

Rapporti tecnici

INGV

**Realizzazione di una stazione fissa
per misure LIDAR sull'Etna**

199



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici

INGV

REALIZZAZIONE DI UNA STAZIONE FISSA PER MISURE LIDAR SULL'ETNA

Simona Scollo¹, Giuseppe Leto², Gianluca Pisani³, Nicola Spinelli³, Xuan Wang⁴,
Valentino Tontodonato⁵, Mauro Coltelli¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo)

²INAF (Osservatorio Astrofisico di Catania)

³Università di Napoli Federico II (CNISM e Dipartimento di Scienze Fisiche)

⁴CNR/INFM Coherentia, Naples

⁵ALA, Napoli

198

Indice

Introduzione	5
1. Scelta della postazione di misura	6
2. Caratteristiche del LIDAR	7
3. Prima campagna di misura	8
4. Risultati e Conclusioni	9
Ringraziamenti	12
Bibliografia	12

Introduzione

La cenere vulcanica costituisce un grave pericolo per la sicurezza aerea poiché l'incontro accidentale con un aereo può causare danni ai motori, alle superfici alari di controllo, alle luci di atterraggio, ai parabrezza con conseguente perdita di visibilità, e compromettere la funzionalità della strumentazione di navigazione e di controllo [Casadevall, 1994]. Sebbene sia impossibile evitare che un vulcano erutti, la conoscenza dell'esatta posizione spaziale della nube eruttiva in funzione del tempo permette di evitare la maggior parte dei danni causati dalla cenere vulcanica. Questo obiettivo può essere raggiunto attraverso l'utilizzo di diversi strumenti di misura capaci di rilevarne la sua presenza. Tra quelli che permettono la rivelazione della nube eruttiva dal suolo ricordiamo i radar meteorologici [Marzano et al., 2010] e doppler [Dubosclard et al., 1999], i sistemi di videosorveglianza [Andò and Pecora, 2006], gli spettrometri nell'ultravioletto [Burton et al., 2004] ed il LIDAR.

Il **LIDAR** (Light Detection And Ranging) è una tecnica avanzata e versatile nell'ambito del telerilevamento ottico che consiste nell'emettere un raggio laser e misurare la luce retrodiffusa da un bersaglio ottenendo informazioni sulla sua posizione e sulle caratteristiche fisiche e chimiche. Come l'analoga tecnologia radar, la distanza di un oggetto è determinata misurando il tempo di ritardo tra la trasmissione di un impulso e la rivelazione del segnale riflesso. Nel LIDAR l'impulso di luce che viene retrodiffuso, è raccolto da un telescopio, analizzata spettralmente e rivelata in funzione del tempo. La tecnica LIDAR è in grado di fornire un monitoraggio continuo dell'evoluzione della cenere vulcanica con alta risoluzione spazio-temporale. Pertanto, il LIDAR è un utile strumento per validare i modelli di dispersione della nube vulcanica in combinazione con altre osservazioni terrestri e satellitari.

Dalle prime osservazioni dell'aerosol vulcanico prodotto dall'eruzione del vulcano Agung nel 1963 [Fiocco and Grams, 1964], le osservazioni attraverso sistemi LIDAR sono notevolmente aumentate e hanno fornito nuovi dati sulle nubi vulcaniche prodotte da eruzioni in tutte le parti del mondo. Un LIDAR fu installato a bordo di un aereo ConvairC-131 per una ricerca finalizzata a studiare le emissioni vulcaniche dal Mt. Redoubt in Alaska e a determinarne i flussi di particelle e gas [Hobbs et al., 1991]. Un altro LIDAR fu utilizzato per studiare l'aerosol vulcanico emesso nella stratosfera dal Mt. Pinatubo (Filippine) [Di Girolamo et al., 1996], con particolare riferimento al suo effetto sul clima globale [Graf et al., 1993]. Anche sull'Etna sono stati misurati recentemente gli aerosol vulcanici durante l'attività esplosiva del 2001 e del 2002 [Villani et al., 2006, Wang et al., 2008]. Infine è importante sottolineare come durante l'ultima emergenza causata dall'eruzione del vulcano islandese Eyjafjallajökull, misure LIDAR della nube eruttiva hanno permesso di rilevare con precisione la presenza di cenere vulcanica in atmosfera nonché importanti caratteristiche del particolato [Ansmann et al., 2010]. Il LIDAR è quindi potenzialmente capace di misurare la cenere vulcanica emessa da un vulcano ma al momento le misure non sono sistematiche e sono scarse quelle effettuate in prossimità di un vulcano attivo.

