

Studio dell'aerosol atmosferico e dello strato mescolato mediante analisi Lidar

Gian Paolo Gobbi, Federico Angelini, Francesca Barnaba, Tony Christian Landi,
Luca Caporaso

ISAC-CNR, Via del Fosso del Cavaliere, 100, 00133 Roma, g.gobbi@isac.cnr.it

RIASSUNTO

Il lidar (radar laser) è un sistema di telerilevamento attivo che permette l'osservazione di molti parametri atmosferici; una delle più tipiche applicazioni è la misura della sezione d'urto degli aerosol atmosferici e della loro forma. L'utilizzo degli aerosol come traccianti rende inoltre possibile la determinazione continua dell'altezza dello strato mescolato. Sono discussi esempi tipici di uno scenario invernale e di uno scenario estivo osservati a Milano, in cui lo strato residuo è ben visibile durante le ore notturne. Sono inoltre confrontate misure di altezza dello strato mescolato ottenute tramite lidar, radiosondaggio e concentrazioni di aerosol da pallone frenato con quelle previste da un modello numerico (MM5).

INTRODUZIONE

Il lidar (acronimo di Light Detection And Ranging) è uno strumento affine al RaDAR (Radio Detection And Ranging), con la differenza che utilizza sorgenti di luce visibile, ultravioletta o infrarossa al posto delle microonde. Grazie alla minore lunghezza d'onda della radiazione impiegata esso permette, rispetto ai radar, il telerilevamento di corpi molto più piccoli, tipicamente delle dimensioni del micron, quali gli aerosol atmosferici. L'osservazione quantitativa del particolato atmosferico è importante in almeno due settori: quello degli studi sul *clima* e quello della *qualità dell'aria*. Per quanto riguarda il primo aspetto, è previsto che l'effetto totale degli aerosol consista in un raffreddamento del pianeta. Sebbene la tipologia e la distribuzione spazio-temporale possa variarne significativamente l'effetto sul clima globale, l'ultimo rapporto dell'IPCC (2007) riporta che gli aerosol di origine antropica (*in primis* solfati, carbonio organico e inorganico, nitrati e polveri) producono un forzante radiativo diretto totale compreso tra -0.9 e -0.1 W/m^2 , ed un forzante indiretto dovuto all'alterazione dell'albedo delle nubi tra -1.8 e -0.3 W/m^2 . Entrambi gli effetti causano raffreddamento, E' tuttavia da notare che le incertezze associate a questi valori sono molto alte, specie se confrontate con i concorrenti gassosi al forzante radiativo, per cui la maggior parte dell'errore sul forzante totale dell'azione antropica è da imputare proprio al ruolo degli aerosol. L'IPCC mostra inoltre che gli aerosol antropici influenzano le precipitazioni e la vita media delle nubi alterandone i processi di nucleazione e crescita.

Riguardo alla qualità dell'aria, è invece ormai assodato che l'inalazione di particolato può provocare problemi di salute, tanto che alcuni organismi internazionali come la World Health Organization hanno fissato delle linee guida per la protezione della salute umana. Parallelamente, dal livello comunitario a quello locale, le normative stanno divenendo via via più restrittive. L'osservazione quali-quantitativa degli aerosol riveste quindi un ruolo di primaria importanza, e la possibilità di rivelarne le proprietà da remoto è una delle sfide del presente. Alcuni progetti scientifici in corso, come Quitsat (www.quitsat.it) dell'Agenzia Spaziale Italiana, sono volti proprio alla determinazione del particolato al suolo sfruttando l'integrazione di misure da satellite, modelli numerici e dati da terra. I sistemi lidar permettono la misura di profili della sezione d'urto degli aerosol, e, mediante alcune assunzioni, anche la stima della concentrazione in volume, superficie e del coefficiente di estinzione. Un'altra possibilità che questi sistemi offrono è la misura diretta dell'altezza dello strato mescolato (MH, da *mixing height*), opportunità utile per stimare la dispersione degli inquinanti, nonché la eventuale presenza di stratificazioni come quelle di polveri desertiche (e.g., Gobbi et al., 2004).

