dagli aerosol e quella diffusa dall'atmosfera per cui rapporti di scattering maggiori di uno indicano la presenza di aerosol.

una crescente quantità di aerosol e lo spessore ottico tende perciò ad aumentare nel tempo. Questo processo è già evidente nei dati presentati in fig. 2. Le proprietà ottiche degli aerosol sono tali che riflettono assai efficacemente la radiazione solare sottraendone una quantità che dipende dallo spessore ottico della nube. Parte della radiazione viene invece assorbita dallo strato di aerosol. In linea di principio quindi dopo un'eruzione vulcanica dovremmo assistere ad un raffreddamento della troposfera e contemporaneamente ad un riscaldamento della stratosfera. In effetti data la relativa stabilità della stratosfera è relativamente facile osservare variazioni di temperatura di pochi gradi come quelle associate ad eruzioni dell'entità del Pinatubo mentre è estremamente diffici-

le distinguere le perturbazioni sulla temperatura superficiale o troposferica dalla normale variabilità meteorologica. L'entità di queste perturbazioni, considerando solo gli effetti radiativi e trascurando tutti i processi di feedback, può essere approssimata con una semplice legge del tipo  $\Delta T_0 = 0.58\tau$  dove  $\tau$  è lo spessore ottico nel visibile.

Negli ultimi trenta anni le eruzioni di una certa entità che sono state seguite accuratamente sono quelle di Agung, St. Helen e El Chichon. In tutti e tre i casi mentre il segnale stratosferico è piuttosto evidente quello troposferico rimane assai dubbio. Questo non significa che storicamente non si ricordino episodi in cui eruzioni vulcaniche hanno avuto effetti anche vistosi sul clima come nel caso dell'eruzione del Tambo-

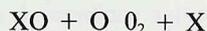
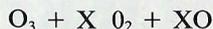
ra avvenuta nel 1815. In quel caso lo spessore ottico ha raggiunto valori superiori a uno e si ricordano carestie e problemi economici legati alle stagioni anomale che hanno seguito l'eruzione.

Gli effetti degli aerosol si manifestano per un periodo di tempo di uno o due anni e quindi rappresentano un impulso di raffreddamento sul sistema climatico.

**GLI EFFETTI SULL'OZONO**

La scoperta del buco di ozono in Antartide ha avuto come effetto fra l'altro di introdurre la chimica eterogenea nelle reazioni che determinano la concentrazione di ozono. In pratica si parla di chimica eterogenea tutte le volte che le reazioni chimiche non avvengono solo in fase gassosa ma sono presenti soli-

di o liquidi. La concentrazione di ozono in stratosfera è normalmente determinata dalle seguenti reazioni di distruzione:



In queste reazioni si consumano una molecola di ozono e un atomo di ossigeno e si rimette a disposizione un composto X che riinizia il ciclo catalitico. Questo composto può essere sia cloro (Cl), che ossidril (HO) che ossido di ozono (NO). In stratosfera il contenuto di cloro è fortemente perturbato dall'attività industriale e quindi è il composto potenzialmente più pericoloso. L'unico modo di rallentare il ciclo catalitico in questione è attraverso la formazione di composti «tamponi» come il nitrato di cloro ClONO<sub>2</sub> attraverso la reazione



che però costituisce una riserva di cloro in quanto a sua volta viene fotodissociato e restituisce cloro. Essenziale per la formazione di nitrato di cloro è la presenza di ossidi di azoto di cui un composto importante specialmente di notte è il pentossido di ozono (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). A partire da qualche anno qualcuno ha ipotizzato che il pentossido di azoto possa essere convertito in acido nitrico (HNO<sub>3</sub>) dalla reazione



In questo caso l'acqua che compare nella reazione è quella contenuta nella soluzione di acqua-acido solforico degli aerosol vulcanici e quindi siamo in presenza di una reazione eterogenea. L'effetto di una tale reazione è quello di trasformare ossidi di azoto (NOx) in acido nitrico che può essere rimosso dalla pioggia dopo essere stato trasportato a quote più basse e che costituisce comunque un pozzo per gli NOx. In tal modo si rende disponibile meno NOx per formare nitrato di cloro e quindi