In questo rapporto sarà descritto il lavoro svolto per la realizzazione di una stazione fissa al fine di effettuare misure LIDAR delle nubi vulcaniche prodotte durante le eruzioni esplosive dell'Etna. L'Etna è uno dei vulcani più attivi nel mondo ed è considerato tra quelli che maggiormente disturbano il traffico aereo e gli aeroporti, insieme al Sakurajima, in Giappone, al Popocatepetl, nel Messico, e al Soufriere Hills nell'isola di Montserrat, Caraibi. Negli ultimi vent'anni gli episodi di più o meno intensa e più o meno prolungata attività esplosiva sono divenuti frequenti, quindi l'Etna è un perfetto laboratorio naturale per poter testare nuovi strumenti e poter raccogliere dati finalizzati alla validazione e alla calibrazione dei modelli di dispersione delle ceneri vulcaniche. Proprio a causa dell'elevata frequenza dell'attività esplosiva alcuni eventi, anche se di media intensità, hanno provocato la chiusura dell'Aeroporto Internazionale di Catania causando in diverse occasioni una notevole perdita economica. Da quanto esposto è evidente come il miglioramento del sistema di monitoraggio delle nubi vulcaniche può facilitare la gestione del traffico aereo durante le crisi vulcaniche tale da mitigarne i danni al trasporto aereo ed alla salute della popolazione siciliana. Oggi l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo (INGV-OE) è dotato di un efficace sistema di monitoraggio delle nubi di cenere basato sull'utilizzo combinato di diversi strumenti di osservazione come satellite, radar-Doppler, radiosonde ecc. e di previsione basate su cinque modelli dispersione: FALL3D e HAZMAP sviluppato dai colleghi dell'osservatorio vesuviano [Costa et al., 2006, Macedonio et al., 2005], TEPHRA sviluppato dall'università di South Florida [Bonadonna et al., 2005], VolCALPUFF sviluppato da colleghi della Sezione di Pisa [Barsotti et al., 2008], ed una nuova versione del PUFF// (PUFF Parallel) sviluppato a Catania in collaborazione con l'Università dell'Alaska [Scollo et al., 2011]. Inoltre INGV-OE è dotato di un network di spettrometri operanti nell'ultravioletto che permette di

misurare in real-time e con alta frequenza i flussi di SO₂ [Burton et al., 2004]. Tali dati potrebbero essere integrati con quelli LIDAR in modo da avere informazioni complete del rapporto gas/cenere presente all'interno della nube o rilevare delle possibili separazioni tra nube di gas e nube di cenere in atmosfera. Inoltre, i dati LIDAR possono essere combinati con i dati satellitari come quelli del sensore SEVIRI sul satellite METEOSAT, con i dati LIDAR provenienti dal satellite CALIPSO e con i dati MISR (Multiangle Imaging Spectroradiometer), già utilizzati per la ricostruzione tridimensionale dell'aerosol vulcanico durante alcune eruzioni esplosive dell'Etna [Scollo et al., 2010]. L'utilizzo di misure LIDAR delle nubi vulcaniche permetterà quindi di migliorare ulteriormente il sistema di monitoraggio già presente all'INGV-OE poiché sarà in grado di fornire delle informazioni aggiuntive che gli strumenti in questo momento operativi non sono in grado di fare. Sfortunatamente mentre alcuni degli strumenti lavorano in maniera automatica a causa della pericolosità dello strumento (il laser può creare danni alla vista) e delle caratteristiche dello strumento è necessaria la presenza di un operatore. Nonostante questo, l'utilizzo di un sistema LIDAR operante sul vulcano in prossimità della sorgente permetterà un miglioramento delle informazioni che possono essere fornite alle autorità aeronautiche e di protezione civile durante un qualunque evento di tipo esplosivo prodotto dall'Etna.