STRUTTURA DI UN LIDAR

Il lidar, come detto, sfrutta la diffusione della luce emessa da una sorgente per determinare la sezione d'urto degli aerosol atmosferici. Poiché sono varie le interazioni possibili tra la luce e i corpi che investe, a seconda del processo di diffusione che si va a rivelare si possono misurare quantità differenti. La diffusione elastica (radiazione rivelata alla stessa frequenza di quella emessa) è il processo più semplice da misurare, e permette la determinazione del profilo verticale della sezione d'urto di retrodiffusione degli aerosol. Utilizzando poi luce polarizzata linearmente è possibile anche una determinazione qualitativa della forma delle particelle. Solo i corpi sferici, infatti, diffondono all'indietro luce polarizzata senza introdurre componenti sul piano ortogonale. La rivelazione simultanea della luce nelle due componenti di polarizzazione permette quindi di stabilire quanto i diffusori sono "lontani dalla sfericità" (lidar elastico a depolarizzazione). Sistemi più complessi sfruttano particolari processi di diffusione della luce. Questi permettono, ad esempio, di misurare i profili di velocità del vento sfruttando l'effetto Doppler, oppure la concentrazione di specie chimiche in atmosfera, mediante la diffusione anelastica (lidar Raman), oppure sfruttando la differente estinzione a due lunghezze d'onda vicine, una delle quali all'interno di una riga di assorbimento e l'altra subito al di fuori (tecnica DIAL).

Tipicamente, un lidar consta di un emettitore, un ricevitore, un rivelatore ed un sistema di acquisizione e salvataggio dati. Se il fascio di luce ed il ricevitore sono vicini - al limite coincidenti - si ha diffusione a 180° e si parla di lidar *monostatici*, altrimenti sono detti sistemi *bistatici* ed occorre tenere conto dell'angolo di diffusione tra onda incidente ed onda diffusa. Illustriamo alcune caratteristiche dei componenti lidar:

L'EMETTITORE

Al giorno d'oggi la quasi totalità dei lidar operanti impiega sorgenti laser, a causa di caratteristiche peculiari quali l'alta fluenza e brevità dell'impulso, la collimazione del fascio e la monocromaticità che li rendono insostituibili. Queste proprietà permettono l'utilizzo di impulsi luminosi molto corti (tipicamente nanosecondi), collimati (<1mrad), di lunghezza d'onda ben definita (larghezza di banda al di sotto dell'Å) e con elevata potenza di picco (~MW), il che consente una drastica riduzione del rumore di fondo, vitale per osservazioni diurne. La misura del *tempo di ritorno* dell'impulso permette la risoluzione in distanza.

IL RICEVITORE

I sistemi più utilizzati per raccogliere la radiazione diffusa all'indietro dal bersaglio sono telescopi standard, con caratteristiche variabili a seconda del tipo di segnale da rivelare.

IL RIVELATORE

Lo strumento più utilizzato per rivelare la luce raccolta dal ricevitore è il tubo fotomoltiplicatore (PMT), grazie alla buona efficienza nella regione UV-Visibile, alla elevata rapidità di risposta e alla buona gamma dinamica. I rivelatori più adatti al vicino infrarosso sono invece i fotodiodi a valanga. Nella maggior parte dei sistemi si impiegano, per ridurre il rumore di fondo, filtri interferenziali, che permettono tipicamente una reiezione fuori banda di un fattore 10^5 - 10^6 , con larghezza di banda fino a circa 0.1 nm.

IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Al sistema di acquisizione sono affidate la risoluzione spaziale e temporale del sistema, che può acquisire mediante conversione analogica/digitale (A/D) o mediante fotoconteggio (PC). La risoluzione spaziale è data, in A/D, dalla frequenza di campionamento del segnale rivelato, che può facilmente arrivare al GHz, o dalla lunghezza delle finestre temporali in PC. Nel complesso un sistema lidar tipico per lo studio di aerosol permette l'acquisizione di profili dal suolo alla tropopausa con risoluzione spaziale dell'ordine della decina di metri e risoluzione temporale dell'ordine dei minuti.