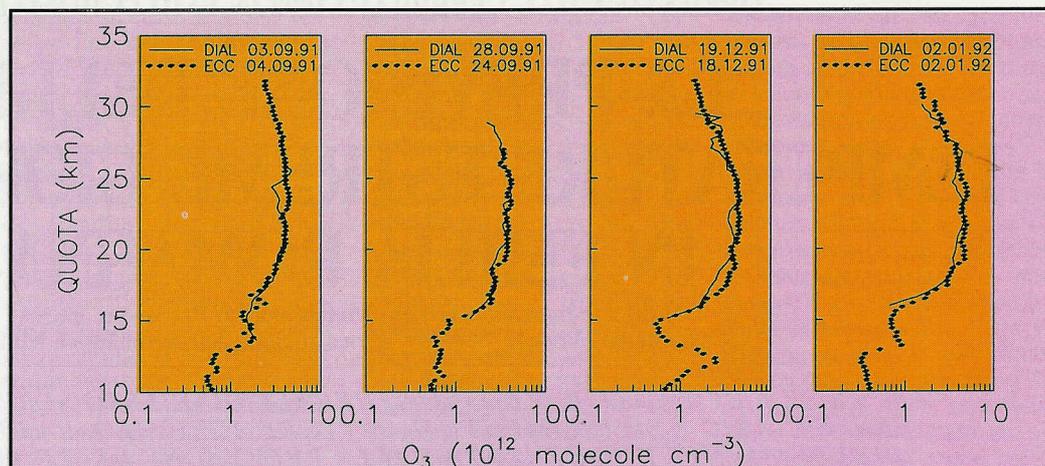


Fig. 3 - Confronto fra le misure di ozono effettuate dal sistema DIAL dell'Università di L'Aquila e la sonda ECC di S. Pietro Capofiume. Le misure DIAL sono corrette per la presenza degli aerosol.

rimane in circolazione una maggiore quantità di ossidi di cloro (ClO) che aumenta la distruzione di ozono.

In condizioni di quiescenza vulcanica esiste comunque uno strato di aerosol nella bassa stratosfera (strato di Junge) che contribuisce a queste reazioni. E' evidente che nel caso si abbia una eruzione vulcanica queste reazioni sono esaltate al punto da poter osservare degli effetti di diminuzione sull'ozono. Da qui nasce la grande importanza di effettuare contemporaneamente misure su ozono e aerosol. Anche in questo caso nessuno si aspetta di poter vedere un effetto così immediato dai dati. Una delle ragioni è che le masse d'aria di cui si fa il sampling hanno una loro storia meteorologica per cui il contenuto di ozono di quella specifica massa d'aria dipende non solo dal contenuto di aerosol che esiste in loco ma anche da quello che ha incontrato lungo il percorso. Il trasporto della polvere e dell'ozono può seguire modalità diverse (l'ozono non sedimenta ad esempio) per cui questa correlazione andrà studiata con molta cura. In fig. 3 sono riportati alcuni esempi di misure di ozono prese a L'Aquila contemporaneamente alle misure di aerosol. Anche se la misura DIAL è assoluta, è necessario di tanto in tanto validare i risultati con misure indipendenti di ozono e l'ideale sarebbe avere a disposizione dette misure nello stesso sito. Nel nostro caso abbiamo confrontato i nostri dati con quelli presi dall'ER-

SA presso la Stazione di S. Pietro Capofiume con una sonda ECC. I risultati di questo confronto sono generalmente buoni ma non è ancora possibile stabilire in che misura gli aerosol vulcanici stanno erodendo l'ozono anche se in alcuni casi si sono notate evidenti correlazioni fra strati molto sottili e diminuzione in loco di ozono. E' chiaro che sarà necessario ricorrere ad una lunga statistica prima di arrivare a qualunque conclusione.

### RINGRAZIAMENTI

Il finanziamento del sistema DIAL per la misura dell'ozono è stato concesso dall'Istituto Nazionale di Geofisica (ING) attraverso un'apposita convenzione con l'Università di L'Aquila. L'ING ha anche provveduto in parte per il personale tecnico e di ricerca. Un ringraziamento va al suo Presidente prof. E. Boschì che ha sostenuto sempre con grande entusiasmo questa iniziativa.

## MITOLOGIA

### TUPAN

*Antico dio del tuono delle popolazioni sudamericane Guaranì. La mitologia narra che ogni volta che Tupan si reca in visita alla madre si scatena una tempesta, e che i tuoni sono provocati dal posto vuoto della canoa con cui egli attraversa il cielo remando. Raffigurato come un uomo basso e tarchiato, venne associato a Cristo dai missionari cristiani.*