1. Scelta della postazione di misura

La scelta per l'installazione e la messa a punto di una stazione fissa che permetta di effettuare misure LIDAR è molto delicata in quanto deve soddisfare diversi requisiti. Prima di tutto deve permettere di poter osservare l'emissione di cenere dal vulcano nel caso che venga emessa sia in una modesta o notevole quantità. Deve quindi essere idonea a poter rilevare cenere vulcanica nel maggior numero di casi possibili e questo è funzione ovviamente della direzione prevalente del vento sul territorio etneo. Deve essere anche di facile accesso in maniera tale che il tempo impiegato per mettere in funzione il sistema sia il più breve possibile dal momento in cui inizia a manifestarsi l'attività esplosiva.

Il posto più idoneo per la realizzazione della stazione fissa LIDAR ci è sembrata la sede di "M.G. Fracastoro" dell'INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania a Serra la Nave (SLN). Tale sede è situata a 1730 metri s.l.m. a soli 7 km a SW dalla sommità dell'Etna e permette l'osservazione dei crateri sommitali del vulcano (Figura 1). Presso la sede esistono diverse strutture per l'osservazione astronomica, e in particolare l'edificio (3X) dotato di tre cupole (Figura 1). Questo edificio è stato selezionato per ospitare il LIDAR. La scelta della postazione è anche dettata dalla direzione predominante dei venti sull'Etna. Analisi statistiche mostrano che la nube eruttiva è posizionata maggiormente nel settore SE del vulcano. È facile immaginare che a piccole distanze la caduta di materiale piroclastico rappresenta un pericolo per la salute della strumentazione e da questo punto di vista la posizione SE è sicuramente sfavorevole. Invece, la posizione SW è ottimale per l'osservazione della nube eruttiva in quanto poco soggetta a fenomeni di ricaduta di cenere vulcanica. Inoltre il LIDAR ha la possibilità di effettuare delle scansioni sia in azimuth che in elevazione e la postazione a SLN permette di poter misurare la nube anche lungo l'asse di dispersione. Ovviamente tale scansione non è possibile quando il vento soffia da SW ma fortunatamente questa circostanza è poco probabile.

Sicuramente un ostacolo per effettuare le misure potrebbe essere la copertura nuvolosa. È da sottolineare comunque che studi meteorologici a SLN hanno stimato che la presenza di una copertura nuvolosa tale da non permettere osservazioni astronomiche è di circa il 30% (<http://sln.oact.inaf.it/index.php/it/informazioni-general/meteorologia-e-statistiche.html>).

Inoltre, considerando che la distanza del LIDAR dal cratere è 7 km, lo spessore ottico di una nube meteorologica tale da non permettere al fascio LIDAR di osservare la cenere vulcanica dovrebbe essere superiore a 0.8 e la formazione di tale nube è comunque rara.

Infine la sede dell'INAF è dotata di tutte le infrastrutture necessarie per la gestione della strumentazione e per il suo controllo remoto.