OPERATIVITA' E RISULTATI

La determinazione dei profili di estinzione è uno dei prodotti più facilmente ottenibili mediante lidar. E' da notare, però, che l'analisi dei dati lidar non è automatizzabile oltre un certo punto, e per ottenere profili di estinzione occorre spesso un'analisi manuale. Inoltre, nella gran parte dei sistemi lidar, la procedura di analisi necessita di alcune assunzioni che ne rendono possibile la risoluzione. Il problema risiede nel fatto che il segnale di ritorno è determinato sia dalla sezione d'urto totale di estinzione che da quella di retro diffusione calcolata all'angolo di osservazione, e queste due quantità sono di fatto indipendenti, essendo in generale sconosciute forma, dimensione ed indice di rifrazione degli aerosol. Per minimizzare l'impatto di queste assunzioni esistono molti schemi per l'inversione dei dati lidar, elaborati per sfruttare al meglio le caratteristiche dello strumento a disposizione (e.g., Klett, 1981; Mitev et al., 1992; Barnaba e Gobbi, 2001).

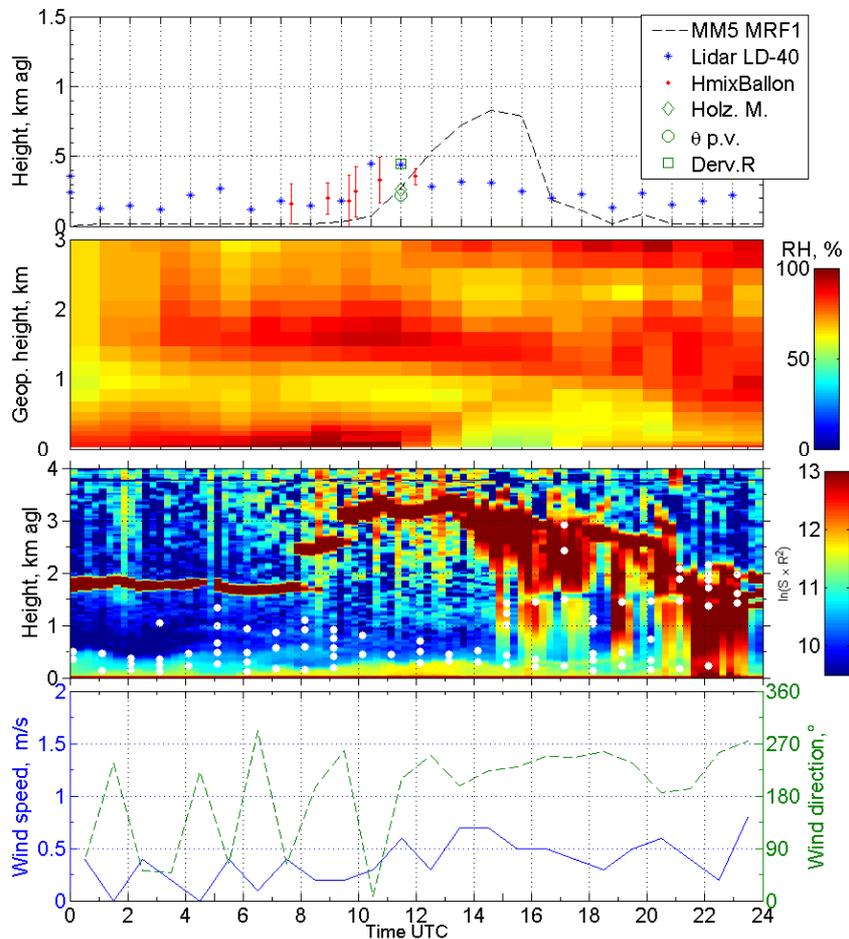
La quota dello strato mescolato è invece ottenibile mediante algoritmi automatizzabili, così da non richiedere analisi continua. L'idea alla base di questi metodi è che l'aerosol, generato in prossimità del suolo, costituisca un buon tracciante dello strato di mescolamento essendo la sua diffusione dovuta ai moti turbolenti della bassa troposfera: pertanto, la determinazione dell'altezza di mescolamento può essere dedotta dal gradiente della concentrazione di aerosol. Le procedure per ricavare la MH da misure lidar sono riconducibili grossomodo a tre diverse categorie, che si basano rispettivamente 1) sulla determinazione dei punti di flesso del segnale corretto per la distanza (RCS, da *range corrected signal*): Endlich, 1979; Flamant et al., 1996), 2) sulla determinazione delle zone in cui la sua varianza temporale è massima (Hennemuth et al, 2006), ovvero 3) sulla ricerca della quota in cui il gradiente supera una soglia di riferimento (Melfi, 1985).