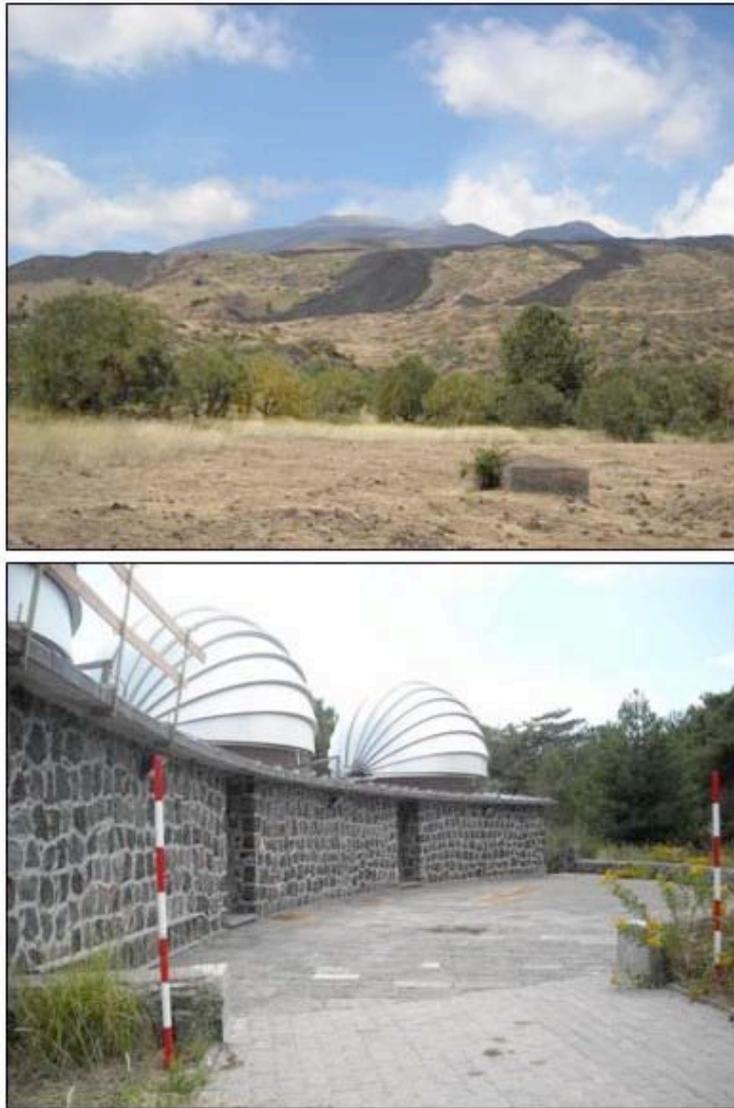


Figura 1. Sede “M.G. Fracastoro” dell’INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania: a) vista dei crateri sommitali dell’Etna; b) vista dell’edificio 3X per le osservazioni astronomiche.

2. Caratteristiche del LIDAR

Il LIDAR utilizzato per effettuare le prime campagne di misura è stato realizzato dall’Unità EARLINET del CNISM, operante presso il Dipartimento di Scienze Fisiche - Università di Napoli Federico II, modificando un prototipo reso disponibile dal consorzio CORISTA. Il LIDAR è costituito da un telescopio, un laser (Figura 2), un sistema di analisi e di rivelazione della radiazione laser retrodiffusa, un personal computer di controllo e una serie di apparati per l’alimentazione ed il controllo. Il dispositivo ha un’altezza di 150 cm e la base di $110 \times 110 \text{ cm}^2$ e può ruotare intorno ad un asse verticale ed ad un asse orizzontale in modo da poter effettuare misure su tutta la volta celeste. Questa caratteristica è molto importante perché permette di poter fare una scansione della nube vulcanica in qualsiasi settore del cielo, se visibile dall’osservatorio. I piedi sono montati su ruote e la lunghezza dei cavi di collegamento con l’alimentatore è di circa 3 m. Lo strumento è collegato all’alimentatore che ha le dimensioni di $60 \times 80 \times 80 \text{ cm}^3$ ed una potenza elettrica che non supera i 5 kW. Il peso del sensore è di circa 40 kg, quello dell’alimentatore è di circa 70 kg.



Figura 2. LIDAR messo in opera.

La Tabella 1 mostra le caratteristiche tecniche del laser Nd:YAG utilizzato dall'apparato:

Lunghezze d'onda	532 nm e 355 nm
Energia per impulso	500 μ J @ 532 nm 400 μ J @ 355 nm
Divergenza del fascio @ 532 nm e @ 355 nm	1 mrad
Frequenza max di ripetizione	1kHz;
Durata dell'impulso @ 532 nm e @ 355 nm	45 ns.

Tabella 1. Caratteristiche del laser Nd:YAG.

Durante le operazioni di setup del laser bisogna fare molta attenzione agli oggetti indossati che possono riflettere/deviare il fascio laser. Le riflessioni anche se parziali del fascio in uscita dal laser sono, infatti, molto pericolose per gli occhi e possono portare a danni irreversibili come la perdita della vista. Proprio per questo motivo è stato redatto uno specifico manuale per la messa in opera dello strumento [Leto et al., 2010]. Per quanto riguarda invece le misure in atmosfera, la divergenza del fascio è sufficientemente grande da far sì che, anche a quote di volo molto basse, la densità di energia del laser sia così bassa da non costituire alcun pericolo per la vista del pilota di velivolo che eventualmente potrebbe intercettarlo.

3. Prima campagna di misura

In questo rapporto descriviamo la campagna di misura effettuata giorno 28/09/2010 presso la sede M.G. Fracastoro dell'INAF. La Figura 3 mostra un momento durante la campagna di misura, il fascio laser è in funzione ed è puntato verso lo zenit.



Figura 3. Campagna di misura effettuata giorno 28/09/2010.

Nella foto non è possibile vedere il fascio laser poiché la lunghezza d'onda è nello spettro del visibile e di giorno è nascosta dalla luce solare. In Figura 4 è mostrata una misura effettuata di notte dove si vede chiaramente la presenza del fascio laser proveniente da una delle cupole dell'osservatorio astronomico dell'INAF.

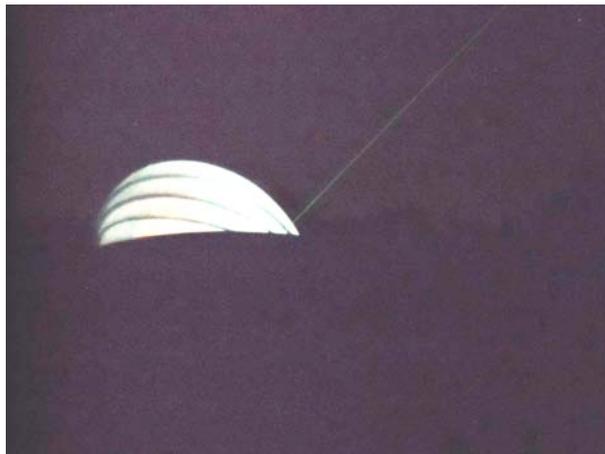


Figura 4. Fascio laser proveniente dalla sede "M.G. Fracastoro" dell'INAF - Osservatorio Astrofisico di Catania.

Questo è stato un primo test per verificare il corretto funzionamento del sistema. Durante tale campagna di misura non c'è stata nessuna emissione di cenere dell'Etna. Comunque, durante le misurazioni, era ben visibile un pennacchio composto da vapore e gas vulcanici. In generale, un limite delle misure lidar è costituito dalla presenza di target otticamente spessi tali da limitarne la distanza sondabile. Nonostante questo, poiché il LIDAR di cui disponiamo permette movimenti in azimuth ed altezza, si può orientare il fascio laser in modo tale da ottenere una mappatura tridimensionale della nube vulcanica in quelle zone in cui c'è una minore concentrazione della cenere vulcanica.

4. Risultati e Conclusioni

Durante queste misure, il LIDAR ha operato ad una sola lunghezza d'onda (532nm) ed ha rivelato il segnale ottico corrispondente alla diffusione elastica ed alla depolarizzazione della luce retrodiffusa. Operativamente, viene inviato in atmosfera un fascio laser polarizzato linearmente e vengono misurate le due componenti della radiazione retrodiffusa, polarizzate rispettivamente nella stessa direzione del laser (componente P) ed in direzione ortogonale (componente S).

Un'opportuna combinazione lineare delle due componenti rappresenta il segnale totale di retrodiffusione. Questo può essere elaborato al fine di determinare il profilo del coefficiente di retrodiffusione (β) ed il coefficiente di depolarizzazione aerosolico (δ) in funzione della distanza dell'apparato LIDAR dalla sorgente di retrodiffusione. Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici in funzione dell'angolo dei profili del coefficiente di backscattering (Figura 5) e della depolarizzazione aerosolica (Figure 6) di un set tra le misure effettuate giorno 28/09/2010. Durante tali misure il LIDAR era posizionato ad un angolo di elevazione di 14.4° ed un angolo di azimut tra 21.9 e 36.9° rispetto al nord.

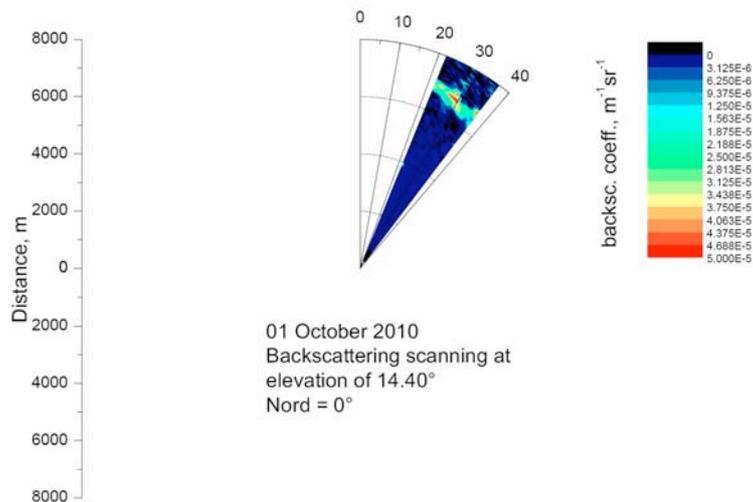


Figura 5. Coefficiente di retrodiffusione (β).