Al fine di esemplificare le potenzialità delle osservazioni lidar verranno descritti alcuni risultati ottenuti nell'ambito di una campagna di misure condotta da gennaio 2007 a febbraio 2008 a Milano Bicocca, nell'ambito dei progetti Quitsat (ASI) ed Aeroclouds (MIUR), con un lidar automatico Vaisala LD-40. In alcuni casi il lidar era affiancato da un contatore ottico di particelle (OPC) installato a bordo di un pallone frenato dell'università Milano Bicocca, capace di misurare la concentrazione di aerosol fino a 500 m di quota. Il sistema, un lidar monostatico operante a 855 nm, ha funzionato per circa 200 giorni acquisendo un profilo ogni 15 s, con risoluzione spaziale di 7.5 m. A causa della bassa potenza del sistema è poi necessaria l'integrazione del segnale su 15 minuti, così da ottenere 96 profili al giorno. L'analisi dei profili ottenuti ha permesso, grazie al confronto con modelli di previsione a mesoscala (MM5) e misure *in situ*, di studiare gli andamenti dello strato limite planetario e della concentrazione di aerosol in un sito semi-centrale come questo di Torre Sarca a Milano.

ANALISI DELLO STRATO MESCOLATO

L'algoritmo implementato per la misura dello strato mescolato rientra nella categoria del punto di flesso: esso ricerca, con risoluzione oraria, la minor quota in cui si ha un minimo locale del logaritmo del RCS. Per ottenere ciò, il segnale viene corretto per una funzione di trasferimento che tiene conto della sovrapposizione del fascio laser con il campo di vista del ricevitore in funzione della quota. E' inoltre possibile il filtraggio dei dati in caso di nebbia al suolo o nubi, in base ad un criterio di soglia sul segnale; se il profilo è accettato, viene calcolata numericamente la derivata spaziale e applicato un filtro di *smoothing* di passo variabile con la quota. Sono poi individuati i minimi locali della derivata, entro un intorno di almeno cinque punti (~35 m), nella regione in cui il segnale è superiore alla media del fondo oltre tre volte la sua deviazione standard. I minimi così individuati vengono filtrati per intensità, cioè vengono accettati solo quelli in cui il valore della derivata, diviso per il logaritmo del RCS, è maggiore di 0.65 e il valore del logaritmo del RCS è comunque maggiore di 9.75, per evitare zone in cui il segnale è basso. In tal caso, infatti, l'assunzione che l'aerosol costituisca un buon tracciante per lo strato mescolato viene meno.

Figura 1: altezza dello strato mescolato del 21 febbraio 2007
2007 02 21 Milano Bicocca



In figura sono mostrati i dati raccolti a Milano Bicocca per il giorno 21 Febbraio 2007. Nella prima figura sono riportati i valori dell'altezza dello strato mescolato ottenuti da lidar, da pallone, da radiosondaggio e calcolati dal modello MM5. Nella seconda è mostrato il valore dell'umidità relativa simulato con il modello, nella terza è visibile il RCS (i punti bianchi indicano le quote dei flessi del segnale). Nell'ultima sono visibili velocità e direzione del vento misurati alla centralina di Milano Brera.