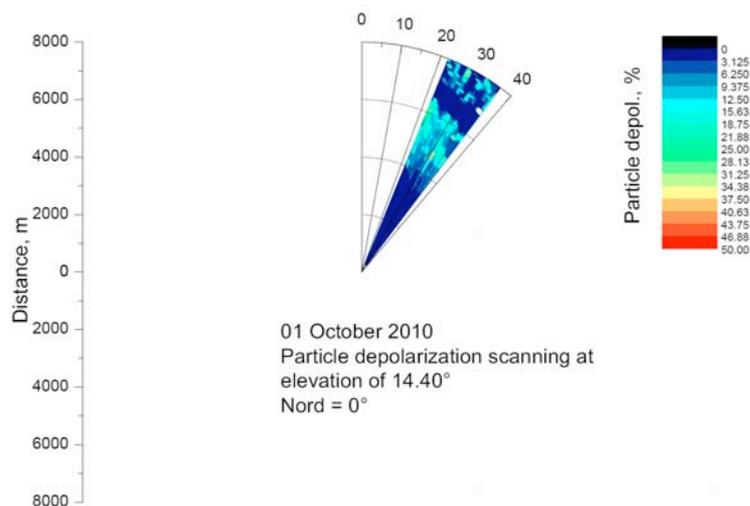


Figura 6. Coefficiente di depolarizzazione aerosolica (δ).

In Figura 5 la mappa del coefficiente di retrodiffusione (β) evidenzia la presenza di una nube vulcanica tra 6.1 e 7.2 km di distanza dalla stazione LIDAR, ed a circa 500 m al di sopra del cratere. La Figura 6, che riporta la mappa della depolarizzazione aerosolica (δ), evidenzia comunque il fatto che nella zona interessata da tale nube (tra 6 e 7 km circa) non è presente cenere vulcanica. Infatti, la percentuale di depolarizzazione è molto bassa (zona scura tra 6 e 7 km circa) mentre in presenza di cenere vulcanica tali valori dovrebbero

essere molto più elevati. In Figura 7 sono mostrati invece i profili verticali del coefficiente di retrodiffusione e di depolarizzazione lineare totale, relativi ad un singolo minuto di acquisizione. Gli errori associati a tali grandezze nelle zone di maggiore interesse non superano il 20% e il 10%. La figura mostra la presenza di alcune strutture aerosoliche fino a circa 6 km di quota (sopra la stazione LIDAR). In particolare la struttura tra 2.5 e 4 km è associata ad un evento di trasporto di sabbie sahariane, confermato da simulazioni numeriche effettuate attraverso il modello HYSPLIT and anche dall'aumento della depolarizzazione totale a quelle quote. Sopra gli 8 km dalla stazione lidar si osserva invece la presenza di un cirro all'interno del quale, data la presenza di cristalli di ghiaccio, la depolarizzazione totale è più alta (Petty et al., 2006). Cirri, polveri e ceneri si possono distinguere in base alle proprietà ottiche: lidar ratio e color index. Con il sistema attuale ad una sola lunghezza d'onda è possibile ottenere una stima del lidar ratio medio all'interno dello strato sondato nei casi in cui il segnale LIDAR sia sufficientemente intenso anche al di là dello strato sondato e che ci sia una zona libera da aerosol. Con altri sistemi che utilizzano più lunghezze d'onda contemporaneamente, entrambi i parametri possono essere misurati direttamente. È comunque da evidenziare che i cirri sono ad altezze significativamente più alte delle nubi dell'Etna e che la polvere del deserto può essere facilmente distinta dalla cenere vulcanica facendo diverse misure che puntano in direzioni differenti perché diversamente dalla cenere vulcanica la polvere del deserto dovrebbe essere distribuita uniformemente intorno al vulcano. Attualmente non si conosce quante volte la polvere del deserto raggiunge SLN. Si sa che lo spazio aereo sopra Napoli è coperto da tale polvere circa 1 giorno su 3. Comunque le concentrazioni sono molto più basse delle concentrazioni di cenere vulcanica vicino alla sorgente anche per semplici emissioni di cenere e quindi la polvere del deserto non crea alcun disturbo alle misure. Facendo inoltre una scansione al di sopra dell'Etna in 3D è possibile individuare la sorgente con precisione.