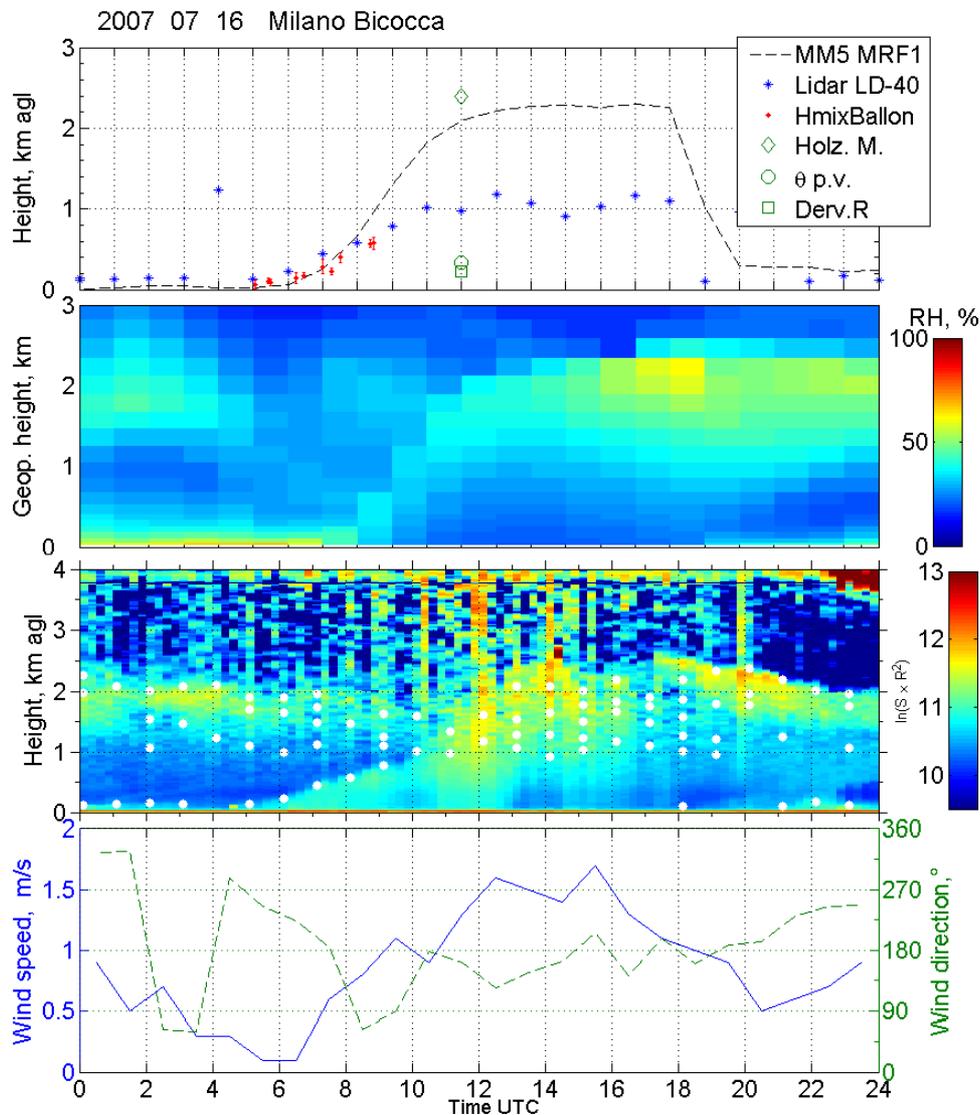
Per filtrare ulteriormente i punti spuri introdotti dal rumore, i profili vengono raggruppati all'interno dell'ora considerata. Le quote dei minimi sono poi riordinate in ordine crescente, e se ne individuano dei gruppi (cluster), in base alla distanza reciproca: quando la distanza supera una soglia dipendente dalla stagione (tra 65 e 115 m), le quote si considerano appartenenti a clusters diversi. I clusters contenenti un solo punto sono scartati. Si calcola quindi la quota media dei singoli clusters, pesando ogni quota dove è presente un minimo con il corrispondente valore della derivata. Questo porta alla determinazione di un numero variabile

di punti per ogni profilo, connessi alla possibile presenza di più strati contemporaneamente. Il valore di MH è infine attribuito alla quota della stratificazione più bassa tra quelle individuate.

Per quanto riguarda gli altri metodi di determinazione della MH, da pallone la quota viene calcolata manualmente ad ogni profilo, valutando la quota di massima variazione della concentrazione numerica di particelle, mentre il modello MM5 restituisce l'altezza di mescolamento come la quota alla quale si annulla l'energia cinetica turbolenta. Con i radiosondaggi, infine, si utilizzano generalmente tre criteri: il criterio di Holzworth (Holzworth, 1964), anche detto *air parcel method*, che si basa sulla ricerca della prima quota in cui la temperatura potenziale virtuale è maggiore della temperatura potenziale virtuale al suolo, oppure si cerca la minima quota in cui i gradienti di temperatura virtuale o di umidità assoluta raggiungono una certa soglia, da determinare sperimentalmente. E' evidente che, per quanto appena detto, sorge un problema fondamentale di definizione dello strato mescolato: è infatti noto che la comparazione di queste misure porta a risultati discordanti a seconda delle condizioni con cui sono applicati i vari metodi (Eresmaa, 2006).

Nelle figure 1 e 2 sono mostrati i grafici del RCS e delle quote dello strato mescolato, rilevate rispettivamente da lidar, pallone, radiosondaggio e simulate con il modello MM5 per i giorni 21-2 e 16-7-2007. Il modello usa una parametrizzazione MRF dello strato limite ed un *land use* con risoluzione di 1x1 km.

Figura 2: altezza dello strato mescolato del 16 luglio 2007



Stessi grafici della figura 1, ma per il giorno 16 luglio 2007.

Sebbene predica con buona accuratezza gli orari di innalzamento e discesa dello strato mescolato, il modello è discorde in valore assoluto con tutte le osservazioni, specialmente nella zona di più intensa attività convettiva. Nel primo caso (febbraio) il modello sovrastima nettamente la MH rispetto al lidar, che invece risulta coerente con le altre osservazioni. Ciò è verosimilmente da imputare al fatto che esso non prevede

correttamente la presenza delle nubi in quota (rilevate dal lidar), portando così ad una sovrastima dell'irraggiamento solare e della conseguente convezione. Nelle ore notturne, viceversa, il lidar prevede una MH maggiore del modello, altezza in parte confermata dalle prime misure da pallone, attorno alle 7 UTC. E' comunque importante notare che strati mescolati particolarmente stabili possono scendere al di sotto della minima quota di rilevamento del lidar (in questo caso ~60m). Questo è un problema ben noto (Eresmaa, 2006), ed è uno dei maggiori ostacoli all'inferenza automatica di MH da lidar, soprattutto in presenza di strati residui (vedi oltre).

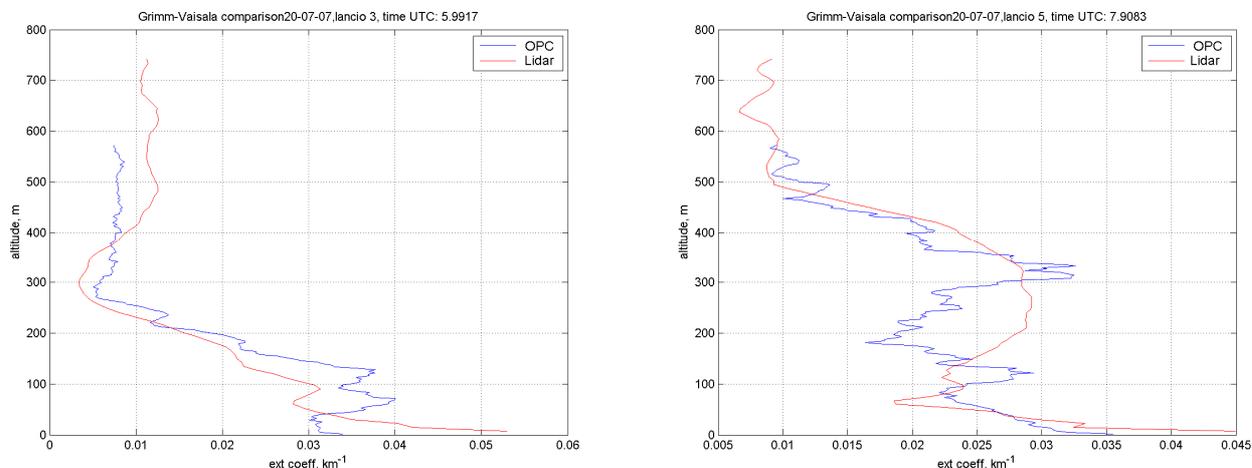
Nel caso di figura 2 (16 luglio), di nuovo le osservazioni sono concordi tra loro mentre il modello sembra sovrastimare la MH. In questo caso il problema sorge dal fatto che il modello sembra considerare come MH il top della *entrainment zone*, mentre il lidar, pur osservando un'ampia zona di turbolenza (presenza di molti flessi), pone la MH nel baricentro della prima (in quota) stratificazione di questa zona. In estate si è spesso osservato lo 'svuotamento' degli strati più bassi nel periodo di convezione intensa. Come visibile in figura 2, ciò accade in concomitanza con l'aumento del vento al suolo, in probabile regime di brezza. La sovrastima (verificata) dell'intensità di questi venti da parte di MM5 può costituire un altro fattore che porta ad una MH prevista più alta dell'osservata. E' da notare che, nell'intera campagna di misure, la chiusura dello strato mescolato non è quasi mai rilevata chiaramente dal lidar.