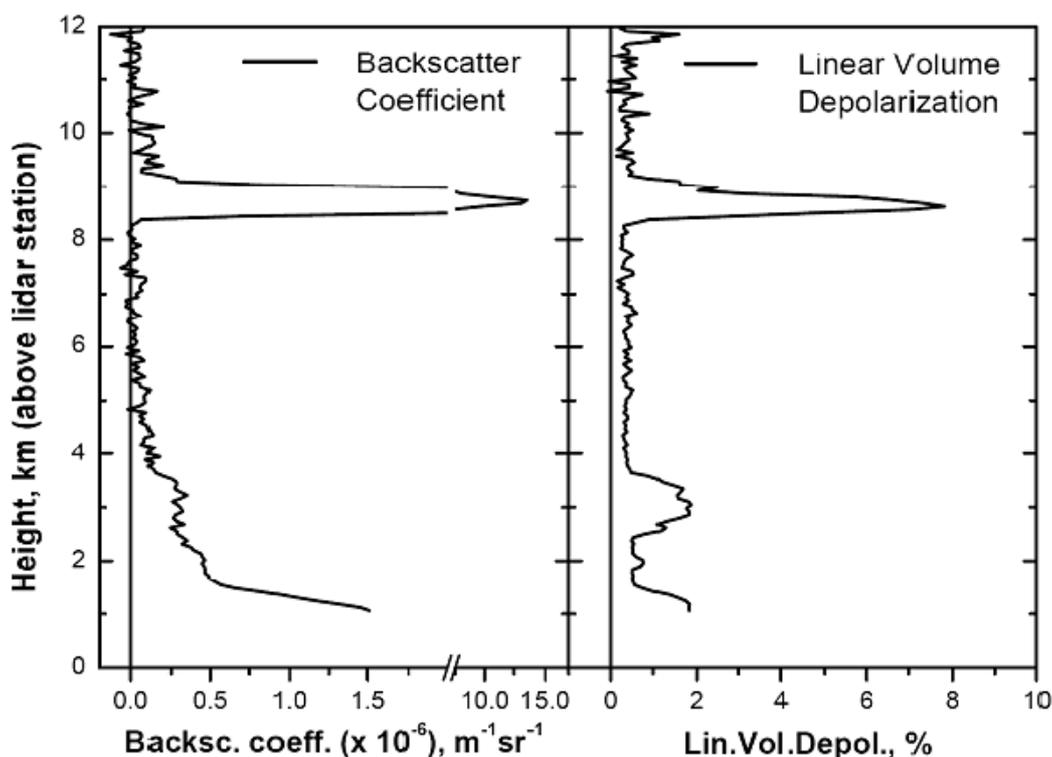


Figura 7. Coefficiente retrodiffusione (β) e di depolarizzazione totale (δ) per una misura in verticale.

In conclusione, in questo rapporto tecnico è stato mostrato il lavoro svolto per la realizzazione di una stazione LIDAR permanente presso la sede “M.G. Fracastoro” dell’INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania a Serra la Nave. Grazie alla campagna di misura già effettuata e ai buoni risultati ottenuti, tale sede è sicuramente idonea alla realizzazione di una stazione LIDAR permanente. Misure di questo tipo sono senz’altro utili perché permetteranno di effettuare una scansione della nube vulcanica durante l’attività esplosiva dell’Etna che, ricordiamo è ultimamente molto frequente. Le misure LIDAR della nube vulcanica

sono molto importanti per la validazione dei modelli numerici di dispersione delle ceneri vulcaniche e quindi per la prevenzione e la mitigazione dei rischi da essa causati.

Ringraziamenti

Si ringraziano gli Ingegneri Gaetano Spata e Michele Prestifilippo dell'INGV - OE e Giancarlo Bellassai, Eugenio Martinetti ed Antonio Distefano dell'INAF - Osservatorio Astrofisico di Catania, che hanno collaborato alla messa in opera del LIDAR. Tale lavoro è un primo passo per la realizzazione di una stazione fissa con un nuovo LIDAR che sarà finanziato dal Programma Operativo Italia-Malta 2007-2013 (progetto approvato codice A1.2.3-62). Parte di questo lavoro è stato finanziato dal progetto FIRB "Sviluppo Nuove Tecnologie per la Protezione e Difesa del Territorio dai Rischi Naturali" UR Monitoraggio delle emissioni dell'Etna.