Dai dati raccolti a Milano, si vede che in estate si può avere fino al 50% dello spessore ottico al di sopra dei 1500 m, mentre in inverno lo stesso valore si trova a circa 500 m. Questo particolare in quota, frutto del sollevamento diurno, forma lo strato residuo, particolarmente evidente nelle ore notturne. Questo strato può "confondere" l'identificazione automatizzata della MH, soprattutto in condizioni di collocazione dello strato stabile vicino alla minima quota rilevabile dal lidar. Lo strato residuo è inoltre un ostacolo alla schematizzazione della distribuzione di aerosol descritta in termini di profilo esponenziale (Kaufman, 1983), caratterizzabile quindi da una sola coppia di parametri: concentrazione al suolo ed altezza di scala.

Per quanto riguarda i valori di MH ottenuti da radiosondaggio, nelle figure 1 e 2 sono riportate le altezze calcolate con i tre metodi sopra citati. Si nota che i radiosondaggi forniscono valori molto discordi tra loro e con le osservazioni, specialmente nel caso estivo. Data la natura 'istantanea' della misura è altresì evidente che le altezze calcolate mediante radiosondaggio non possono essere considerate rappresentative della giornata, anche perché variazioni della copertura nuvolosa potrebbero alterare rapidamente la MH. C'è tuttavia da notare che il metodo di Holzworth fornisce in media valori di MH simili al modello, e ciò discende dal fatto che entrambi si basano sul profilo della temperatura potenziale.

E' infine da notare che, d'estate, si osserva spesso un forte aumento del segnale tra i 1000 e i 2000 m di quota nelle ore centrali della giornata, fenomeno connesso alla condensazione di acqua al culmine dell'attività convettiva. A tale proposito, va sottolineato come il segnale lidar sia determinato sia dalla concentrazione che dalla grandezza degli aerosol: in condizioni di forte umidità il segnale aumenta a causa della condensazione. Ciò non rappresenta un problema nella determinazione di MH in quanto, generalmente, anche la distribuzione dell'umidità relativa mostra una rapida diminuzione nel passaggio tra lo strato mescolato e la troposfera libera.

Figura 3: Il profilo di estinzione



In figura è mostrato il profilo di estinzione, a 855nm, misurato mediante lidar (in rosso), e calcolato dai dati di distribuzione dimensionale dell'aerosol misurata dall'OPC a bordo del pallone frenato (in blu). I grafici si riferiscono al 20 luglio 2007, a Milano Bicocca, rispettivamente alle ore 6 e 8 UTC.

ANALISI DELL'AEROSOL

Come accennato in precedenza, un'opportuna analisi del segnale lidar permette il calcolo del profilo del coefficiente di estinzione associato all'aerosol e, facendo ricorso ad un modello statistico, anche della concentrazione di volume e superficie. L'integrale del profilo di estinzione coincide con lo spessore ottico dell'aerosol, parametro misurato sia da satellite che da fotometri a terra. In figura 3 è mostrato il confronto tra i valori di estinzione misurati tramite lidar e quelli simulati mediante un modello di diffusione di Mie a partire dai dati del contatore ottico montato sul pallone. Si nota un ottimo accordo, tenendo conto che il segnale da pallone è acquisito ogni 2 m di quota, mentre il segnale lidar, che ha una risoluzione intrinseca di circa 7.5 m, viene sottoposto ad una media corrente su 50 m per migliorare il rapporto segnale/rumore. L'andamento 'non esponenziale' dei profili è messo in evidenza non appena la convezione è ben innescata (ore 8 UTC).

CONCLUSIONI

Sono state introdotte le caratteristiche principali della tecnica lidar, con particolare riferimento a misure di aerosol in ambiente urbano condotte a Milano per un totale di circa 200 giorni nel periodo gennaio 2007-febbraio 2008. Dall'analisi di alcuni di questi dati è stata calcolata l'altezza dello strato mescolato (MH) con cadenza oraria. Questa è stata confrontata con le previsioni di MH fornite dal modello MM5, con quella calcolata da misure su pallone frenato e con quelle calcolate con tre tecniche diverse da radiosondaggi. Sono emerse discordanze tra i dati osservati e quelli simulati, le cui cause sono, probabilmente, da un lato l'imprecisione del modello nel prevedere i campi di vento e/o la formazione delle nubi/nebbie e, dall'altro, il riconoscimento automatico della quota di mescolamento difficoltoso a causa del ridotto campo di vista del lidar alle basse quote. Questo fatto è responsabile, in alcuni casi, della inferenza di MH molto alte (confusione con lo strato residuo) in presenza di strati stabili al di sotto della minima quota rilevabile dal lidar. Dall'analisi è comunque evidente che, sebbene soffra di alcune limitazioni, il lidar è un potente strumento per la determinazione operativa dell'altezza di mescolamento e del profilo dell'aerosol in tutta la troposfera.

RINGRAZIAMENTI. Queste ricerche sono state condotte nell'ambito dei progetti QUITSAT, finanziato dall' Agenzia Spaziale Italiana e AEROCLOUDS, finanziato dal Ministero per l'Istruzione, l'Università e la Ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- Barnaba, F., and G. P. Gobbi, 'Lidar estimation of tropospheric aerosol extinction, surface area and volume: Maritime and desert-dust cases', *J. Geophys. Res.*, 106(D3), 3005–3018, 2001
- Eresmaa, N., A. Karppinen, S. M. Joffre, J. Räsänen, and H. Talvitie: 'Mixing height determination by ceilometer', *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1485–1493, 2006
- Flamant, C., Pelon, J., Flamant, P., and Durand, P.: 'Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer', *Bound.-Lay. Meteorol.*, 83, 247–284, 1997
- Gobbi, G. P., F. Barnaba, and L. Ammannato, 'The vertical distribution of aerosols, Saharan dust and cirrus clouds in Rome (Italy) in the year 2001', *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 351-359, 2004
- Kaufman, Y. J., and R. S. Fraser, 'Light extinction by aerosols during summer air pollution', *J. Appl. Met.*, Vol. 22, pp. 1694-1706, 1983
- Hennemuth, B., and A. Lammert: 'Determination of atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter', *Boundary-Layer Meteorol.* 120: 181–200, 2006
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate change 2007, The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*, www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4-wgl-spm.pdf, 2007.
- Klett, J. D., 'Stable analytical inversion for processing lidar returns', *Appl. Opt.*, 20, 211-220, 1981
- Melfi, S. H., Spinhirne, J. D., Chou, S.-H., and Palm, S. P.: 'Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean', *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 24, 806–821, 1985
- Mitev, V. M., I. V. Grigorov, and V. B. Simeonov, 'Lidar measurements of atmospheric aerosol extinction profiles: A comparison between two techniques—Klett inversion and pure rotational Raman scattering methods', *Appl. Opt.*, 31, 6469-6474, 1992
- WHO - *Air Quality Guidelines for Europe - Second Edition*, WHO Reg. Publ., European Series, No. 91