Bibliografia

- Andò, B., and E. Pecora (2006). An advanced video-based system for monitoring active volcanoes. *Computers & Geosciences*, 32, 85-91.
- Ansmann, A., M. Tesche, S. Groß, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Müller, and M. Wiegner (2010). The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET LIDAR and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany. *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL043809.
- Barsotti, S., Neri, A., Scire, J. S. (2008). The VOL-CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 1. Approach and physical formulation. *J. Geophys. Res.*, 113 (B3), doi:10.1029/2006JB004623.
- Bonadonna, C., Connor, C.B., Houghton, B.F., Sahetapy-Engel, S., Hincks, T., Connor, L. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase rhyolitic eruption at Tarawera, NewZealand. *J. Geophys. Res.* 110, doi:10.1029/ 2003JB002896.
- Burton, M., Caltabiano, T., Salerno, G.G., Mure, F., Condarelli, D. (2004). Automatic measurements of SO₂ flux on Stromboli and Mt. Etna using a network of scanning UV spectrometers. *Geophys. Res. Abstr.* 6, 03970.
- Casadevall, T.J. (1994). Volcanic ash and aviation safety. *Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. U.S. Geological Survey Bulletin, vol. 2047, pp. 450.
- Costa, A., G. Macedonio, and A. Folch (2006). A three dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 241, 634-647.
- Di Girolamo, P., Pappalardo, G., Spinelli, N., Berardi, V., Velotta, R. (1996). LIDAR observations of the stratospheric aerosol layer over southern Italy in the period 1991-1995. *Journal of Geophysical Research*, 101, 18765-18774.
- Dubosclard, G., R. Cordesses, P. Allard, C. Hervier, M. Coltelli, and J. Kornprobst (1999). First testing of a volcano Doppler radar (Voldorad) at Mount Etna, Italy. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3389-3392.
- Fiocco and Grams, 1964 G. Fiocco and G. Grams (1964), Observation of aerosol layer of 20 km by optical radar. *J. Atmos. Sci.* 21, 323-324.
- Graf, H., Kirchner, I., Robock, A., Schult, I. (1993). Pinatubo eruption winter climate effects—model versus observations. *Climate Dynamics*, 9, 81-93.
- Hobbs, P. V., Radke, L. F., Lyons, J. H., Ferek, R. J., Coffman, D. J., Casadevall, T. J. (1991). Airborne Measurements of Particle and Gas Emissions from the 1990 Volcanic Eruptions of Mt. Redoubt. *J. Geophys. Res.*, 96, 18735-18752.
- Leto, G. Pisani, G., Scollo, S., Spinelli, N., Wang, X., 2010, Testing the UNI-NA "LIDARino" facility at the M.G. Fracastoro Station of the INAF-OACT", *Operating instructions V 1.0 (30-09-2010)*, Rapporti interni e tecnici INAF-Osservatorio Astrofisico di Catania, n.2 /2010
- Macedonio, G., Costa, A, and Longo, V., (2005). A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Comput. Geosci.*, 31, 837-845.
- Marzano, F. S., S. Marchiotto, C. Textor, and D.J. Schneider (2010), Model-Based Weather Radar Remote Sensing of Explosive Volcanic Ash Eruption, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 48, 3591-3607.

- Petty, D., Comstock J., Tuner, D., 2006. Cirrus Extinction and Lidar Ratio Derived from Raman Lidar Measurements at the Atmospheric Radiation Measurement Program Southern Site, Sixteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Albuquerque, NM, March 27 - 31, 2006.
- Scollo, S., Folch, A., Coltelli, M., Realmuto, V.J. (2010). 3D volcanic aerosol dispersal: a comparison between MISR data and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 115, doi:10.1029/2009JD013162.
- Scollo, S., Prestifilippo, M., Coltelli, M., Peterson, R. A., Spata, G. 2011. A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts, *Journal Volcanology Geothermal Research*, 200, 129-142.
- Villani, M.G., Mona, L., Maurizi, A., Pappalardo, G., Tiesi, A., Pandolfi, M., D'Isidoro, M., Cuomo, V., Tampieri, F. (2006). Transport of volcanic aerosol in the troposphere: the case study of the 2002 Etna plume. *Journal of Geophysical Research*, 111, D21102.
- Wang et al., (2008). Volcanic dust characterization by EARLINET during Etna's eruptions in 2001-2002. *Atmospheric Environment*, 42, 893-905.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia