

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
"FEDERICO II"**



FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA
IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZA E INGEGNERIA DELLO SPAZIO
"LUIGI G. NAPOLITANO"**

**PROCESSAMENTO DI DATI LIDAR
PER L'ANALISI DELL'EVOLUZIONE
DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO URBANO.**

RELATORI

Ch.mo Prof. Ing.
Antonio Moccia

Dott.ssa
Giulia Pica

CANDIDATA

Maria Luisa Grappone
matr. 347/316

Anno Accademico 2004/2005

INDICE

INDICE	1
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1	
L'ATMOSFERA TERRESTRE	8
1.1 ATMOSFERA TERRESTRE E SUA COMPOSIZIONE	9
1.2 CARATTERISTICHE STRUTTURALI DELL'ATMOSFERA TERRESTRE	11
<i>1.2.1 Densità e pressione atmosferica</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2 Temperatura atmosferica</i>	<i>16</i>
1.3 AEROSOL	19
<i>1.3.1 Classificazione degli aerosol</i>	<i>21</i>
<i>1.3.2 Meccanismi di rimozione degli aerosol</i>	<i>23</i>
1.4 LO STRATO LIMITE PLANETARIO	25
<i>1.4.1 Caratterizzazione del PBL</i>	<i>27</i>
<i>1.4.2 Struttura del PBL</i>	<i>29</i>
CAPITOLO 2	
LA TECNICA LIDAR DI INDAGINE ATMOSFERICA	33
2.1 ASSORBIMENTO E SCATTERING	34
2.2 TECNICHE DI MONITORAGGIO ATMOSFERICO	39

2.3	LA TECNICA LIDAR	41
2.4	EQUAZIONE LIDAR	43
2.5	DESCRIZIONE DEI PARAMETRI OTTICI	49
2.5.1	<i>Parametri ottici in condizione di diffusione elastica</i>	50
2.5.2	<i>Parametri ottici in condizione di diffusione anelastica</i>	53
2.6	INVERSIONE DELL'EQUAZIONE LIDAR	55
2.6.1	<i>Metodo analitico di Ansmann</i>	56
2.6.2	<i>Metodo analitico di Klett</i>	58
2.6.3	<i>Metodo analitico di Wandinger</i>	61

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO ED

	ANALISI DI UNA MISURA	64
3.1	APPARATO SPERIMENTALE: IL LIDAR MOBILE	64
3.1.1	<i>Sorgente laser</i>	66
3.1.2	<i>Sistema di trasmissione ottica</i>	68
3.1.3	<i>Sistema di ricezione ottica</i>	69
3.1.4	<i>Sistema di selezione ottica</i>	70
3.1.5	<i>Sistema di rivelazione</i>	71
3.1.6	<i>Sistema di acquisizione</i>	72
3.2	STRUMENTAZIONE COMPLEMENTARE	73
3.3	DESCRIZIONE DI UNA MISURA LIDAR	74

CAPITOLO 4

DESCRIZIONE DEL SOFTWARE SVILUPPATO	80
4.1 MANUALE D'USO	81
4.1.1 <i>Generalità</i>	81
4.1.2 <i>Guida all'uso</i>	82
4.2 LISTATO DEL PROGRAMMA	84
4.2.1 <i>Segnale_minuto</i>	85
4.2.2 <i>Leggi_bin</i>	88
4.2.3 <i>Segnale_min</i>	95
4.2.4 <i>Media_minuto</i>	97
4.2.5 <i>Media</i>	97
4.2.6 <i>Sottrai_fondo</i>	98
4.2.7 <i>Binning_8_punti</i>	98
4.2.8 <i>RCS_30min</i>	99
4.2.9 <i>Import_molecolare</i>	106
4.2.10 <i>Media_30min</i>	107
4.2.11 <i>Import_density</i>	107
4.2.12 <i>Import_quote</i>	108
4.2.13 <i>Trova_posiz</i>	108
4.2.14 <i>Integrale</i>	109
4.2.15 <i>Beta_integrato</i>	110
4.2.16 <i>Rcs_minuto_mappe</i>	111
4.2.17 <i>Rcs_min_mappe</i>	114
4.2.18 <i>RCS_mappe</i>	116
4.3 DOCUMENTAZIONE DEL PROGRAMMA	118
4.3.1 <i>Leggi_bin</i>	118

4.3.2	<i>Segnale_min</i>	121
4.3.3	<i>Segnal_minuto</i>	122
4.3.4	<i>Rcs_30min</i>	123
4.3.5	<i>Beta_integrato</i>	126
4.3.6	<i>RCS_minuto_mappe</i>	126
4.3.7	<i>RCS_mappe</i>	127

CAPITOLO 5

SOFTWARE M.A.P.S : ANALISI DEI DATI 128

5.1	MAPPA RCS	128
5.2	EVOLUZIONE DELLO SPESSORE DEL PBL	131
5.3	COEFFICIENTE DI BACKSCATTERING AEROSOLICO	132

CONCLUSIONI 135

BIBLIOGRAFIA 137

INTRODUZIONE

“Si impongono misure urgenti contro l’inquinamento atmosferico nei centri urbani ed è pertanto necessario intensificare le attività di ricerca in materia d’ambiente”.

Questo è quanto dichiarato da Philippe Busquin, Commissario europeo per la Ricerca. Ed è proprio seguendo questa linea di principio che, negli ultimi anni, si sono registrati notevoli sviluppi nello studio dell’evoluzione del clima globale ed, in particolar modo, dell’inquinamento atmosferico urbano.

Il particolato atmosferico, sia di origine antropica che naturale, rappresenta infatti l’inquinante a maggior impatto nelle aree urbane, con conseguenze piuttosto preoccupanti non solo sul clima e sull’ambiente, ma anche sulla salute di uomini ed animali.

L’immissione in atmosfera, quindi, di diverse sostanze, in concentrazioni tali da produrre effetti dannosi, ha spinto verso lo studio di metodi di indagine atmosferica in grado di determinare, per l’appunto, la concentrazione di tali inquinanti nonché effettuare un più efficace monitoraggio della qualità dell’aria.

Un metodo particolarmente adatto allo studio del particolato urbano è quello che si basa sulla tecnica LIDAR, acronimo di LIght Detection And Ranging, che consente di ottenere profili verticali ad alta risoluzione di aerosol e particelle in sospensione a differenti quote.

Nell'ambito delle attività per il monitoraggio dell'aria è stato realizzato presso il Consorzio Co.Ri.S.T.A, Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati, un prototipo di Lidar mobile portatile, di utilizzo semplice e sicuro, in grado di monitorare il particolato atmosferico.

Durante il mio lavoro di tesi, l'obiettivo principale è stato quello realizzare, attraverso lo studio della tecnica lidar di indagine atmosferica, un software di facile utilizzo in grado di elaborare in tempo reale i dati forniti durante una campagna di misure LIDAR di concentrazione di particolato per l'analisi dell'evoluzione degli aerosol in atmosfera.

La presente tesi è strutturata in cinque capitoli.

Nel **primo capitolo** viene presentata una descrizione dell'atmosfera e dei suoi costituenti, con particolare attenzione alla sua stratificazione ed ai tipi di aerosol presenti.

Nel **secondo capitolo** vengono introdotti i principali meccanismi di interazione tra la radiazione elettromagnetica e le particelle atmosferiche e, quindi, i diversi processi di diffusione-scattering che sono alla base del funzionamento della tecnica lidar.

Segue poi, una descrizione dettagliata della tecnica lidar e degli algoritmi utilizzati per l'inversione dell'equazione che ne descrive il funzionamento, allo scopo di ricavare i coefficienti di retrodiffusione ed estinzione che contengono la maggior parte delle informazioni sulle proprietà fisiche degli aerosol.

Nel **terzo capitolo** viene presentata una descrizione dettagliata dell'apparato sperimentale e della procedura di acquisizione di una misura lidar, nonché l'analisi dei dati da questa ricavati attraverso il metodo di Klett, uno dei metodi di inversione dell'equazione lidar.

Nel **quarto capitolo** viene descritto il software da me realizzato per l'analisi e l'elaborazione di dati acquisiti in campagne di misure lidar al fine di ottenere gli andamenti del profilo lidar, del segnale molecolare e del coefficiente di retrodiffusione aerosolico, nonché mappe qualitative indicanti la presenza e l'evoluzione del particolato in atmosfera.

Nel **quinto capitolo**, infine, vengono presentati tutti i risultati ottenuti con il software realizzato nell'ambito di questa tesi e vengono mostrati, quindi, gli andamenti di tutte le grandezze che risultano di fondamentale importanza nello studio dell'analisi del particolato atmosferico.

CAPITOLO 1

L'ATMOSFERA TERRESTRE

Nel seguente capitolo viene presentata una descrizione dell'atmosfera terrestre e dei suoi principali costituenti, effettuando un'analisi dettagliata delle variabili fisiche e chimiche che influenzano, in maniera rilevante, le caratteristiche termiche e strutturali dell'atmosfera stessa.

Tra le particelle presenti in atmosfera, una trattazione a parte viene dedicata agli aerosol, a causa della loro importanza nella vita umana, nei processi che si verificano in atmosfera e per l'influenza che questi esercitano sulle proprietà fisiche di quest'ultima.

Un'attenzione particolare, infine, è riservata al limite inferiore della troposfera, ovvero allo strato limite planetario, di cui vengono presentate le caratteristiche principali ed analizzata la struttura.

1.1 Atmosfera terrestre e sua composizione

L'atmosfera terrestre rappresenta lo strato gassoso che circonda il nostro pianeta. Essa può essere considerata come un gigantesco e complesso sistema termodinamico, la cui struttura, composizione e dinamica influenzano, in maniera rilevante, la morfologia della superficie del pianeta. L'atmosfera terrestre è costituita da una miscela di gas che, in base alla loro diversa concentrazione (tabella 1.1), possono essere classificati come *permanenti o variabili*. [1]

I gas permanenti si estendono fino a circa 100 km di quota e sono così definiti in quanto formano una miscela omogenea e stabile, ovvero le proporzioni relative di ogni singolo componente sono le stesse ovunque. Appartengono a tale categoria i principali costituenti dell'atmosfera, l'azoto e l'ossigeno molecolare, l'argon, il neon e l'elio in tracce. I gas variabili, invece, sono presenti in concentrazioni che variano in tempi anche molto brevi e tale variabilità è dovuta principalmente alla loro partecipazione ad una serie di processi fisico-chimici, quali interazione e reazioni fotochimiche con altri gas e particelle presenti in atmosfera.

I maggiori costituenti di questa categoria di gas sono l'acqua H_2O , l'ozono O_3 , l'anidride carbonica CO_2 , il metano CH_4 e i composti dello zolfo e dell'azoto. Questi gas sono responsabili di alcune delle caratteristiche più importanti dell'atmosfera terrestre, intervengono a determinare il bilancio termoradiativo della Terra e determinano un ambiente in cui la vita è possibile.

Tabella 1.1 Composizione dell'aria secca per unità di volume (Brimblecombe,1996)

Gas	Rapporto di mescolamento^a
<i>Azoto, N₂</i>	78.084 %
<i>Ossigeno, O₂</i>	20.946 %
<i>Argon, Ar</i>	0.934 %
<i>Anidride Carbonica, CO₂</i>	360 ppmv (variabile) ^b
<i>Neon, Ne</i>	18.18 ppmv
<i>Elio, He</i>	5.24 ppmv
<i>Metano, CH₄</i>	1.6 ppmv
<i>Kripton, Kr</i>	1.14 ppmv
<i>Idrogeno, H₂</i>	0.5 ppmv
<i>Biossido di Azoto, N₂O</i>	0.3 ppmv
<i>Xenon, Xe</i>	0.087 ppmv

- a. ppmv = parti per milione di volume: 1 ppmv equivale a 1 cm³ di gas puro in 1 m³ di aria.
- b. La concentrazione di CO₂ è variabile durante l'anno a causa dell'attività fotosintetica.

Ad esempio l'ozono è il gas che assorbe radiazione ultravioletta di origine solare con lunghezza d'onda inferiore a 300nm e pertanto contribuisce a schermare i tessuti biologici da radiazioni potenzialmente dannose. Il vapor d'acqua, l'anidride carbonica e, in misura minore il metano, sono i gas che fanno sì che attraverso l'effetto serra la temperatura della bassa atmosfera renda questa regione abitabile.

Altri costituenti importanti dell'atmosfera sono gli aerosol, particelle sia solide che liquide, di diversa forma, dimensione e composizione, che si trovano in sospensione in atmosfera in quantità variabili.

Tali particelle hanno un'influenza notevole sul tempo meteorologico poiché costituiscono i nuclei attorno ai quali il vapor d'acqua si condensa, dando luogo alla formazione di nebbia, nubi, pioggia e neve, e influiscono inoltre sulle proprietà di trasferimento radiativo, in particolare sulla visibilità, dell'atmosfera.

1.2 Caratteristiche strutturali dell'atmosfera terrestre

L'atmosfera terrestre è caratterizzata da una stratificazione che determina, in base all'altitudine, varie zone, diverse per densità, pressione e temperatura. Quello che si nota è che la densità dell'atmosfera diminuisce rapidamente con l'aumentare della quota, seguendo una legge di tipo esponenziale. La pressione, come la densità, segue un andamento di tipo esponenziale decrescente con la quota, dovuto a fattori elementari come la forza di gravità.

La temperatura invece, ha un andamento variabile con la quota che dipende da diversi fattori, quali le bande di assorbimento dei vari costituenti e la loro densità. Infatti alcuni componenti minoritari dell'atmosfera sono presenti in quota in modo non uniforme e, poiché ognuno di essi ha una differente capacità di assorbire a diverse lunghezze d'onda, il calore acquisito con l'assorbimento sarà dipendente dalla quota. La dipendenza, dunque, dei parametri quali la densità, la pressione e la temperatura dalla quota è dovuta alle forti correlazioni tra le proprietà fisico-chimiche dei fenomeni atmosferici e l'altitudine, e ciò

rende possibile tracciare una stratificazione dell'atmosfera, come quella riportata in figura 1-1, dove ciascuno strato rappresenta una sfera che circonda il globo terrestre.[2]

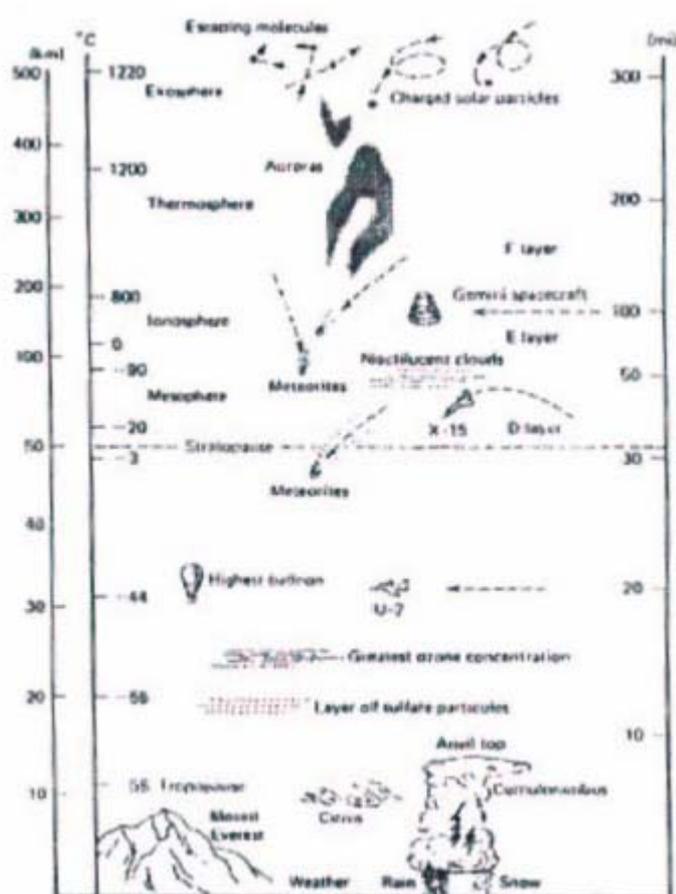


Figura 1-1: Sezione schematica dell'atmosfera terrestre in relazione alla quota

1.2.1 Densità e pressione atmosferica

L'atmosfera terrestre è un sistema gassoso in equilibrio dinamico, che circonda in modo stabile l'intera superficie del nostro pianeta, ed ha un comportamento molto simile a quello di un gas ideale, cioè a piccole variazioni di pressione corrispondono grandi variazioni di volume e quindi di densità. La pressione, quindi, risulta il fattore più importante per la determinazione dell'andamento con la quota della densità atmosferica, (Figura 1-2), che risulta essere direttamente proporzionale alle pressione [3].

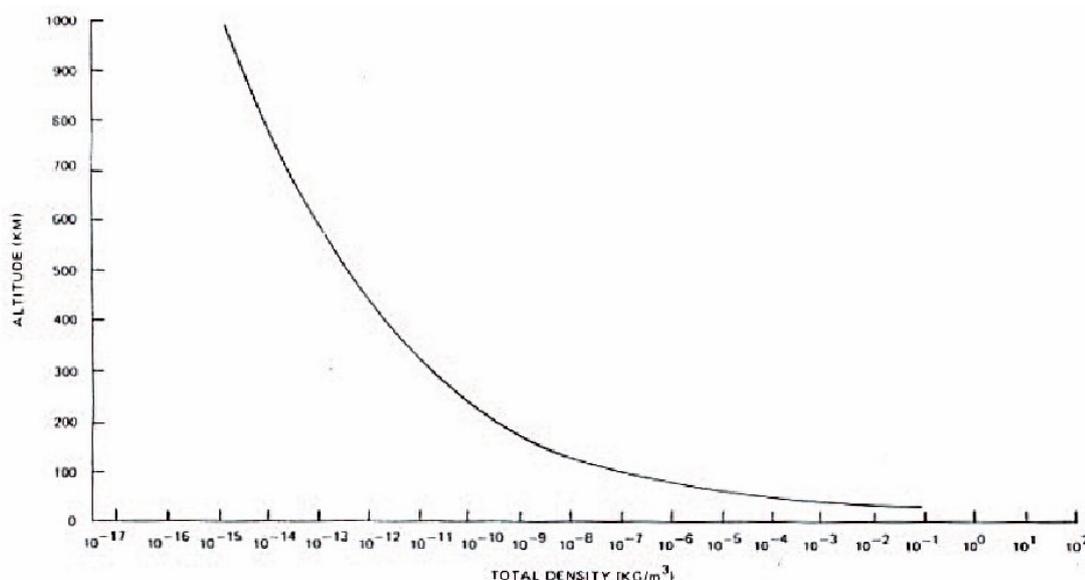


Figura 1-2: Densità atmosferica in funzione della quota

Per mostrare la dipendenza della densità dalla pressione atmosferica, si consideri l'equazione di stato per N molecole di gas ideale, che possono essere diverse per massa e specie chimica:[4]

$$PV = NkT \quad (1.1)$$

dove P , V , T sono rispettivamente pressione, volume e temperatura termodinamica assoluta del gas, $k = R/N_A$ è la costante di Boltzmann, essendo R la costante universale dei gas perfetti, pari a $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$, e $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ il numero di Avogadro.

Dalla relazione (1.1) si ricavano varie definizioni di densità:

- densità numerica $\rho_n \equiv \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}$
- densità molare $\rho_m \equiv \frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$
- densità di massa $\rho \equiv \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$

che mostrano come l'andamento della densità stesso sia legato a quello della pressione e della temperatura attraverso le costanti R e M , essendo quest'ultima la massa molare media dell'atmosfera, pari a circa 28.966 gmol^{-1} . L'andamento della pressione con la quota è legato, a sua volta, alla forza di gravità, che comprime stabilmente le molecole di gas in uno strato contiguo alla superficie terrestre. Per ricavare una stima di tale andamento, si consideri l'equazione dell'equilibrio idrostatico, in base alla quale la pressione ad ogni quota è determinata dalla forza peso esercitata dalla massa della colonna d'aria sovrastante, nell'ipotesi semplificatrice di atmosfera isoterma ed omogenea. Tale relazione, nota anche come Legge di Stevino, si scrive:

$$dP = -\rho g dz \quad (1.2)$$

dove

- dP è l'incremento di pressione dovuto all' incremento dz di quota
- g è l'accelerazione di gravità
- ρ è la densità di massa dell'aria

- il segno meno indica che la pressione decresce con l'altezza z .

Applicando l'equazione di stato dei gas perfetti alla legge di Stevino ed integrando per un dato intervallo di quota, in cui massa molare media e temperatura si mantengono costanti, e per un dato intervallo di pressione corrispondente a tali quote, si ottiene sia per la densità che per la pressione un andamento decrescente esponenzialmente con la quota:

$$P(z) = P_{SL} e^{-z * \beta} \quad (1.3)$$

dove

- P_{SL} è la pressione al livello del mare
- $\beta = g / (RT_0)$ è il fattore di scala dell'atmosfera, assumendo per T_0 il valore medio costante della temperatura della superficie terrestre, pari a 15 °C (288 °K).

Si osserva che l'approssimazione di considerare la temperatura atmosferica costante non si discosta molto dalla realtà, poiché T_0 rappresenta una media delle temperature effettive alle varie quote di atmosfera.

1.2.2 Temperatura atmosferica

Sebbene la pressione costituisca il fattore più importante da cui dipende la densità, anche la temperatura gioca un ruolo decisivo nell'andamento della densità, in quanto aumenti di temperatura implicano aumenti di volume e conseguenti diminuzioni di densità. In figura 1-3 è riportato il tipico profilo verticale della temperatura, che mostra come l'atmosfera terrestre sia schematizzabile in strati, ognuno dei quali presenta un andamento lineare della temperatura con la quota e risulta separato dal successivo da zone di atmosfera isoterma, la cui estensione è difficile da definire soprattutto alle quote più alte e risulta variabile sia con le stagioni che con la latitudine.

Il passaggio da uno strato all'altro è contraddistinto da un cambiamento di segno del gradiente della temperatura.

Procedendo dalla superficie terrestre fino a circa 10 ÷ 15 km di quota, si trova la *troposfera*, caratterizzata da una diminuzione verso l'alto della temperatura, con un tasso più o meno regolare dell'ordine di circa 6.5 °C/km, fino ad un valore prossimo a -56 °C. Quest'andamento è facilmente spiegabile quando si pensi che l'atmosfera in vicinanza della parte inferiore viene riscaldata dalla superficie del pianeta e in misura minore direttamente dal sole.

In pratica la superficie assorbe la radiazione solare e quella infrarossa proveniente dall'atmosfera e si scalda e l'atmosfera stessa, a contatto con la superficie, si scalda a sua volta e le masse così riscaldate si sollevano, espandendosi adiabaticamente, e quindi si raffreddano.

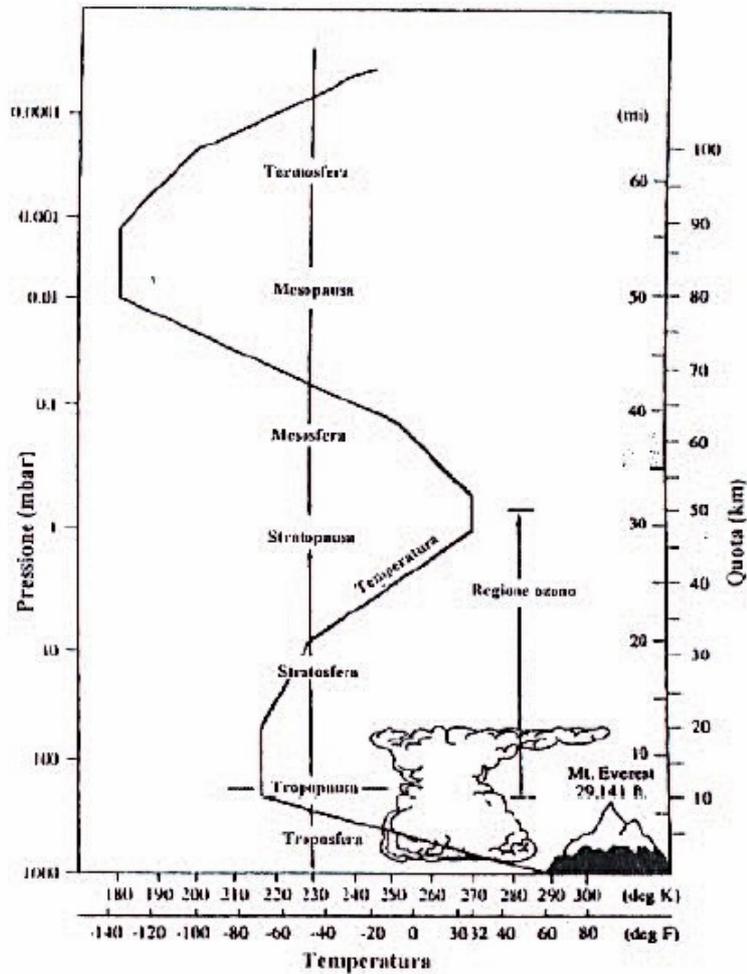


Figura 1-3: Profilo verticale medio della temperatura

La *tropopausa* è la zona di transizione isoterma dell'atmosfera che costituisce lo strato limite superiore della troposfera.

L'altezza della tropopausa, nel periodo estivo, può variare da 15 a 18 km sulla zona dei tropici, e da 8 a 10 km sulle zone polari; nel periodo invernale, invece, può variare da 20 km circa sulla zona dei tropici fino ad annullarsi ai poli. Al di sopra della tropopausa, superato il minimo, la temperatura aumenta in modo costante con la quota fino a circa 50 km, nella regione che viene chiamata *stratosfera*.

Queste due regioni sono quelle decisamente più importanti dal punto di vista pratico in quanto nella troposfera si svolgono la maggior parte delle attività umane (includendo anche i voli con jet che viaggiano attorno ai 10-12 km) e la stessa regione è sede dei fenomeni meteorologici che ci riguardano più da vicino. La stratosfera invece ricopre un ruolo molto importante dal punto di vista radiativo. Particolarmente determinante è l'attività svolta dallo strato di ozono, posto ad una quota di 22 km dal livello del mare; da esso dipende, con molta probabilità, l'incremento della temperatura nelle fasce più alte, in quanto l'assorbimento di radiazione solare ultravioletta e radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre da parte dell'ozono fornisce l'energia che scalda la stratosfera. La concentrazione di tale componente atmosferico cresce con la quota e raggiunge un massimo a circa 50 km, pertanto alla stessa quota la temperatura presenta un massimo.

A di sopra della *stratopausa*, fino a 80 km di quota, si estende la *mesosfera*, la temperatura decresce velocemente dal valore di 0 °C, caratteristico della stratopausa, al valore di -90 °C. Ciò è dovuto, principalmente, alla diminuzione di concentrazione di ozono con la quota. Lo strato successivo è detto *termosfera* ed è caratterizzato da un aumento della temperatura con la quota. Il limite superiore di tale regione, detto *termopausa*, si trova a circa 500 km e a tale altezza si registrano temperature superiori ai 700 °C. Data la mancanza di uno strato superiore, la termosfera è fortemente irradiata dal sole a lunghezze d'onda molto corte con conseguente ionizzazione e dissociazione delle molecole, per cui questa regione risulta costituita essenzialmente da elettroni liberi e molecole ionizzate. Per questo motivo, all'interno della

termosfera, si sviluppa una ulteriore zona detta *ionosfera*, caratterizzata da aumenti di temperatura fino a 1000 °C. Al di sopra della ionosfera si estende l'*esosfera*, popolata da elettroni e frammenti di molecole che collidono raramente e, spesso, sfuggono all'atmosfera stessa.

L'*esosfera* si confonde gradualmente con lo spazio interplanetario e costituisce il limite superiore dell'atmosfera.

1.3 Aerosol

Un *aerosol* è un sistema esteso di particelle, liquide o solide, sospese in un gas. Queste particelle, rimanendo sospese nell'atmosfera per periodi di tempo considerevoli, vengono trasportate da correnti verticali e orizzontali, spesso anche per grandi distanze.

Nell'atmosfera terrestre gli aerosol possono differire notevolmente per origine, composizione e dimensione, come mostrato in figura 1-4. [5]

Le principali sorgenti di aerosol sono sia di origine naturale, polveri di varia natura, emissioni marine, vulcaniche, per le quali si riscontra una maggiore frazione di particelle grossolane, sia di origine antropica, prodotti derivanti da motori a combustione, impianti industriali, impianti per riscaldamento civili, che invece sono caratterizzati da una maggiore frazione di particelle fini. Le dimensioni quindi di tali particelle variano da 0.01 μm a circa 10 μm .

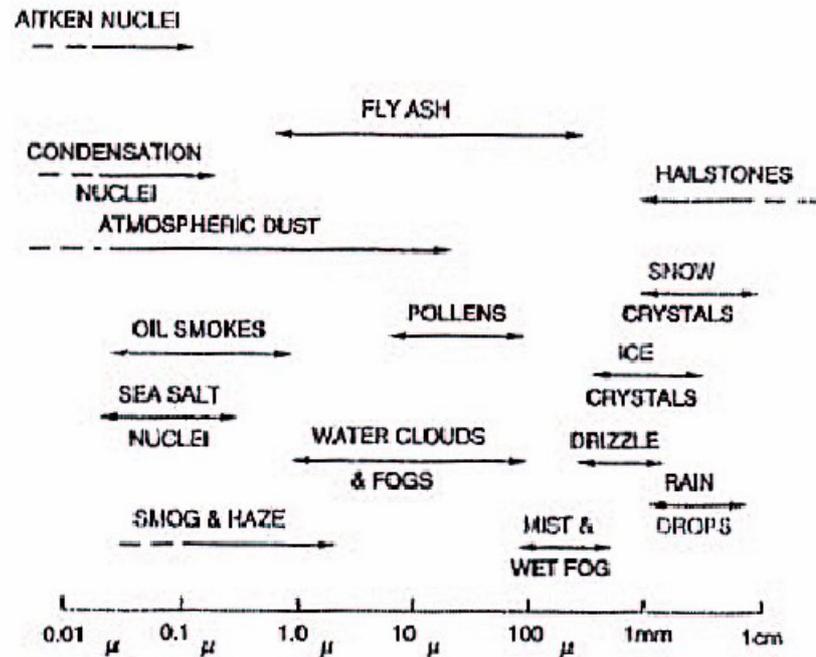


Figura 1-4: Classificazione degli aerosol in funzione delle dimensioni

Gli aerosol hanno un ruolo importante in molti processi atmosferici :

- dal punto di vista chimico-fisico, contribuiscono alla regolazione di alcune importanti reazioni che avvengono in atmosfera;
- dal punto di vista ottico, essi influenzano le proprietà di trasparenza dell'aria, agendo come diffusori e schermando parte della radiazione solare;
- infine possono agire come fissatori di alcune sostanze inquinanti e, per le loro piccole dimensioni, possono essere ingeriti dagli organismi viventi.

Il grande interesse nei confronti degli aerosol è giustificato, dunque, dalle tante implicazioni legate alla loro presenza, soprattutto in vista

dell'aumento della concentrazione di aerosol prodotti dalle attività antropogeniche.

1.3.1 Classificazione degli aerosol

Gli aerosol possono essere divisi in due categorie fondamentali, le *polveri* e le *particelle igroscopiche*. [6]

Le polveri indicano un tipo di aerosol costituito da minerali di varia natura, come i *detriti interplanetari*, le *polveri vulcaniche*, i *residui industriali*, le *polveri dei deserti e delle erosioni*. Questi aerosol possono avere dimensioni variabili, quelli più grandi restano sospesi per minuti e, dunque, si depositano nelle vicinanze del punto di emissione, quelli di dimensione più piccole, trasportati dal vento, si mescolano con le sospensioni igroscopiche fintanto che pioggia o neve li riconducono a terra. Le particelle igroscopiche sono, invece, dei tipi di aerosol capaci di creare nuclei di condensazione di vapor acqueo.

Secondo la classificazione di Junge, tali nuclei possono essere suddivisi in tre categorie, in base alle loro dimensioni:

- *nuclei di Aitken*, con raggio minore di 0.1 μm ;
- *nuclei larghi*, con raggio compreso tra 0.1 e 1 μm ;
- *nuclei giganti*, con raggio maggiore di 1 μm .

Gli aerosol, come detto, possono influenzare il bilancio radiativo, figura 1-5, sia diffondendo ed assorbendo la radiazione solare incidente sull'atmosfera, sia modificando le proprietà ottiche e la quantità di nubi. Quelli di più piccole dimensioni, come i nuclei di Aitken, sono infatti i responsabili della successiva condensazione del vapor d'acqua e della formazione delle particelle costituenti le nubi. Le nubi, che sono sostanzialmente dei densi assieme di aerosol, costituiscono il principale fattore di controllo degli scambi energetici che si manifestano tra atmosfera, superficie terrestre e spazio esterno.

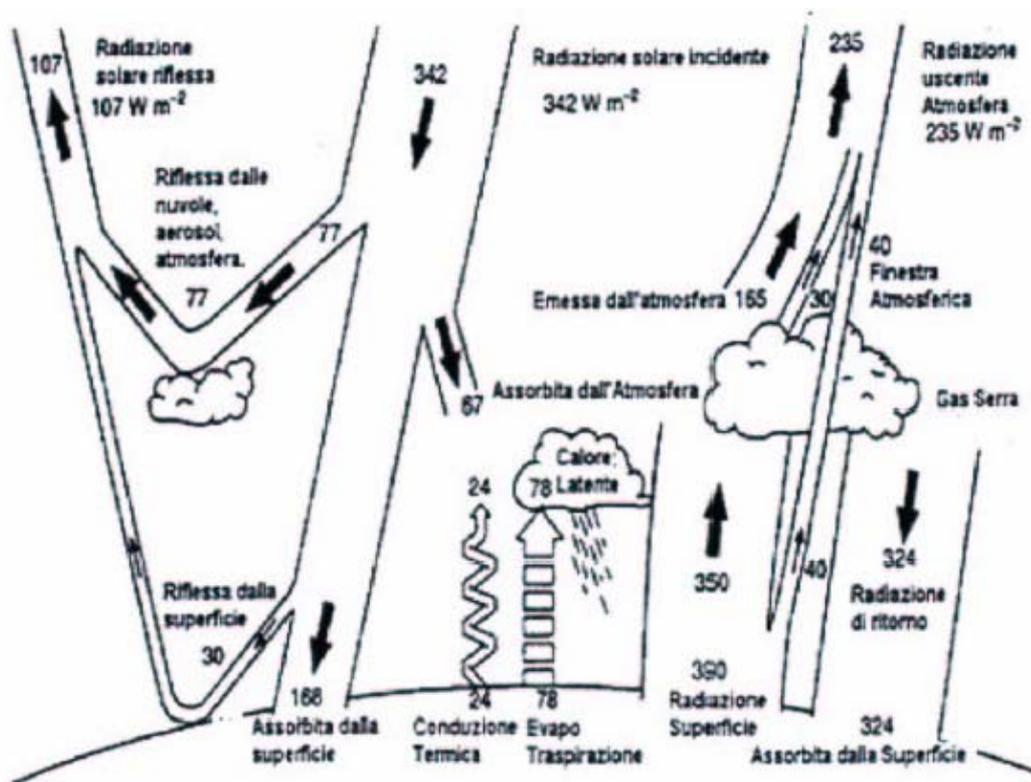


Figura 1-5: Rappresentazione schematica del Bilancio Radiativo terrestre

La radiazione solare diffusa dalle nubi viene in parte rinviata verso l'esterno, modificando in tal modo la riflettività del sistema superficie-

atmosfera e per questo tendono a raffreddarlo. D'altra parte le nubi sono esse stesse sorgenti di radiazione termica e si comportano come corpi neri emettendo radiazione infrarossa sia verso l'esterno che verso la superficie, contribuendo in modo sostanziale al cosiddetto effetto serra.

Pertanto le nubi, in funzione della loro posizione, possono contribuire in modo positivo o negativo ai flussi che raggiungono la superficie ed al bilancio energetico del pianeta.

Tra le particelle igroscopiche, particelle che oscillano tra lo stato cristallino e quello liquido, rientrano gli aerosol organici di origine vegetale, le ceneri organiche ed inorganiche, le particelle derivanti da reazioni fotochimiche tra i gas di combustione e quelli atmosferici, le particelle di sali marini.

1.3.2 Meccanismi di rimozione degli aerosol

Le particelle aerosoliche che popolano l'atmosfera vengono continuamente rimosse mediante tre tipi di meccanismi, oggetto di studio della dinamica degli aerosol :

- la *coagulazione*, che avviene quando due particelle collidono e formano un minor numero di particelle più grandi;
- la *sedimentazione*, che è il processo secondo il quale ogni particella tende a cadere sotto l'azione della gravità.

Questo fenomeno riguarda le particelle più grandi, visto che quelle più piccole tendono a restare sospese sotto l'azione dei venti e

delle correnti convettive. Nel cadere, le particelle raggiungono una velocità costante, detta *velocità limite*, corrispondente al raggiungimento dell'equilibrio fra la forza peso, l'attrito viscoso dell'atmosfera e la spinta di Archimede.

- il *dilavamento-washout* – è la rimozione di particelle dovuta a pioggia e a neve. Inizialmente, alcuni nuclei permettono la condensazione del vapor d'acqua; molti di essi, poi, si fondono con gocce di pioggia in caduta, e così trasportano a terra gli aerosol che contengono. Un efficace metodo di rimozione per dilavamento è, ad esempio, la caduta di fiocchi di neve. Essi, essendo più grandi, offrono maggiore superficie al contatto ed hanno, di conseguenza, maggiori probabilità di lavare via le particelle. Inoltre, avendo una velocità limite più bassa, hanno maggior tempo di permanenza in atmosfera, e questo aumenta le possibilità di contatto.

1.4 Lo Strato Limite Planetario

Lo strato che costituisce il limite inferiore della troposfera e che direttamente interagisce con l'atmosfera è definito *Strato Limite Planetario* (Planetary Boundary Layer, PBL) [7].

Il resto della troposfera è indicato come atmosfera libera, Free Atmosphere. Il PBL per la sua dislocazione nell'atmosfera ha un'influenza significativa sull'attività umana e sul piano climatico-meteorologico e ambientale, infatti :

- la sua composizione è di notevole importanza, in quanto l'essere umano trascorre la maggior parte della propria vita nel PBL;
- le previsioni meteorologiche riguardano essenzialmente il PBL;
- gli agenti inquinanti emessi dalle sorgenti presenti sulla terra vengono intrappolati nel PBL;
- la nebbia si forma nel PBL;
- l'aviazione, il commercio mercantile e la maggior parte delle attività umane vengono condotte nel PBL;
- la sorgente di energia più importante per l'intera atmosfera è la radiazione solare, che, per la maggior parte, è assorbita dalla terra, e trasmessa al resto dell'atmosfera da processi fisici termodinamici che caratterizzano il PBL;
- il 50 % dell'energia cinetica dell'atmosfera è dissipata nel PBL attraverso l'attrito e la turbolenza;
- l'evoluzione dei temporali e degli uragani è legata alla crescita dell'umidità nel PBL;

- le sorgenti di molti aerosol si trovano sulla superficie della terra e, quindi, il PBL contiene concentrazioni di aerosol molto più alte rispetto alla libera atmosfera;
- i parametri del PBL (altezza, stratificazioni interne, ecc.), infine, si rivelano utili come parametri di input per l'applicazione di modelli atmosferici e per la validazione degli stessi.

Tutti questi motivi hanno spinto la comunità scientifica a sviluppare uno studio approfondito del PBL, allo scopo di individuarne l'estensione e la dinamica. Data tuttavia la complessità dei moti atmosferici, risulta molto difficile applicare modelli matematici di simulazione per lo studio della dinamica del PBL. Pertanto sono state sviluppate trattazioni semplificate basate sulla termodinamica e fluidodinamica, che consentono di caratterizzare il PBL attraverso l'andamento con la quota di grandezze fisiche come la temperatura potenziale e la temperatura potenziale virtuale, con la possibilità di distinguere tre categorie in cui l'atmosfera o un suo strato può essere classificato in termini di stabilità (atmosfera stabile, instabile, neutra). Verranno di seguito, quindi, riportate le caratteristiche principali del PBL e descritte le cause e le modalità che influiscono sulla sua evoluzione.

1.4.1 Caratterizzazione del PBL

Il PBL si contraddistingue dal resto della troposfera principalmente per due motivi :

- è direttamente influenzato dalla morfologia della superficie terrestre, dai fenomeni che su di essa hanno luogo e da tutte le attività umane;
- ha una risposta temporale piuttosto rapida, dell'ordine di grandezza di un'ora o meno, alle sollecitazioni derivanti dalla superficie; ciò non significa che il PBL raggiunga uno stato di equilibrio in tale lasso di tempo, ma solo che comincia ad alterare il suo stato iniziale;

I cambiamenti che si osservano nel PBL sono riconducibili alla concomitanza di una serie di fattori legati all'interazione tra la superficie terrestre e lo strato di atmosfera sovrastante. Tali fattori, indicati con il termine di *forzanti superficiali*, hanno un carattere sia naturale che antropico ed includono la resistenza aerodinamica causata dalla forza di attrito viscoso, l'evaporazione e la traspirazione, il riscaldamento e il raffreddamento, la morfologia del terreno che induce modifiche del flusso d'aria, l'emissione di grandi masse di inquinanti dovute a sorgenti naturali o umane.

Sono proprio questi forzanti che inducono continui cambiamenti nel PBL e influiscono sul suo spessore, provocandone una grande variabilità nello spazio e nel tempo. Il PBL si estende, infatti, dalla superficie terrestre fino ad un'altitudine variabile tra 0.5 e 2.5 km.

Uno dei fattori principali che influisce sullo spessore del PBL è la *variazione diurna della temperatura* in prossimità della superficie terrestre. Questo ciclo diurno della temperatura non è dovuto all'assorbimento diretto della radiazione solare da parte del PBL; sono le radiazioni trasmesse dalla terra che influiscono sul PBL, portando ad un riscaldamento di giorno ed al raffreddamento radiativo nell'IR di notte, con conseguenti continui cambiamenti della struttura interna.

I cambiamenti del PBL indotti dai forzanti superficiali avvengono attraverso tipici movimenti che caratterizzano questo strato e che sono responsabili del trasporto da una regione all'altra di grandezze come l'umidità, il calore, la quantità di moto e gli inquinanti.

Tali movimenti hanno un'influenza notevole sul tempo meteorologico e sul piano ambientale e possono essere generalmente classificati in movimenti verticali rispetto alla superficie terrestre e in movimenti orizzontali. I movimenti orizzontali, i venti, sono sicuramente più complessi e più comuni di quelli verticali e agiscono su scale molto diverse: quelli a larga scala, che costituiscono la circolazione generale della troposfera, e una serie di circolazioni su scale più piccole, meno regolari e più localizzate (cicloni ed uragani). Questi processi sono dovuti ad un ineguale riscaldamento solare della superficie terrestre, dovuto all'inclinazione dell'asse terrestre; la differenza di temperatura sulla superficie terrestre, infatti, produce piccole differenze orizzontali di pressione atmosferica tra punti che si trovano alla stessa quota dal livello del mare e ciò favorisce lo spostamento orizzontale di masse d'aria, da zone ad alta pressione verso zone a bassa pressione, cioè, l'insorgere dei venti. I movimenti verticali, invece, sono responsabili della formazione

di nubi e delle precipitazioni e producono uno dei più importanti processi di trasporto nel PBL, la turbolenza.

1.4.2 Struttura del PBL

Il PBL è influenzato direttamente dalla superficie terrestre, il suo spessore, infatti, dipende fortemente dalla morfologia della superficie e dalle condizioni meteorologiche.

Per quanto riguarda la natura della superficie, si osserva che sul mare la profondità del PBL varia lentamente nello spazio e nel tempo, a causa delle lente variazioni dei forzanti superficiali, dovute a loro volta, alla lenta variazione della temperatura della superficie marina, durante il ciclo diurno. Questo andamento della temperatura dipende dal continuo mescolamento delle masse d'aria sovrastanti la superficie del mare e dalla grande capacità termica del mare, che può assorbire grandi quantità di calore dal sole senza variare di molto la sua temperatura.

Sulla terraferma, invece, in regioni di alta pressione, il PBL ha una struttura ben definita, correlata all'orografia della regione sottostante e fortemente variabile, anche se in modo regolare, durante la giornata.

In ogni caso, sia sul mare che sulla terraferma, il PBL risulta più sottile in zone ad alta pressione rispetto a quelle a bassa pressione. Come si può osservare in figura 1-6, l'alta pressione provoca uno schiacciamento dell'aria del PBL, che si sposta verso zone a bassa pressione, dove

attraverso moti convettivi, si allontana dalla terra e raggiunge l'alta troposfera.[7]

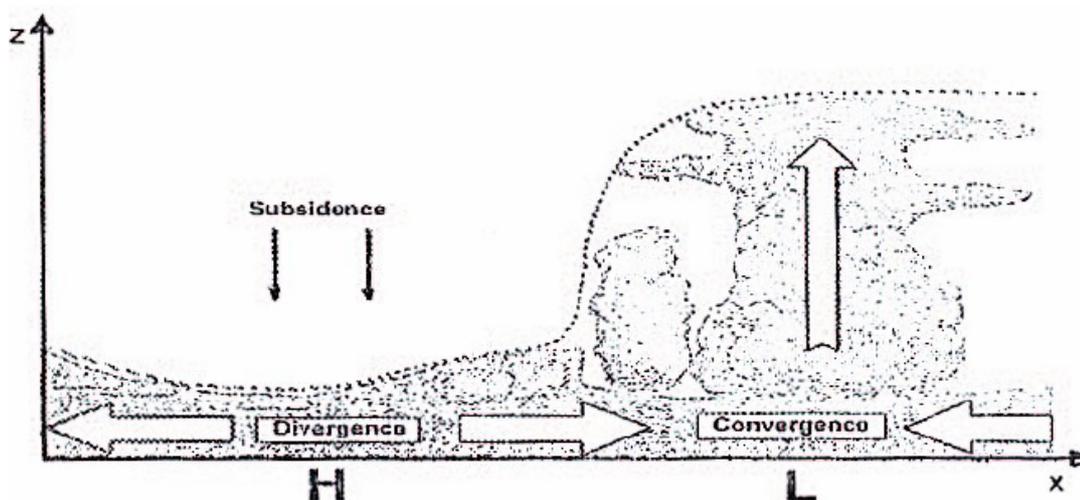


Figura 1-6: Effetto della pressione sulla variazione dello spessore del PBL

Le zone ad alta pressione, quindi, sono caratterizzate da situazioni atmosferiche stabili e prive di nuvole, nelle zone a bassa pressione, invece, a causa dei moti convettivi, si manifestano spostamenti di masse d'aria in verticale fino a quote elevate, generando la formazione di nuvole cumuliformi o stratocumuli.

L'evoluzione dello strato limite planetario sulla terra, in condizioni di alta pressione e cielo sereno, è schematizzato in figura 1-7[7].

Si distinguono tre principali strutture:

lo strato limite convettivo (CBL, secondo l'acronimo anglosassone di Convective Boundary Layer). Si sviluppa a partire dal sorgere del sole e dal conseguente riscaldamento del suolo. Il meccanismo di trasporto in esso dominante è la turbolenza di tipo convettivo, dovuta sia al trasferimento di calore dal suolo riscaldato dalla radiazione solare sia al

raffreddamento radiativo dalla sommità del PBL. Si generano, dunque, correnti d'aria calda ascendenti e correnti d'aria fredda discendenti che, in continuo rimescolamento, conferiscono uniformità verticale a grandezze come calore, umidità, quantità di moto e grandezze meteorologiche caratteristiche come la velocità e la direzione del vento. All'interno dello strato convettivo si possono, così, individuare tre sottostrati:

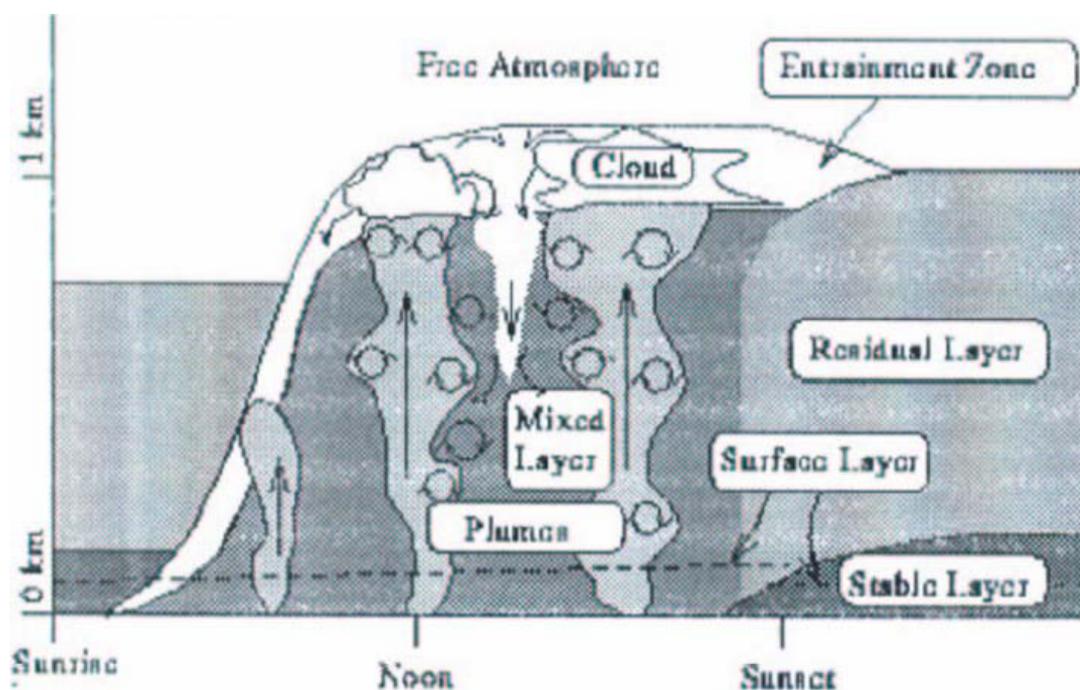


Figura 1-7: Struttura schematica del PBL che si sviluppa sopra la superficie terrestre, in una regione di alta pressione e in condizioni di cielo sereno, durante un ciclo diurno

- lo strato superficiale, surface layer, instabile e fortemente dipendente da quanto avviene sulla superficie terrestre. È caratterizzato da un'elevata concentrazione di inquinanti;

- lo strato rimescolato, mixed layer, che si sviluppa nella parte centrale, caratterizzato da un intenso mescolamento dell'aria;
- l'entrainment zone, la zona di transizione tra il mixed layer e la free atmosphere, che ostacola la propagazione delle correnti di aria calda ascendenti verso la libera atmosfera.

L'inizio della crescita del CBL si osserva circa mezz'ora dopo il sorgere del sole, continua a crescere durante il corso della giornata e raggiunge la massima profondità nel tardo pomeriggio, quando la temperatura superficiale del suolo ha raggiunto il suo valore più alto.

Mezz'ora circa dopo il tramonto il CBL comincia a decadere ed origina lo *strato limite stabile*. Questo si forma in conseguenza del raffreddamento della superficie e si sviluppa per un'altezza molto inferiore al CBL. La struttura termica dello strato limite stabile impedisce alla turbolenza prodotta al livello del suolo di interessare gli strati superiori. I moti convettivi sono praticamente nulli.

Il terzo strato che si può osservare è lo *strato residuale*, così detto perché conserva le variabili di stato che caratterizzavano il mixed layer al tramonto; esso è caratterizzato dalla turbolenza prodotta durante il giorno dalla convezione e, non essendo a contatto diretto con il suolo, non è direttamente influenzato dai forzanti superficiali.

CAPITOLO 2

LA TECNICA LIDAR DI INDAGINE ATMOSFERICA

La tecnologia laser e le tecniche di indagine basate su principi ottici hanno fornito importanti e validi risultati riguardanti lo studio delle caratteristiche fisico-chimiche dell'atmosfera terrestre.

In particolar modo, i processi di assorbimento e scattering che si verificano in atmosfera e che sono alla base delle tecniche ottiche, hanno rivestito un ruolo predominante, rivoluzionando i classici metodi di indagine atmosferica.

Nel seguente capitolo, pertanto, verranno presentati i principali fenomeni di interazione radiazione-materia, descrivendo, in maniera del tutto generale, i principi fisici fondamentali.

Un'analisi più dettagliata, invece, sarà dedicata alle tecniche di monitoraggio atmosferico, facendo riferimento, in particolar modo, alla tecnica Lidar, di cui verranno presentati i principi generali di funzionamento, l'equazione e i metodi di risoluzione analitica per il calcolo della soluzione.

2.1 Assorbimento e Scattering

Si consideri un fascio di radiazione monocromatica di lunghezza d'onda λ ed intensità $I(\lambda)$ che si propaga nella direzione z .

L'intensità della radiazione subirà un'attenuazione nell'attraversare lo strato atmosferico di spessore dz , a seguito dell'assorbimento e dello scattering da parte delle molecole e degli aerosol presenti in atmosfera.

L'andamento, in funzione della quota, dell'intensità di un'onda piana monocromatica che attraversa l'atmosfera è determinato dalla legge di Lambert-Beer:[5]

$$I(\lambda, z) = I_0 \exp \left[- \int_0^z \alpha(\lambda, z') dz' \right] \quad (2.1)$$

dove:

- I_0 è l'intensità della radiazione trasmessa alla quota $z = 0$, ossia $I(\lambda, 0)$;
- $\int_0^z \alpha(\lambda, z) dz$ è noto come *spessore ottico del mezzo* e α è il *coefficiente di estinzione o di attenuazione*, e rappresenta l'attenuazione dell'energia per unità di lunghezza nella direzione di propagazione del fascio, dovuta all'assorbimento e alla diffusione delle particelle e delle molecole presenti in atmosfera.

Effettuando il rapporto tra l'intensità incidente alla quota z , $I(\lambda, z)$, e quella trasmessa alla quota $z = 0$, I_0 , si ricava la *trasmissività atmosferica*:[5]

$$T(\lambda, z) = \exp \left[- \int_0^z \alpha(\lambda, z) dz \right] \quad (2.2)$$

Tale parametro fornisce informazioni sulla densità ottica dell'atmosfera e sulla capacità di quest'ultima di trasmettere in un certo range una determinata lunghezza d'onda.

La valutazione della trasmittività e dello spessore ottico, inoltre, consente di ricavare utili informazioni sulla concentrazione, in atmosfera, dei componenti diffusivi e assorbenti, quali gli aerosol.

Lo *scattering* [5] è il processo attraverso il quale una particella, avente indice di rifrazione diverso da quello del mezzo circostante, posta lungo il cammino ottico di un'onda elettromagnetica, sottrae energia all'onda incidente e la irradia nuovamente nell'angolo solido totale centrato sulla particella. Il principio fisico alla base di tale processo può essere spiegato mediante la teoria delle onde elettromagnetiche: il campo elettrico dell'onda incidente causa l'oscillazione degli elettroni della particella alla stessa frequenza dell'onda, originando così delle cariche oscillanti (dipoli), che producono onde sferiche di frequenza uguale alla frequenza dell'onda incidente (scattering elastico).

Un gran numero di particelle atmosferiche, diverse per dimensione, distribuzione e proprietà ottiche, può essere responsabile del fenomeno dello scattering e la forma stessa della distribuzione della radiazione diffusa dipende dalle dimensioni del centro diffusore nonché dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Per tale ragione, in modo da semplificare la trattazione, è utile introdurre un parametro di misura

dello scattering, x , legato alle dimensioni relative della particella diffondente e alla lunghezza d'onda della luce incidente:

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} a = ka \quad (2.3)$$

dove a rappresenta la dimensione lineare della particella e λ la lunghezza d'onda incidente.

Il parametro x influisce notevolmente sulla forma della distribuzione spaziale della radiazione elettromagnetica diffusa, infatti, se le dimensioni delle particelle sono molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione incidente ($x \ll 1$), la radiazione è distribuita quasi uniformemente attorno alla particella e il processo di interazione dominante è descritto dallo scattering di *Rayleigh*.

In figura 2-1 è riportata una rappresentazione schematica della distribuzione angolare della radiazione diffusa.



Figura 2-1: Distribuzione angolare della radiazione diffusa al variare del parametro x

Lo scattering di Rayleigh si osserva nei processi di interazione di luce visibile ($\lambda \approx 500\text{nm}$) con molecole gassose in atmosfera ($a \sim 0.1 \text{ nm}$) e anche con radiazione nelle microonde ($\lambda \sim 5 \text{ cm}$) interagente con gocce

di pioggia ($a < 2.5$ mm), corrispondenti a valori di x pari a 10^{-3} e 0.3 rispettivamente.

Man mano che le dimensioni aumentano, compare un picco in avanti, nella direzione di propagazione del fascio, e la distribuzione della radiazione diffusa perde la sua simmetria, fino a risultare quasi indipendente dalla lunghezza d'onda, quando le dimensioni delle particelle sono molto maggiori di λ .

In questo caso la descrizione dei processi di scattering è opportunamente fornita dalla *teoria di Mie* e i valori di x vanno da 0.3 fino a circa 50, come osservato per la luce visibile interagente con piccole particelle di aerosol, ad esempio aerosol marini ($a \sim 4$ μm).

Una terza tipologia di scattering, infine, è lo *scattering di Raman*, che consiste nella diffusione, da parte di alcune molecole, di radiazione di lunghezza d'onda leggermente differente da quella incidente.

Lo scattering è facilmente rivelabile se il fascio incidente è monocromatico, in quanto nella radiazione diffusa si hanno picchi a frequenze diverse da quella della radiazione incidente.

É utile riportare, a questo punto, alcuni parametri importanti per la descrizione dei diversi tipi di scattering e che verranno in seguito utilizzati in questo lavoro di tesi:

nel caso di scattering di Rayleigh, si definisce *sezione d'urto di scattering angolare* la superficie sul fronte d'onda incidente attraversata da una potenza pari a quella diffusa dalla molecola per unità di angolo solido. Integrando su tutto l'angolo solido, si ottiene la *sezione d'urto di scattering totale*:

$$\sigma_m = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N^2 \lambda^4} \quad (2.4)$$

Un altro parametro fondamentale è il *coefficiente angolare di scattering* β_m , definito come l'intensità totale rimossa da un fascio di luce da parte di una unità di volume di particelle sospese per unità di irradianza del volume:

$$\beta_m = \sigma_m N \quad (2.5)$$

e quindi

$$\beta_m = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N \lambda^4} \quad (2.6)$$

Di particolare importanza, dal punto di vista della tecnica LIDAR, è la *sezione d'urto di retrodiffusione*, ossia quella che corrisponde al fenomeno della diffusione a 180° rispetto alla direzione del fascio di luce incidente sulla particella. In questo caso si ottiene:

$$\sigma_m^\pi(\lambda) = \frac{d\sigma_m(\theta \equiv \pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \quad (2.7)$$

da cui si ottiene per il *coefficiente di backscattering*:

$$\beta_m = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N\lambda^4} \quad (2.8)$$

Il coefficiente β_m rappresenta la parte di energia incidente che viene retrodiffusa dal bersaglio atmosferico, per unità di angolo solido e per spessore atmosferico unitario.

Nel caso di scattering di Mie, considerato il coefficiente totale di scattering di volume e tenendo adesso conto delle diverse sezioni d'urto delle particelle, risulta:

$$\beta_p(\theta) = \int_{r_1}^{r_2} N(r)\sigma(r)dr \quad (2.9)$$

dove $N(r) dr$ rappresenta il numero di particelle con indice di rifrazione n , aventi raggio compreso tra r e $r + dr$, e i limiti di integrazione definiscono l'intervallo di variabilità dei raggi per la distribuzione dei diffusori.

2.2 Tecniche di monitoraggio atmosferico

L'indagine dell'atmosfera attraverso segnali ottici basati sui processi di scattering elastico ha preceduto l'invenzione del laser, ma solo dopo tale invenzione, avvenuta agli inizi degli anni '60, si è raggiunto un notevole miglioramento grazie alla possibilità di disporre di fasci luminosi monocromatici, molto collimati, di notevole potenza e di lunghezza d'onda dell'ordine delle dimensioni delle particelle atmosferiche.

La possibilità, infatti, di disporre di radiazione laser impulsata ha reso possibile la determinazione della porzione di atmosfera investita dal fascio, in quanto il tempo tra la trasmissione dell'impulso laser e l'arrivo del segnale di ritorno può essere direttamente collegato, attraverso la velocità della luce, alla parte di atmosfera in cui si verifica lo scattering.

Inizialmente i metodi utilizzati per lo studio dei componenti atmosferici erano il rilevamento mediante filtri e le misure radiometriche:

il primo metodo consiste nel campionamento di una massa d'aria fatta passare attraverso dei filtri, in genere di materiale ceramico o fibre di

vetro; dopo il filtraggio, un certo numero di particelle si depositano sul filtro, vengono separate e ne viene calcolata la concentrazione.

Il vantaggio di tale metodo è che esso consente di risalire, oltre che alla concentrazione, anche alla composizione chimica e alle dimensioni delle particelle. Lo svantaggio principale, invece, è che il filtraggio di una massa d'aria è un metodo invasivo, ovvero esso può modificare la composizione percentuale della massa d'aria, inoltre le sostanze depositate possono reagire fra loro, sulla superficie del filtro, ed infine, con tale metodo è possibile conoscere la concentrazione media delle particelle solo localmente, e non su zone più estese.

I metodi radiometrici consistono, invece, nella trasmissione della radiazione, solare o emessa dalla superficie terrestre, attraverso l'atmosfera e permettono la misura, in una determinata direzione, dello spessore ottico del mezzo attraversato. Tali metodi, quindi, non forniscono la possibilità di risalire alla distribuzione spaziale delle particelle, ma danno informazioni sulle proprietà di attenuazione, dovuta a scattering ed assorbimento da parte delle particelle presenti in atmosfera, della radiazione da parte di zone atmosferiche più o meno estese. La disponibilità, tuttavia, di impulsi di grande intensità ha reso possibile la realizzazione di misure remote, non invasive, basate sullo scattering da parte di specifiche molecole, con la possibilità di identificazione delle stesse. Ed è proprio su tali caratteristiche che si basano i sistemi LIDAR, acronimo anglosassone di *Light Identification Detection and Ranging*, ovvero rivelazione, identificazione e misura della distanza per mezzo della luce. Tali sistemi consentono, dunque, di ottenere misure più frequenti e più dettagliate di vaste zone, orizzontali e

verticali, dell'atmosfera, con la possibilità di ricavare maggiori informazioni sulla composizione chimica e sulle proprietà fisiche della stessa. La tecnica Lidar, inoltre, si è rivelata la più adatta allo studio degli aerosol e dello strato limite planetario e, grazie alla sua elevata risoluzione spazio-temporale, risulta un potente mezzo per monitorare l'evoluzione dei parametri meteorologici e delle proprietà atmosferiche.

2.3 La tecnica LIDAR

Il principio generale su cui si basa il funzionamento di un sistema LIDAR [8] consiste nell'inviare in atmosfera un intenso impulso laser monocromatico che viene ampiamente diffuso in tutte le direzioni dalle molecole e dalle particelle aerosoliche presenti in aria.

Questo processo di scattering è causato principalmente dalle molecole di azoto, ossigeno e acqua (scattering di Rayleigh e Raman) e dalle particelle aerosoliche sospese in atmosfera (scattering di Mie).

La frazione di radiazione retrodiffusa dall'atmosfera in direzione della stazione Lidar è definita segnale Lidar.

Tale segnale viene raccolto tramite un telescopio e trasferito al sistema di rivelazione, dove viene separato in diversi canali, con riduzione della larghezza di banda tramite un sistema di selezione spettrale e, attraverso dei fotomoltiplicatori, viene poi trasformato in segnale elettrico.

L'intensità di tale segnale è, in ogni istante, proporzionale alla potenza ottica ricevuta e dipende dalle proprietà di retrodiffusione e assorbimento della parte di atmosfera investita dal fascio laser.

La retrodiffusione atmosferica, a sua volta, dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione che investe l'atmosfera stessa e dalle caratteristiche, ovvero concentrazione, dimensione, forma e proprietà di rifrazione delle particelle e delle molecole intercettate dal fascio incidente. Il segnale elettrico prodotto dal fotomoltiplicatore, opportunamente elaborato, può fornire informazioni sulla presenza e sulla concentrazione del particolato in atmosfera.

Dal punto di vista geometrico, esistono due configurazioni del Lidar, in base al posizionamento della sorgente laser e del telescopio (figura 2-2):

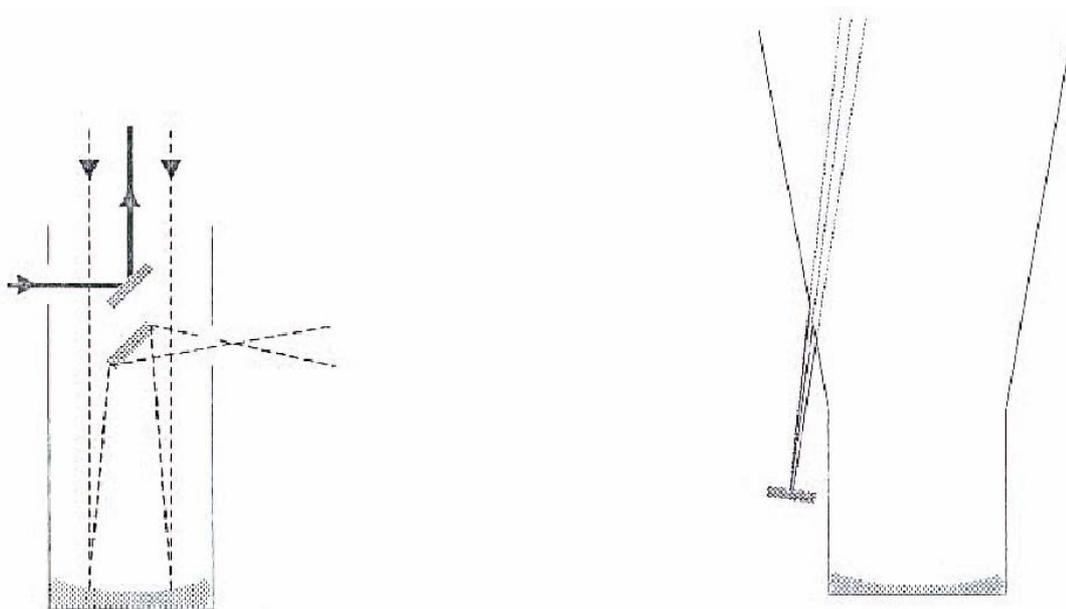


Figura 2-2: Configurazioni del sistema LIDAR:
monostatica (sinistra) e bistatica (destra)

quella monostatica, in cui gli assi ottici del laser e del telescopio coincidono, e quella bistatica, in cui il laser e il telescopio sono paralleli ma posti ad una certa distanza.

Il volume di scattering, cioè il volume di atmosfera investigata, è determinato dall'intersezione dell'apertura del fascio laser con il campo di vista del telescopio.

Il tipo di configurazione scelto dipende dalle quote di atmosfera che si vogliono studiare; per quelle più basse è preferibile l'utilizzo di una configurazione monostatica in quanto la sovrapposizione del fascio laser con il f.o.v. del telescopio, condizione essenziale per avere segnale Lidar, avviene a quote più basse, mentre la configurazione bistatica è utilizzata quando si vuole studiare la stratosfera, poiché con tale configurazione la quota minima di sovrapposizione completa è raggiunta a quote più alte.

2.4 Equazione LIDAR

Per poter comprendere la relazione fra il segnale ricevuto da un sistema Lidar ed i parametri atmosferici legati alla diffusione e all'assorbimento del fascio laser, occorre esaminare tutti i fattori che modificano il fascio laser inviato in atmosfera.

Si consideri un sistema Lidar in configurazione monostatica e si supponga che tale sistema abbia come sorgente attiva un laser pulsato e

che le condizioni di lavoro siano quelle di scattering singolo, ossia nel caso in cui i fotoni dell'atmosfera sono raccolti dopo aver subito un'unica diffusione, ipotesi lecita nel caso di cielo limpido.

Si suppone, inoltre, che lo spessore atmosferico investigato sia sufficientemente piccolo in modo da poter considerare costanti nel tempo, in tale range, i parametri dipendenti dalla quota.

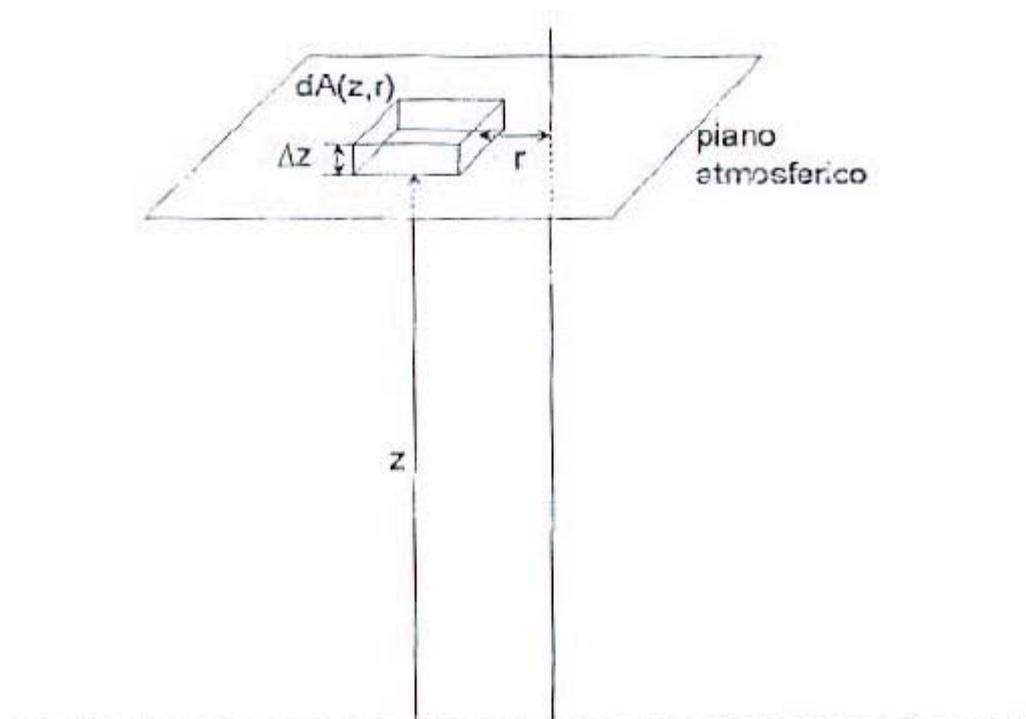


Figura 2-3: Schema del processo di ricezione della radiazione retrodiffusa

Con riferimento alla figura 2-3, la potenza ottica ricevuta dal rivelatore, nell'intervallo spettrale $[\lambda, \lambda+d\lambda]$, da una cella atmosferica compresa nell'intervallo $[z, z+dz]$, è data dalla seguente equazione:[5]

$$P(\lambda, \lambda_L, z) = \int J(\lambda, \lambda_L, z, r) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta z \cdot p(\lambda, z, r) \cdot dA(z, r) \quad (2.10)$$

dove:

- λ è la lunghezza d'onda rivelata e λ_L è la lunghezza d'onda della sorgente laser;
- $\Delta\lambda$ è la larghezza di banda osservata;
- $J(\lambda, \lambda_L, z, r)$ è la radianza spettrale, ossia la potenza emessa, in una data direzione e per unità di angolo solido, dall'unità di superficie proiettata sul piano normale alla direzione di emissione, che dipende dalla lunghezza d'onda rivelata λ , dalla lunghezza d'onda λ_L della sorgente laser, dalla posizione r e dalla quota z ;
- $dA(z, r)$ è l'elemento di area della regione atmosferica di interesse, posto nella posizione r e a distanza z ;
- $p(\lambda, z, r)$ è la probabilità che la radiazione a lunghezza d'onda λ proveniente da $dA(z, r)$ colpisca il rivelatore.

La probabilità $p(\lambda, z, r)$ dipende dai fenomeni di attenuazione atmosferica, dalle proprietà dell'ottica di ricezione, dalla trasmissione del sistema di selezione spettrale e dalla geometria del sistema di rivelazione. Essa si può esplicitare come:

$$p(\lambda, z, r) = \frac{A_0}{z^2} \cdot T(\lambda, z) \cdot \xi(\lambda) \cdot \chi(z, r) \quad (2.11)$$

essendo:

- A_0 l'area del telescopio. $\frac{A_0}{z^2}$ rappresenta dunque l'angolo solido della luce diffusa, in tutte le direzioni, dalla quota z e intercettata dal rivelatore;
- $\xi(\lambda)$ l'efficienza totale, ottica ed elettronica, del canale di rivelazione alla lunghezza d'onda λ ;

- $\chi(z,r)$ il fattore di sovrapposizione, determinato in base alla geometria dell'apparato. Esso rappresenta la probabilità che la radiazione proveniente da r , a distanza z , giunga al rivelatore, supponendo che dipenda solo dalla sovrapposizione del fascio laser col campo di vista del telescopio;
- $T(\lambda, z)$ la trasmittività atmosferica alla lunghezza d'onda λ e alla quota z , già definita dall'espressione (2.2), dipendente a sua volta dal coefficiente di estinzione $\alpha(\lambda, z)$, definito come la riduzione del flusso di energia per unità di lunghezza nella direzione di propagazione del fascio.

La radianza spettrale $J(\lambda, \lambda_L, z, r)$, inoltre, dipende dal tipo di interazione fra la radiazione e il bersaglio.

Poiché l'interazione che si vuole osservare è la diffusione elastica o anelastica, la radianza è data da:

$$J(\lambda, \lambda_L, z, r) = \beta(\lambda, \lambda_L, z, r) \cdot I(z, r) \quad (2.12)$$

dove:

- $I(z, r)$ è l'irradianza del laser, ossia la potenza radiante che incide sull'unità di superficie, nella posizione r a distanza z ;
- $\beta(\lambda, \lambda_L, z, r)$ è il coefficiente di retrodiffusione (noto come *coefficiente di backscattering*), definito come la frazione di energia incidente che viene retrodiffusa per unità di angolo solido e per spessore atmosferico unitario [$L^{-1} sr^{-1}$].

Il coefficiente β può essere espresso in termini di proprietà dei diffusori nel seguente modo:

$$\beta(\lambda, \lambda_L, z, r) = \sum_i N_i(z, r) \left(\frac{d\sigma(\lambda_L)}{d\Omega} \right)_i L_i(\lambda) \quad (2.13)$$

dove:

- $N_i(z, r)$ è la densità dell'i-esima particella diffondente ;
- $\left(\frac{d\sigma(\lambda_L)}{d\Omega} \right)_i$ è la sezione d'urto differenziale di scattering nell'unità di tempo e per unità di angolo solido attorno alla direzione Ω ;
- $L_i(\lambda)$ è lo spettro di emissione della i-esima specie ($L(\lambda)d\lambda$ è la frazione di radiazione diffusa che cade nell'intervallo spettrale $[\lambda, \lambda+d\lambda]$).

Il coefficiente di backscattering, quindi, cambia in relazione al tipo di scattering considerato.

Sostituendo nella formula (2.10) le espressioni trovate per la probabilità e la radianza, si ottiene:

$$P(\lambda, \lambda_L, z) = \Delta z \frac{A_0}{z^2} \int_{\Delta\lambda} \xi(\lambda) d\lambda \int_A \beta(\lambda, \lambda_L, z, r) I(z, r) T(z, r) \chi(z, r) dA(z, r) \quad (2.14)$$

dove $\Delta\lambda$ è la finestra spettrale del ricevitore, centrata attorno a λ , lunghezza d'onda della radiazione diffusa.

In base alla (2.14), la potenza totale raccolta dal ricevitore al tempo $t = 2z/c$ (tempo di andata e ritorno dell'impulso laser) dipende da tutta la radiazione con lunghezza d'onda che cade nella finestra spettrale $\Delta\lambda$,

rivelata al tempo t , e che ha origine dalla quota $z = ct/2$ e da tutta la sezione di atmosfera intercettata dal fascio a quota z .

Per poter semplificare l'espressione (2.14) è utile fare le seguenti assunzioni:

- la radiazione osservata, nel caso di diffusione, abbia una larghezza di banda molto piccola, paragonabile a quella laser;
- l'atmosfera sia omogenea nella zona di sovrapposizione tra il fascio laser e il campo di vista del telescopio (β e T costanti rispetto a r);
- l'intensità del laser sia omogenea nell'area interessata ($I(z, r) = I(z)$ su un'area $A(z)$);
- il fattore di sovrapposizione χ valga 1 dove c'è sovrapposizione fra campo di vista del telescopio e fascio laser e zero altrove.

In base a tali ipotesi, la potenza ottica ricevuta può essere espressa nella seguente forma:

$$P(\lambda, \lambda_L, z) = \Delta z \frac{A_0}{z^2} \xi(\lambda) \beta(\lambda, \lambda_L, z) T(\lambda, z) I(z) A(z) \quad (2.15)$$

Se si ipotizza, inoltre, che l'impulso laser sia rettangolare e di durata τ_L , allora l'irradianza può essere scritta nel seguente modo:

$$I(z) = \frac{E_L T(\lambda_L, z)}{\tau_L A(z)} \quad (2.16)$$

dove:

- E_L rappresenta l'energia dell'impulso laser

- $T(\lambda_L, z)$ rappresenta la trasmissività atmosferica alla lunghezza d'onda λ_L , a quota z .

Introducendo la potenza dell'impulso laser, $P_L = E_L / \tau_L$, la risoluzione spaziale del segnale, $\Delta z = c \tau_L / 2$, dove il fattore 2 tiene conto che l'impulso deve compiere due volte la distanza Δz prima di essere rivelato, la potenza totale ricevuta all'istante $t = 2z/c$, nell'ipotesi di singolo scattering è:

$$P(\lambda, \lambda_L, z) = P_L \frac{c \tau_L}{2} \frac{A_0}{z^2} \cdot \xi(\lambda) \cdot \beta(\lambda, \lambda_L, z) \cdot T(\lambda, z) \cdot T(\lambda_L, z) \quad (2.17)$$

In questa equazione le proprietà fisico-chimiche del mezzo attraversato agiscono attraverso i parametri ottici α e β .

Occorre, infine, evidenziare che l'espressione (2.17) è una sottostima del segnale reale di retrodiffusione in quanto non tiene conto dei fotoni che rientrano nel telescopio dopo una diffusione multipla.

2.5 Descrizione dei parametri ottici

Viene di seguito riportata un'analisi dettagliata dei parametri ottici caratterizzanti il segnale LIDAR, il *coefficiente di retrodiffusione* β e il *coefficiente di estinzione* α , distinguendo nel caso di diffusione elastica ed anelastica.

2.5.1 Parametri ottici in condizione di diffusione elastica

L'equazione LIDAR (2.17), nel caso di scattering elastico, si semplifica notevolmente per il fatto che, in tale processo, la lunghezza d'onda del segnale ricevuto è uguale alla lunghezza d'onda del segnale laser inviato ($\lambda = \lambda_L$). Sotto tale ipotesi, pertanto, l'equazione diventa:[8]

$$P(\lambda_L, z) = P_L \frac{c\tau}{2} \frac{A_0}{z^2} \cdot \xi(\lambda_L) \cdot \beta(\lambda_L, z) \cdot T^2(\lambda_L, z) \quad (2.18)$$

Questa equazione presenta due incognite, il coefficiente di backscattering ed il coefficiente di estinzione, che rappresentano i parametri ottici del bersaglio atmosferico.

Si prenda in esame il solo *coefficiente di backscattering*.

Quest'ultimo comprende due contributi, la parte *aerosolica* e la parte *molecolare*. Il primo contributo è dovuto alla retrodiffusione di tipo Rayleigh da parte delle molecole, il secondo è dovuto invece alla retrodiffusione di tipo Mie da parte delle particelle aerosoliche.

È possibile, quindi, scrivere: $\beta = \beta_{mol} + \beta_{aer}$.

La parte molecolare è dovuto alla diffusione da parte di particelle molto più piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione che le colpisce ed è pertanto descritto, in base alla teoria di Rayleigh, dalla seguente espressione:

$$\beta_{mol} = N_{mol} \frac{d\sigma_R(\vartheta = \pi)}{d\Omega} \quad (2.19)$$

dove:

$$\frac{d\sigma_R(\pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N_{mol}^2 \lambda^4} \quad (2.20)$$

rappresenta la sezione d'urto differenziale di Rayleigh per l'angolo di diffusione $\theta = \pi$, mentre N_{mol} è il numero di molecole per unità di volume. Quest'ultima quantità, ricavabile da modelli atmosferici, rappresenta la concentrazione totale di molecole presenti in atmosfera. Una stima della sezione d'urto differenziale di retrodiffusione, per una miscela di gas esistente al di sotto di 100 km, risulta pari a:

$$\frac{d\sigma(\pi)}{d\Omega} = 5.45 \left(\frac{550}{\lambda(\mu\text{m})} \right)^4 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad (2.21)$$

da cui si evince la caratteristica dipendenza da λ^{-4} .

Quando, invece, le particelle hanno dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione che le investe, le loro proprietà di diffusione diventano più complesse. La teoria di Mie, in questo caso, consente di ricavare per il coefficiente di retrodiffusione delle particelle aerosoliche la seguente espressione:

$$\beta_{\text{aer}}(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_B(a, \lambda, z) N'_{\text{aer}}(a) da \quad (2.22)$$

dove:

- σ_B è la sezione d'urto di retrodiffusione di Mie di una particella di raggio a e indice di rifrazione n ;
- N'_{aer} rappresenta il numero di particelle con raggio compreso tra a e $a+da$, legato al numero totale di particelle dall'espressione:

$$N_{\text{aer}} = \int_0^{\infty} N'_{\text{aer}}(a) da \quad (2.23)$$

La dipendenza di σ_B da a , λ ed n , secondo la teoria di Mie, può essere espressa da:

$$\sigma_B(a, \lambda, n) = \pi a^2 Q_B(x, n) \quad (2.24)$$

dove Q_B è l'efficienza di retrodiffusione, ossia il rapporto tra la sezione d'urto di retrodiffusione e la sezione d'urto geometrica, e dipende dalle dimensioni del centro diffusore e dalla lunghezza d'onda della radiazione che lo investe solo attraverso il loro rapporto: $x = 2\pi a / \lambda$.

Il coefficiente di estinzione α , dipende anch'esso da un duplice contributo, quello molecolare e quello particellare, e può essere scritto come somma di quattro termini:

$$\alpha = \alpha_{mol} + \alpha_{aer} = \alpha_{mol,a} + \alpha_{mol,s} + \alpha_{aer,a} + \alpha_{aer,s} \quad (2.25)$$

dove gli indici s ed a si riferiscono, rispettivamente, allo scattering e all'assorbimento.

Il coefficiente di attenuazione $\alpha_{mol,s}$, dovuto allo scattering da parte delle molecole gassose, ha una componente sia elastica che anelastica, ma il contributo elastico è sempre dominante e, poiché la dimensione delle particelle di gas è piccola rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione laser, risulta legato alla sezione d'urto di Rayleigh:

$$\alpha_{mol,s} = N_{mol} \sigma_R \quad (2.26)$$

Il termine $\alpha_{mol,a}$, che descrive l'assorbimento da parte di molecole gassose, è funzione di λ e predomina sugli altri in corrispondenza delle righe di assorbimento dei componenti atmosferici.

Inoltre dalla teoria di Rayleigh è noto il legame fra β_{mol} e α_{mol} , con $\alpha_{mol} = \alpha_{mol,a} + \alpha_{mol,s}$, ed essendo $\alpha_{mol,a}$ trascurabile nel visibile, risulta:

$$\alpha_{mol} = \frac{\beta_{mol}}{0.119} \quad (2.27)$$

Per quanto riguarda il contributo aerosolico, come nel caso si β , si assume valida l'ipotesi di sfere omogenee, per cui risulta:

$$\alpha_{aer}(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_E(a, \lambda, n) N'_{aer}(a) da \quad (2.28)$$

essendo σ_E la sezione d'urto di estinzione per particelle di raggio a ed indice di rifrazione n , da considerarsi somma dei due contributi di scattering e di assorbimento, rispettivamente pari a:

$$\sigma_{aer,s}(a, \lambda, n) = \pi a^2 Q_s(x, n) \quad (2.29)$$

$$\sigma_{aer,a}(a, \lambda, n) = \pi a^2 Q_a(x, n) \quad (2.30)$$

dove Q_s e Q_a rappresentano, rispettivamente, l'efficienza di scattering e di assorbimento aerosolico e possono essere determinate con metodi numerici. In definitiva il segnale elastico dato dalla (2.18) dipende dai coefficienti di estinzione e di backscattering dovuti alle sole particelle aerosoliche presenti in atmosfera.

2.5.2 Parametri ottici in condizione di diffusione anelastica

Quando la lunghezza d'onda del segnale laser e quella del segnale retrodiffuso differiscono si verifica un processo di diffusione anelastica. Si parla, in questo caso, di scattering di Raman e l'equazione LIDAR assume la seguente espressione:[9]

$$P(\lambda_R, z) = P_L \frac{A_0}{z^2} \frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega} N_R(z) \xi(z) \frac{c\tau}{2} T(\lambda_R, z) T(\lambda_L, z) \quad (2.31)$$

dove:

- λ_L è la lunghezza d'onda della radiazione laser
- λ_R è la lunghezza d'onda della radiazione retrodiffusa, con $\lambda_R \neq \lambda_L$

- $N_R(z)$ è la densità numerica della molecola che partecipa al processo di diffusione. Nel caso dell'azoto, ad esempio, essa ammonta al 78% della densità atmosferica molecolare totale.
- $\frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega}$ è la sezione d'urto differenziale di Raman per la radiazione anelastica diffusa a 180° .

I coefficienti di estinzione $\alpha(\lambda_R)$ e $\alpha(\lambda_L)$, presenti nei fattori $T(\lambda_R, z)$ e $T(\lambda_L, z)$, dipendono dalle caratteristiche fisiche dell'atmosfera ed ognuno di essi è dato dalla somma di due contributi, aerosolico e molecolare:

$$\alpha_{tot} = \alpha(\lambda_R) + \alpha(\lambda_L) = \alpha_{aer}(\lambda_R) + \alpha_{mol}(\lambda_R) + \alpha_{aer}(\lambda_L) + \alpha_{mol}(\lambda_L) \quad (2.32)$$

Il fatto che le molecole, investite dal fascio laser di partenza, rispondano emettendo in tutte le direzioni una radiazione ad una lunghezza d'onda diversa da quella incidente, giustifica la presenza nell'equazione, (2.32), dei coefficienti di estinzione alle due diverse lunghezze d'onda.

Questo vuol dire che l'attenuazione del segnale ricevuto è dovuta sia all'attenuazione del fascio laser, λ_L , nel salire verso un certo bersaglio, sia all'attenuazione del fascio diffuso alla lunghezza d'onda λ_R quando torna al ricevitore. La dipendenza dalla lunghezza d'onda dei coefficienti molecolari è espressa dalla corrispondenti sezioni d'urto e, quindi, può ritenersi nota, mentre la dipendenza delle parti aerosoliche dalla lunghezza d'onda è molto più complicata, poiché dipende anche dalla forma e dall'indice di rifrazione delle particelle.

Una stima del coefficiente di estinzione alla lunghezza d'onda dello scattering di Raman può essere ottenuta dal segnale LIDAR in condizioni anelastiche, ricorrendo ad una relazione empirica che lega il

rapporto dei coefficienti $\alpha_{aer}(\lambda_L)$ e $\alpha_{aer}(\lambda_R)$ al rapporto inverso delle rispettive lunghezze d'onda:

$$\frac{\alpha_{aer}(\lambda_R)}{\alpha_{aer}(\lambda_L)} = \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k \quad (2.33)$$

dove k è un coefficiente variabile con le dimensioni delle particelle e delle molecole incontrate dal fascio durante la sua propagazione.

Con la relazione (2.33) permette di ridurre le incognite dell'equazione LIDAR del canale di Raman da due ad una sola e, da questa equazione, sarà possibile ricavare il coefficiente α_{aer} .

2.6 Inversione dell'equazione LIDAR

Si consideri l'equazione di singolo scattering:

$$P(\lambda, \lambda_L, z) = P_L \frac{c \tau_L A_0}{2 z^2} \cdot \xi(\lambda) \cdot \beta(\lambda, \lambda_L, z) \cdot T(\lambda, z) \cdot T(\lambda_L, z) \quad (2.17)$$

Tale equazione non può essere risolta in maniera rigorosa in quanto presenta due incognite, il coefficiente di estinzione aerosolico α_{aer} e il coefficiente di backscattering aerosolico β_{aer} .

L'importanza di tali coefficienti è dovuta al fatto che in essi sono contenute informazioni sulle proprietà delle particelle aerosoliche, dimensione, massa, densità e indice di rifrazione, e pertanto è necessario determinare questi parametri e quindi cercare di risolvere l'equazione Lidar. Allo scopo di invertire quest'equazione, sono stati elaborati degli

opportuni algoritmi che consentono di ricavare, per l'appunto, i coefficienti α e β .

2.6.1 Metodo analitico di Ansmann

Il metodo sviluppato da Albert Ansmann permette la determinazione, a partire da misure del segnale Raman dall'azoto, del coefficiente di estinzione atmosferico. Si consideri l'equazione Lidar nel caso di segnale Raman, (2.31), riscritta in forma compatta:[9]

$$P(z) = \frac{K}{z^2} N_R(z) T(\lambda_L, z) T(\lambda_R) \quad (2.34)$$

dove K rappresenta l'insieme di tutti i fattori costanti, indipendenti dalla quota. Inoltre il fattore di sovrapposizione, che dipende in generale da z , è stato posto pari ad 1 (tale condizione è soddisfatta in modo rigoroso solo per misure Lidar effettuate in alta atmosfera).

Dalla (2.34) si ricava:

$$\frac{P(z)z^2}{N_R(z)} = K T(\lambda_L, z) T(\lambda_R) \quad (2.35)$$

Esplicitando le trasmissività atmosferiche e passando ai logaritmi, si ottiene:

$$\ln \left[\frac{P(z)z^2}{N_R(z)} \right] = \ln K - \int_0^z [\alpha_{aer}(\lambda_L, r) + \alpha_{aer}(\lambda_R, r)] dr - \int_0^z [\alpha_{mol}(\lambda_L, r) + \alpha_{mol}(\lambda_R, r)] dr \quad (2.36)$$

da cui, derivando entrambi i membri rispetto alla variabile di quota z , si ricava:

$$\frac{d}{dz} \ln \left[\frac{P(z)z^2}{N_R(z)} \right] = -[\alpha_{aer}(\lambda_L, z) + \alpha_{aer}(\lambda_R, z)] - [\alpha_{mol}(\lambda_L, z) + \alpha_{mol}(\lambda_R, z)] \quad (2.37)$$

Ricordando la relazione empirica (2.33), si ricava la seguente espressione per $\alpha_{aer}(\lambda_L)$:

$$\alpha_{aer}(\lambda_L) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N_R(z)}{P(z)z^2} \right] - \alpha_{mol}(\lambda_L, z) - \alpha_{mol}(\lambda_R, z)}{1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k} \quad (2.38)$$

Il valore di k può essere posto pari ad 1 nel caso di aerosol e gocce sferiche di acqua con dimensioni comparabili alla lunghezza d'onda del fascio laser, mentre va posto pari a 0 per le particelle di dimensioni maggiori, come nel caso dei cristalli di ghiaccio.

Il vantaggio di questo metodo risiede nel fatto di avere un'espressione per $\alpha_{aer}(\lambda_L)$ indipendente dal coefficiente di retrodiffusione, pertanto non sono richieste ipotesi a priori, resta, tuttavia, la dipendenza dalla geometria dell'apparato e quindi il coefficiente di estinzione aerosolico è legato alla conoscenza del fattore che tiene conto della sovrapposizione fra il campo di vista del telescopio e il fascio laser.

Tale metodo, infine, è utilizzabile per misure del segnale Raman, rivelabile, in genere, solo in ore notturne.

2.6.2 Metodo analitico di Klett

Un metodo per determinare il coefficiente di retrodiffusione a partire dall'equazione Lidar valida in condizioni di scattering elastico è stato sviluppato da James Klett [10]. Tale metodo suppone la conoscenza di un parametro nuovo, il *Lidar ratio*, ossia il rapporto tra i coefficienti di estinzione e retrodiffusione aerosolici:

$$L = \frac{\alpha_{aer}}{\beta_{aer}} \quad (2.39)$$

È necessario introdurre una nuova variabile $S(z)$, definita come il logaritmo del segnale Lidar moltiplicato per il quadrato della quota, il “*range corrected signal*”:

$$S(z) = \ln[P(z)z^2] \quad (2.40)$$

dove è stata omessa, per brevità, la dipendenza da λ .

Per poter esprimere l'equazione Lidar in una forma indipendente dal sistema di rivelazione utilizzato, occorre conoscere $S(z)$ ad una quota di riferimento z_0 ; risulta quindi:

$$S(z) - S_0 = \ln\left[\frac{\beta}{\beta_0}\right] - 2\int_0^z \alpha(z) dz \quad (2.41)$$

dove $\beta_0 = \beta(z_0)$ e $S_0 = S(z_0)$.

Derivando entrambi i membri della (2.41) rispetto a z , si ricava l'equazione differenziale:

$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dz} - 2\alpha(z) \quad (2.42)$$

Questa equazione contiene due incognite e può essere ridotta ad un'equazione lineare caratterizzata da una sola incognita attraverso la

conoscenza del Lidar ratio. Essendo, inoltre, il coefficiente di backscattering totale somma di due contributi, $\beta = \beta_{aer} + \beta_{mol}$, α può essere scritto come:

$$\alpha = \alpha_{aer} + \alpha_{mol} = L\beta_{aer} + B_R^{-1}\beta_{mol} \quad (2.43)$$

dove, in base alla teoria di Rayleigh, $B_R^{-1} = 1/0.119$ e descrive il rapporto costante tra α e β in condizioni di diffusione Rayleigh.

Sostituendo il valore di α nella (2.42) si ottiene:

$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dz} - 2(L\beta_{aer} + B_R^{-1}\beta_{mol}) \quad (2.44)$$

poiché $\beta_{aer} = \beta - \beta_{mol}$, si ricava:

$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dz} - 2L\beta + 2(L - B_R^{-1})\beta_{mol} \quad (2.45)$$

Definendo una nuova variabile S' , tale che:

$$S' - S'_m = S - S_m + \frac{2}{B_R} \int_z^{z_m} \beta_{mol} dz - 2 \int_z^{z_m} L\beta_{mol} dz \quad (2.46)$$

dove è stato posto $S_m = S(z_m)$, e differenziando rispetto a z , si ha:

$$\frac{dS'}{dz} = \frac{dS}{dz} + \frac{2}{B_R} \beta_{mol} \Big|_z^{z_m} - 2L\beta_{mol} \Big|_z^{z_m} \quad (2.47)$$

Dalla (2.47) e dalla (2.44) si ricava l'equazione differenziale ordinaria di Bernoulli:

$$\frac{dS'}{dz} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dz} - 2\beta L \quad (2.48)$$

la cui soluzione è:[11]

$$\beta(z) = \frac{e^{(S'-S'_m)}}{\beta_m^{-1} + 2 \int_z^{z_m} L e^{(S'-S'_m)} dr'} \quad (2.49)$$

dove $\beta_m = \beta(z_m)$.

Noto, quindi, il coefficiente di backscattering ad una quota di riferimento z_m , si può ricavare il coefficiente di backscattering totale $\beta(z)$ e, noto il profilo della densità molecolare, si ricava $\beta_{mol}(z)$ e quindi β_{aer} .

Uno svantaggio di tale metodo consiste nel dover assumere una quota di riferimento in cui si conosce a priori il coefficiente di retrodiffusione aerosolico. Ma il limite maggiore è dovuto al fatto che per poter determinare β_{aer} occorre conoscere il Lidar ratio, che risulta essere una funzione complicata della quota z , dipendendo dal rapporto di α e β aerosolici, i quali dipendono, oltre che dalla lunghezza d'onda, anche da diversi parametri fisico-chimici delle particelle (indice di rifrazione degli aerosol, distribuzione dimensionale, umidità relativa, ecc).

Infatti, in base alle relazioni (2.28) e (2.22) che descrivono rispettivamente il coefficiente di estinzione e di retrodiffusione aerosolici determinati in base alla teoria di Mie, risulta che entrambi i coefficienti sono integrali pesati sulla distribuzione dimensionale degli aerosol:

$$\alpha_{aer} = \pi \int a^2 Q_E(x, n) N'_{aer}(a) da$$

$$\beta_{aer} = \pi \int a^2 Q_B(x, n) N'_{aer}(a) da$$

2.6.3 Metodo analitico di Wandinger

Il metodo sviluppato da Wandinger [12] permette di ricavare il coefficiente di backscattering β utilizzando una combinazione dei segnali elastico e Raman, acquisiti simultaneamente.

Si considerino, a tal proposito, le equazioni Lidar (2.18) e (2.31), rispettivamente per il segnale elastico e Raman, e le si esplicitino rispetto ai coefficienti di estinzione e retrodiffusione, somma dei contributi molecolari ed aerosolici:

$$P(\lambda_L, z) = \frac{k_{\lambda_L}}{z^2} (\beta_{\lambda_L}^{aer} + \beta_{\lambda_L}^{mol}) e^{-2 \int_0^z [\alpha_{\lambda_L}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_L}^{mol}(r)] dr} \quad (2.50)$$

$$P(\lambda_L, \lambda_R, z) = \frac{k_{\lambda_R}}{z^2} N_R(z_0) \frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega} e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_R}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_R}^{mol}(r)] dr} e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_L}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_L}^{mol}(r)] dr} \quad (2.51)$$

dove

- λ_L è la lunghezza d'onda del laser;
- λ_R è la lunghezza d'onda del segnale Raman da parte delle molecole di azoto;
- i fattori k contengono tutte le informazioni riguardanti le efficienze di raccolta della radiazione, le efficienze di trasmissione delle ottiche e le efficienze dei rivelatori.

Si consideri il seguente rapporto dei segnali a due diverse quote:

$$\frac{P_{\lambda_L}(z) P_{\lambda_R}(z_0)}{P_{\lambda_L}(z_0) P_{\lambda_R}(z)} \quad (2.52)$$

dove z_0 è una quota di riferimento fissata.

Sostituendo nella (2.52) le espressioni (2.50) e (2.51) si ricava:

$$\beta_{\lambda_L}^{aer}(z) = [\beta_{\lambda_L}^{aer}(z_0) + \beta_{\lambda_L}^{mol}(z_0)] \frac{N_R(z) P_{\lambda_L}(z) P_{\lambda_R}(z_0) e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_R}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_R}^{mol}(r)] dr}}{N_R(z_0) P_{\lambda_L}(z_0) P_{\lambda_R}(z) e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_L}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_L}^{mol}(r)] dr}} - \beta_{\lambda_L}^{mol}(z) \quad (2.53)$$

nell'ipotesi che i fattori di sovrapposizione relativi al canale elastico e a quello Raman siano uguali.

La quota di riferimento z_0 viene scelta in modo che risulti $\beta_{\lambda_L}^{mol}(z_0) \gg \beta_{\lambda_L}^{aer}(z_0)$, così da poter trascurare il termine aerosolico a questa quota. Inoltre, se i coefficienti di estinzione aerosolica, dovuti al segnale elastico e Raman, non sono molto diversi, in prima approssimazione è possibile porre uguale ad 1 il rapporto:

$$\frac{e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_R}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_R}^{mol}(r)] dr}}{e^{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_L}^{aer}(r) + \alpha_{\lambda_L}^{mol}(r)] dr}} \quad (2.54)$$

Per determinare β_{aer} in base alla (2.53) è necessario, quindi, conoscere la densità dell'aria e le proprietà di estinzione atmosferica aerosoliche e molecolari e le proprietà di retrodiffusione molecolare.

Il grosso vantaggio di questo metodo è quello di non richiedere la conoscenza a priori del Lidar ratio, ma solo del coefficiente di retrodiffusione totale ad una quota di riferimento.

Lo svantaggio, invece, è dovuto alla bassa qualità del segnale Raman, poiché la sezione d'urto di retrodiffusione Raman è minore di quella elastica di tre ordini di grandezza.

Ciò comporta che il rapporto segnale-rumore della radiazione Raman sia minore di quello del segnale elastico e, per questo motivo, il metodo di Wandinger, che richiede la conoscenza simultanea del segnale Raman e di quello elastico, non è adatto per le misure diurne, per le quali è preferibile usare il metodo di Klett.

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO ED ANALISI DI UNA MISURA LIDAR

Nel seguente capitolo viene descritto l'apparato sperimentale e i vari componenti che lo costituiscono, analizzando, per ciascuno di essi, le caratteristiche ed il principio generale di funzionamento.

Dopo la descrizione del sistema Lidar, segue un'analisi dettagliata della procedura di acquisizione di una misura Lidar e dei dati da essa ricavabili attraverso lo studio dei metodi di inversione dell'equazione lidar, con particolare riferimento al metodo di Klett.

3.1 Apparato sperimentale: il LIDAR mobile

L'apparato sperimentale utilizzato in questo lavoro di tesi è un sistema Lidar mobile, realizzato dal CO.RI.S.T.A., Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati, nell'ambito di un programma di ricerca europeo EUREKA denominato LAPMI, per il monitoraggio del particolato in atmosfera. Si tratta di un prototipo di lidar [13], mostrato in figura 3-1, che, per le dimensioni sostanzialmente ridotte, risulta

essere facilmente trasportabile e particolarmente adatto alle misure *in situ* degli aerosol.

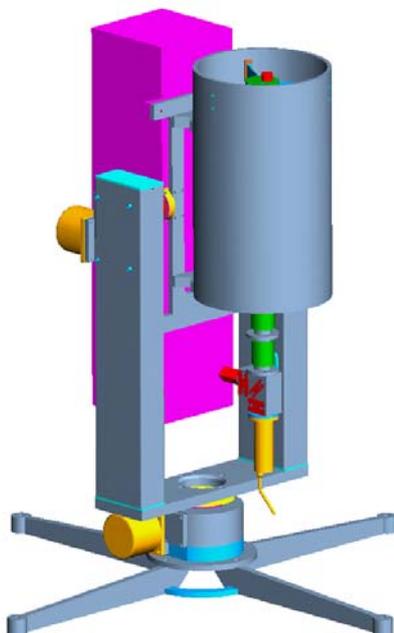


Figura 3-1 : Il prototipo di lidar mobile

Per la campagna di misure effettuata nell'ambito di questa tesi, il prototipo di lidar è stato portato presso l'area dell'aeroporto di Pontecagnano (latitudine $40^{\circ}37'$; longitudine $14^{\circ}53'$) fuori dal centro abitato. Il sistema Lidar è costituito essenzialmente da una sorgente laser, da un emettitore e da un ricevitore, un telescopio, ed il suo principio di funzionamento è il seguente:

un fascio di radiazione laser monocromatico viene inviato in atmosfera e diffuso da molecole di gas e particelle; la radiazione retrodiffusa in direzione del sistema viene raccolta dal telescopio e trasferita ad un rivelatore che produce un segnale elettrico, la cui intensità è proporzionale alla potenza ricevuta.

Poiché la luce viaggia ad una velocità nota, la posizione del volume di aria attraversato dal raggio laser può essere determinata misurando l'intervallo di tempo tra l'emissione laser e la ricezione dell'impulso retrodiffuso. Di conseguenza, poiché l'intensità del segnale ricevuto dipende dalle proprietà di retrodiffusione delle particelle intercettate dal fascio inviato, dal segnale prodotto dal rivelatore, opportunamente elaborato, è possibile ricavare informazioni sulla presenza e sulla concentrazione di tali particelle sospese in atmosfera.

Nei paragrafi seguenti viene, pertanto, fornita una descrizione dettagliata dei diversi componenti che costituiscono il sistema Lidar.

3.1.1 Sorgente laser

La sorgente di radiazione utilizzata è un laser impulsato a stato solido Nd:Yag, il cui mezzo attivo è costituito da un cristallo $Y_3Al_5O_{12}$.

Essa genera radiazione con lunghezza d'onda pari a $\lambda = 1064$ nm (armonica fondamentale), $\lambda = 532$ nm (seconda armonica) e $\lambda = 355$ nm (terza armonica), con un'energia di impulso pari a 500 μ J e 300 μ J rispettivamente ed una velocità di ripetizione di 1 kHz.

Gli impulsi hanno una durata di 50 ns, il che porta ad una risoluzione spaziale di 7.5 metri.

In figura 3-2 è riportato il prototipo con il laser in funzione alla lunghezza d'onda $\lambda = 532$ nm.

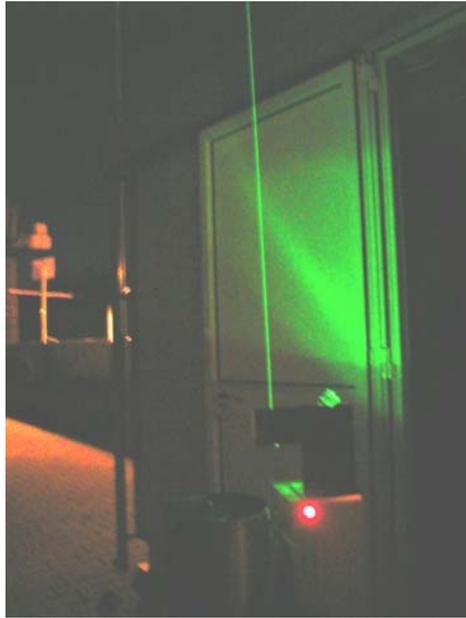


Figura 3-2 : Prototipo in funzione con emissione nel verde $\lambda=532$ nm

La dimensione del fascio in uscita è pari a circa 4 mm con divergenza pari a 1 mrad. L'armonica fondamentale può essere campionata e misurata tramite un fotodiode posto in cavità.

In tabella 3.1 sono riassunte le principali caratteristiche del laser.

Tabella 3.1 Caratteristiche della sorgente laser

Wave-Length	Energy Per pulse	Beam polarisation	Pointing stability	Beam divergency	Repetition rate	Pulse lenght
532 nm	500 μ J	TEM ₀₀	≤ 100 μ rad	1 mrad	1 kHz	50 ns
355 nm	300 μ J	TEM ₀₀	≤ 100 μ rad	1 mrad	1 kHz	50 ns

3.1.2 Sistema di trasmissione ottica

Per inviare la radiazione laser in atmosfera, è stato realizzato un beam-steerer, sistema di due specchi piani, montati a 45° , orientabili, riportato in figura 3-3.

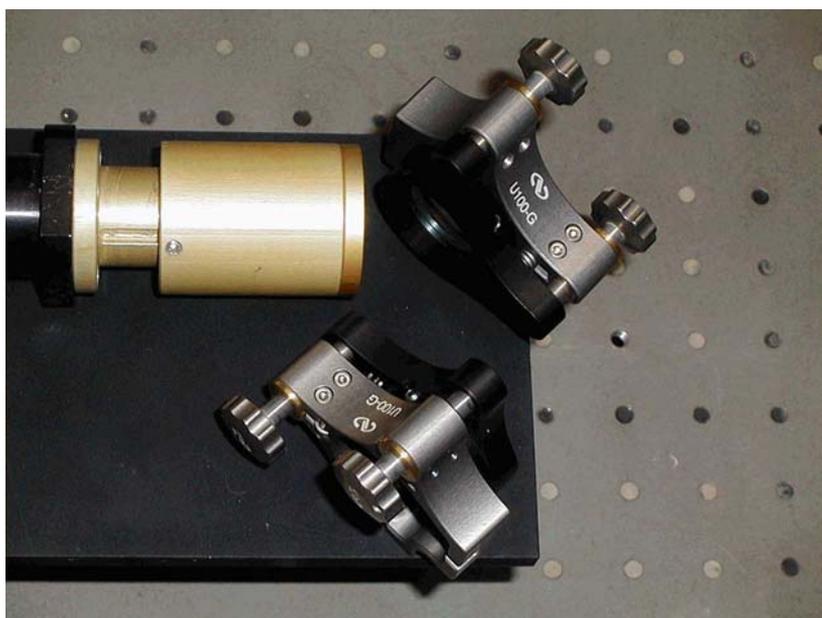


Figura 3-3 : Il beam-steerer

In tal modo, avvicinando l'asse ottico del laser con l'asse ottico del telescopio, è possibile ridurre l'intervallo delle quote osservabile.

3.1.3 Sistema di ricezione ottica

Una volta inviato in atmosfera, il fascio laser viene retrodiffuso e raccolto dal sistema di ricezione ottica. Questo sistema è costituito da un telescopio in configurazione Cassegrain, figura 3-4, con l'asse ottico posizionato parallelamente alla direzione di invio del fascio laser in atmosfera.

Il prototipo, pertanto, lavora in configurazione bistatica, con una distanza tra l'asse del raggio laser e del telescopio di 27.1 cm.

Lo specchio primario del telescopio è sferico e ha un diametro di 20 cm, con un'apertura centrale di 3 cm in cui insiste un baffle di 17 cm che serve a non rilevare la radiazione non riflessa dallo specchio.

Lo specchio secondario è ellittico, con un diametro di 6 cm. La distanza fra i due specchi è di 34 cm e la distanza focale effettiva è di 140 cm.



Figura 3-4 : Il telescopio Cassegrain

Vengono utilizzati, inoltre, diaframmi di vario diametro, 2, 3, 4 mm, allo scopo di poter osservare differenti distanze atmosferiche, che partono da 140 m, 170 m, 210 m, rispettivamente, fino a 5 km, avendo, nello stesso tempo, un campo di vista del telescopio sempre maggiore della divergenza del fascio laser.

3.1.4 Sistema di selezione ottica

In corrispondenza del fuoco del telescopio è posto il fuoco di una lente piano convessa, con distanza focale di 12 cm, che rende la radiazione retrodiffusa parallela e la invia ad un separatore di fascio, che trasmette la radiazione retrodiffusa nel verde, con una trasmissività superiore al 90%, e riflette la radiazione retrodiffusa nell'UV, con un riflessività superiore al 99.5%.

Sono posti, successivamente, due filtri interferenziali a banda stretta, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 3.2.

Tabella 3.2 Specifiche dei filtri interferenziali

CWL	FWHM	T %	Reiezione Fuori banda
355 nm +/-0.075 nm	0.5 nm +/-0.1 nm	> 35	$10 e^{-6}$
532 nm +/-0.075 nm	0.5 nm +/-0.1 nm	> 50	$10 e^{-6}$

L'utilizzo di filtri interferenziali è legato alla necessità di selezionare il solo contributo del segnale ottico in esame, escludendo il più possibile la radiazione di fondo. Inoltre, poiché la lunghezza d'onda trasmessa da un filtro interferenziale corrisponde al valore di picco di una banda stretta centrata su tale valore, la larghezza di banda del filtro deve essere scelta in modo da risultare maggiore di quella laser e sufficientemente piccola da dare un buon rapporto segnale rumore.

Per tale ragione occorre fissare, per ogni filtro, sia la larghezza di banda passante nell'intorno della lunghezza d'onda di interesse (band width) e la sua trasmissività, che il rapporto di reiezione, cioè l'attenuazione relativa alle lunghezze d'onda esterne alla banda passante.

3.1.5 Sistema di rivelazione

La radiazione in uscita dai filtri interferenziali viene successivamente inviata ad un rivelatore, ossia un fotomoltiplicatore dotato al proprio interno di un discriminatore ed un amplificatore di segnale.

Il sistema dispone di due rivelatori, uno che opera in fotoconteggio (modello Hamamatsu H6101) e l'altro di tipo analogico (modello electron tube P25 A). Durante la campagna di misure sono state effettuate solo misure a 532 nm ed il segnale è stato rivelato in fotoconteggio.

In figura 3-5 è riportato il canale di rivelazione nel suo complesso.



Figura 3-5 : Il canale di acquisizione

Bisogna tener presente, inoltre, che per tale sistema possono presentarsi i problemi del pile-up, per cui il valore del fotoconteggio fornito dallo strumento risulta essere una sottostima di quello reale e deve essere corretto secondo una funzione detta appunto di “correzione di pile-up”.

3.1.6 Sistema di acquisizione

Entrambi i segnali, analogico e digitale, vengono acquisiti da una scheda di acquisizione multicanale caratterizzata da un dwell-time (tempo di acquisizione di ciascuno dei canali della scheda multicanale) di 50 ns fisso. Essendo la scheda dotata di 1024 canali di acquisizione, è possibile avere profili lidar fino a 7680 m. Il massimo count rate per canale è di

100 MHz. La scheda di acquisizione è attivata dal trigger di attivazione del Q-switching e fornisce un profilo medio dell'energia retrodiffusa per secondo dall'atmosfera ad intervalli di tempo variabili fra 0.5 e 4 sec.

Occorre ricordare, infine, che il sistema lidar è dotato di un sistema di movimentazione a controllo remoto con motori passo-passo, che consentono la rotazione solidale di tutto il sistema attorno ad un asse centrale nonché la sua inclinazione a qualsiasi angolo azimutale, permettendo in tal modo la realizzazione di scansioni atmosferiche a due e tre dimensioni.

3.2 Strumentazione complementare

Il segnale lidar dipende fortemente dai parametri fisici dell'atmosfera, che influiscono sulla sua intensità attraverso i coefficienti di retrodiffusione e di attenuazione. Questi ultimi, come è stato detto, sono legati a parametri quali la densità, la temperatura e la pressione atmosferiche, che possono essere determinate grazie all'utilizzo di modelli atmosferici che richiedono la conoscenza della temperatura e della pressione alla quota corrispondente alla posizione della stazione lidar. Accanto ad informazioni sulla temperatura e la pressione, che forniscono profili del segnale molecolare in atmosfera, può essere utile disporre di informazioni relative alla velocità e alla direzione del vento, per comprendere meglio anche la dinamica delle strutture aerosoliche.

Queste informazioni di tipo meteorologico sono, in genere, acquisite utilizzando sensori posti in prossimità della stazione lidar.

Nella campagna di misure cui fa riferimento questa tesi, oltre tali sensori, si è potuto disporre di un aeroplano E.R.A. (environmental research airplane) modello Sky Arrow, in dotazione dell'Isafom (Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo), dotato di strumentazioni compatte e a bassa potenza e di sistemi di acquisizione dati digitali ad alta velocità, in grado di misurare i cambiamenti di massa, quantità di moto ed energia, che caratterizzano gli strati più bassi dell'atmosfera.

Tali strumentazione è in grado di ricavare profili dei parametri atmosferici necessari per la validazione dei dati lidar.

3.3 Descrizione di una misura LIDAR

Una misura lidar può essere suddivisa in una fase preliminare, consistente nell'allineamento del sistema, e nella fase successiva, che è quella della misura vera e propria.

L'allineamento del sistema consiste nel ricercare le condizioni che massimizzano la zona di sovrapposizione tra il fascio laser e il f.o.v. del telescopio, in modo da estendere il range delle quote sondabili e ridurre il più possibile la minima quota osservabile.

Nella fase di misura, la radiazione laser è inviata in atmosfera e quindi raccolta dal sistema, dove il segnale ottico viene opportunamente elaborato e trasformato in segnale elettrico.

L'acquisizione dei dati sperimentali da parte della stazione di monitoraggio è cominciata alle ore 16:39 del giorno 9 maggio 2005, in concomitanza dell'avvicinamento dell'aeromobile Sky Arrow alla pista aeroportuale per la fase di decollo. Il prototipo di lidar mobile ha effettuato un'acquisizione ininterrotta in fotoconteggio fino alle 15:30 circa del giorno successivo 10 maggio, ad eccezione di brevi sospensioni di qualche minuto necessarie per monitorare l'energia della radiazione laser emessa o per verificare la condizioni di allineamento.

Una ulteriore interruzione si è verificata dalle 19:44 alle 20:44 a causa di problemi legati alla stabilità del segnale di trigger che hanno reso il segnale relativo a quel periodo inutilizzabile.

Dopo l'acquisizione dei dati, opportunamente elaborati, il sistema genera profili lidar ogni 4 secondi che devono essere corretti per una specifica funzione detta "funzione di correzione di pile-up".

Successivamente, ottenuti i profili corretti, è necessario farne una media su un intervallo temporale di un minuto.

Dall'analisi del segnale lidar, si osserva un primo picco alla quota di 400-500 m, tale picco non corrisponde a radiazione retrodiffusa ed è detto picco di tempo zero.

La quota corrispondente al picco di tempo zero è 457.5 m ed è detta quota zero e, tenendo conto di tale valore, le quote sono state tarate sottraendo a quelle fornite dal sistema la quota zero.

Al segnale relativo ad un solo minuto di acquisizione è necessario poi sottrarre il fondo ambientale; il calcolo del fondo da sottrarre è stato effettuato eseguendo la media dei fotoconteggi che si ottengono prima

del picco di tempo zero, in cui sicuramente ciò che si osserva non deriva da retrodiffusione in atmosfera ma dai fotoni della radiazione di fondo.

Successivamente si è eseguita un'operazione di binning a 8 punti, portando la risoluzione spaziale iniziale di 7.5 m a 60 m.

L'operazione di binning su un numero variabile di punti ha come effetto la linearizzazione del segnale nell'intervallo di punti in cui si esegue, si riducono quindi le fluttuazioni ma, nel contempo, si diminuisce la risoluzione del segnale. Nello specifico applicare il binning ad n dati significa farne la media ed associare il risultato ottenuto al corrispondente punto medio tra i dati.

I profili così ottenuti, relativi ciascuno ad un solo minuto, devono essere successivamente mediati su un intervallo temporale di mezz'ora di acquisizione. A questo punto è possibile ottenere un primo andamento del segnale laser in funzione delle quote.

Tale segnale deve essere poi normalizzato rispetto ad un profilo molecolare medio, relativo alle condizioni di pressione e temperatura della mezz'ora su cui si è mediato, figura 3-6.

Una volta ottenuto il profilo lidar mediato su trenta minuti, è possibile ricavare il Range Corrected Signal, moltiplicando il segnale stesso per il quadrato della quota.

Bisogna, poi, calcolare l'errore sull'RCS e, dato che il segnale ottenuto è la media di un certo numero di segnali, come errore su di esso è stata quindi considerata la deviazione standard della media.

Tale operazione, nonostante sia l'unica statisticamente corretta, non tiene conto di altri fattori che entrano in gioco nel fare una media temporale

dei segnali; l'atmosfera, ad esempio, può variare molto durante il tempo di integrazione e ciò determina una variazione del segnale di fondo.

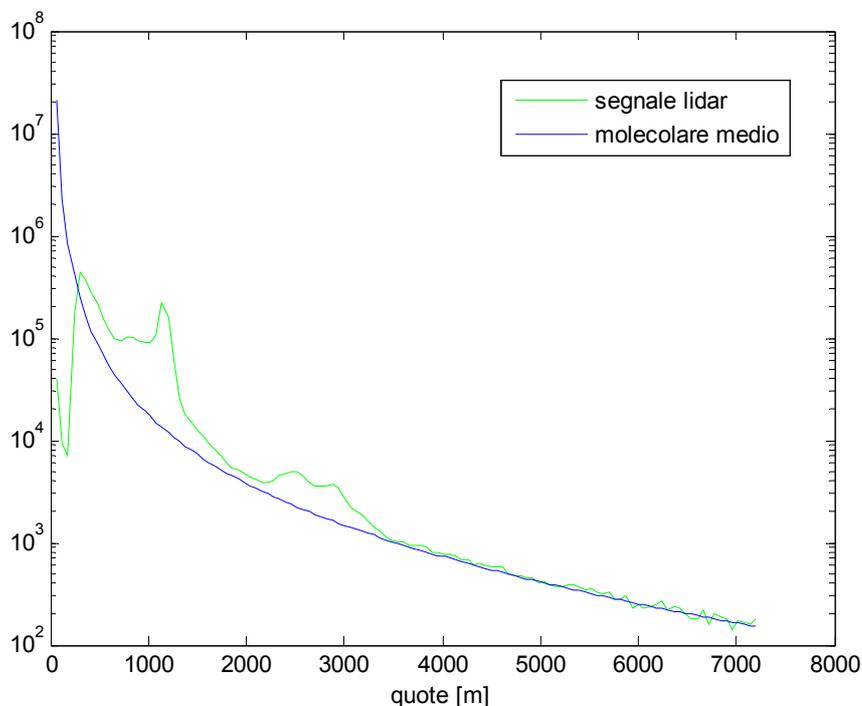


figura 3-6: Andamento del segnale lidar normalizzato rispetto ad un molecolare medio

L'RCS così ottenuto deve essere quindi confrontato con l'RCS del segnale molecolare dovuto alle sole molecole, senza considerare gli aerosol presenti in atmosfera. Per fare ciò occorre dapprima determinare i valori della densità e della sezione d'urto differenziale di retrodiffusione, nel caso di scattering di Rayleigh.

La densità è ricavata a partire dai valori di temperature e pressione calcolati negli intervalli di tempo in cui vengono effettuate le acquisizioni ed è diverso per ogni quota, mentre per la sezione d'urto si richiama la formula (2.21) precedentemente analizzata. In tal modo è possibile calcolare il coefficiente di backscattering molecolare da cui

ricavare il coefficiente di estinzione molecolare e lo spessore ottico del mezzo.

Il segnale molecolare viene quindi determinato applicando la seguente formula:

$$\text{segnale molecolare} = \frac{\text{numberdensity} * e^{-2 \int_0^r \alpha_{mol} dz}}{r^2} \quad (3.1)$$

da cui, moltiplicando per il quadrato della quota, si ricava il Range Corrected Signal.

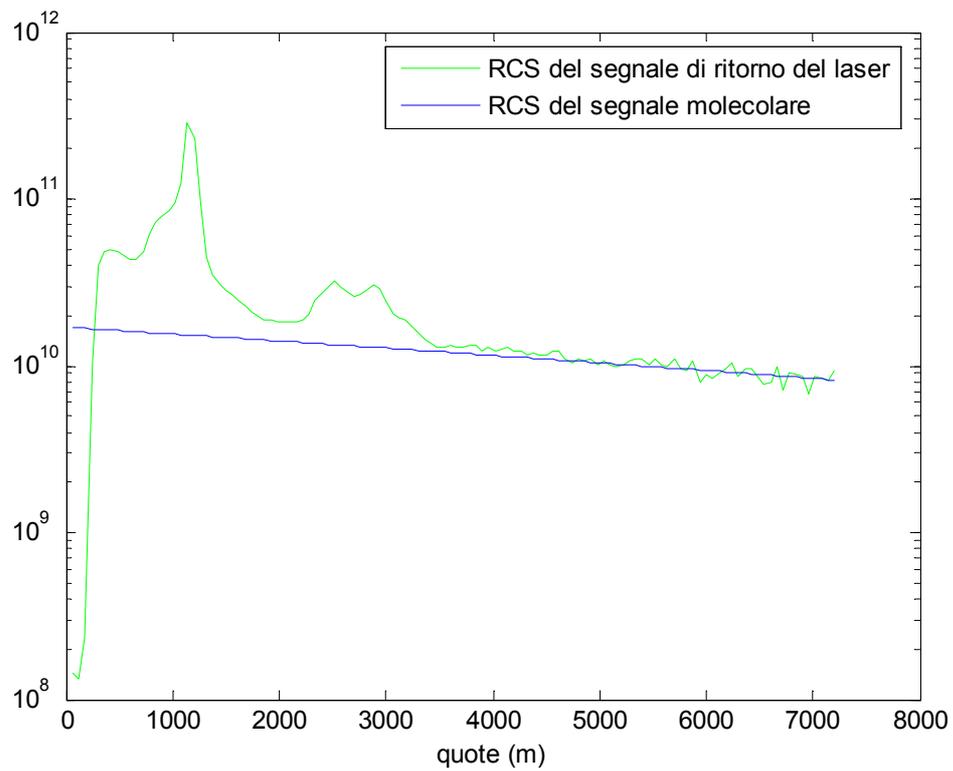


figura 3-7: Andamento del Range Corrected Signal normalizzato sul molecolare

Dal profilo normalizzato si calcola, successivamente, il profilo del coefficiente di retrodiffusione aerosolica utilizzando l'algoritmo di Klett. Bisogna precisare, tuttavia, che non sempre l'operazione di normalizzazione al profilo molecolare del profilo lidar è possibile.

Tale operazione consiste, per l'appunto, nel far coincidere in media i due profili in quegli intervalli di quote in cui il segnale lidar è dovuto alla sola retrodiffusione di gas molecolari dell'aria, essendo in presenza di aria priva di qualsiasi aerosol o tracciante.

Può accadere, invece, che a causa ad esempio della presenza di nubi a partire dalle quote in cui generalmente vi è aria pulita, provenga un segnale troppo rumoroso che non consenta di effettuare la normalizzazione necessaria per utilizzare l'algoritmo di Klett.

CAPITOLO 4

DESCRIZIONE DEL SOFTWARE SVILUPPATO

Nel seguente capitolo viene descritta la parte sperimentale del mio lavoro di tesi, che è consistita nell'implementare il software M.A.P.S. (Monitoring of Atmosphere Particulate Software) in grado di elaborare i dati forniti da una campagna di misure lidar di concentrazione di particolato per l'analisi dell'evoluzione degli aerosol nello strato limite planetario.

Il software realizzato traduce in linguaggio di programmazione tutto lo studio teorico fin'ora presentato.

Il capitolo è strutturato in tre parti:

- un manuale d'uso in cui vengono presentate le generalità del programma e la relativa guida per l'utente;
- la stampa dei listati sorgente commentati scritti in linguaggio Matlab;
- la relativa documentazione del programma in cui viene effettuata una descrizione di tutte le procedure utilizzate.

4.1 Manuale d'uso

Vengono di seguito descritte le caratteristiche principali del software e presentata una facile guida all'utilizzo dei programmi matlab compilati, in modo da garantirne un efficiente funzionamento sia per coloro che hanno dimestichezza con l'ambiente matlab e il suo linguaggio di programmazione, sia per chi, non conoscendo il matlab, può essere in grado, tuttavia, mettendo in pratica le proprie conoscenze teoriche dell'argomento, di utilizzare l'insieme dei programmi di seguito presentati.

4.1.1 Generalità

Il software M.A.P.S. è fornito all'utente su cd-rom.

Il programma elabora i dati acquisiti in campagne di misure lidar al fine di ottenere gli andamenti del profilo lidar, del segnale molecolare, del coefficiente di retrodiffusione aerosolico e del coefficiente di estinzione aerosolico, nonché mappe qualitative indicanti la presenza e l'evoluzione del particolato in atmosfera.

Il programma non ha limiti hardware, è pertanto utilizzabile su tutti i computer presenti attualmente in commercio.

Per ciò che concerne il software, il programma è stato compilato utilizzando il linguaggio di programmazione Matlab7.0 su sistema operativo WindowsXp.

Occorre pertanto, prima di procedere all'esecuzione del programma, installare tale versione del Matlab. Dopo aver aperto il Matlab7.0, il programma è eseguibile dal cd-rom una volta che si è modificata la *current directory* predefinita, ma è anche possibile e preferibile, per velocizzare le operazioni, salvarlo su disco fisso.

Anche in questo caso è necessario modificare la directory e ciò può essere eseguito sia dalla finestra a tendina in alto a destra che dall'apposita schermata a sinistra. Questo procedimento deve essere ripetuto ogni qual volta si apre il matlab7.0 per l'esecuzione del programma, per cui risulta preferibile aggiungere la cartella in cui si è salvato il programma tra quelle predefinite del matlab.

Quanto detto si traduce nelle seguenti operazioni: dal menù *file* si sceglie *set path* e poi *add folder*, dopodiché si seleziona la cartella desiderata e si preme *save* nonché *close*. In questo modo, tutte le volte che si apre il matlab, è direttamente possibile eseguire uno dei programmi desiderati semplicemente scrivendone il nome nella finestra di comando.

4.1.2 Guida all'uso

Il programma compilato è costituito da cinque procedure principali, *function*, e tredici *sub function*, strettamente legate alle precedenti, tramite le quali è possibile, come detto, ottenere grafici relativi all'andamento di alcune delle grandezze fondamentali nell'analisi della concentrazione del particolato in atmosfera.

Le function vengono richiamate semplicemente digitando il rispettivo nome nella *Command window* del matlab, mentre le sub function non vengono richiamate direttamente ma solo all'interno delle procedure principali. È tuttavia possibile far eseguire indipendentemente una di queste prestando ben attenzione a quali sono i parametri da fornire in ingresso a ciascuna di esse. Quando, invece, si richiama una delle function principali, immediatamente, nella finestra di comando, vengono poste delle domande relative alla directory dalla quale attingere i files da analizzare e, in questo caso, bisogna ricordare di inserire il percorso indicato tra due apici.

Così, ad esempio, se si vuole eseguire il programma “*segnale_minuto*”, basta scrivere nella command window

`segnale_minuto`

e premere invio; nella stessa finestra comparirà

`inserire la directory dalla quale prendere i files`

e quindi scrivere

`'C:\Documenti\tesi\raw data'`

In caso contrario, ovvero dimenticando di inserire gli apici, il programma darà errore

`??? C:\Documenti\tesi\raw data`

|

`Error: Expected a variable, function, or constant, found "\".`

`Error in ==> c:\documenti\tesi\programmi matlab\segnale_lidar_min.m`

`On line 11 ==> path_read=input('inserire il percorso dal quale prendere i files');`

Alcuni programmi forniscono direttamente l'output, che verrà poi utilizzato come input da altre procedure, mentre altri, prima di generare i risultati, spesso grafici, richiedono l'inserimento di parametri, valori, che possono, di volta in volta, cambiare a seconda dello studio che si intende svolgere. Proprio per tale ragione il programma pone all'utente delle domande, in modo da potersi adattare dinamicamente alle esigenze senza comportare la modifica di alcuna riga di programma.

Naturalmente ciascuna procedura può essere modificata e ciò si realizza entrando nell'editor del programma e apportando i cambiamenti necessari. Occorre ricordare, tuttavia, che ogni modifica effettuata, anche solo il cambiamento del nome di una variabile, riguarda l'intero programma e anche le altre procedure che lo utilizzano, per cui è bene prestare attenzione ed eseguire la stessa correzione ovunque.

Bisogna, infine, ricordare la sintassi del matlab e tener presente che anche il mancato inserimento di una parentesi o di una punteggiatura può generare errori spesso difficili da individuare anche se banali.

4.2 Listato del programma

Il software, nel suo totale, è costituito da 18 routines che vengono di seguito presentate così come sono state compilate in linguaggio matlab.

Le function principali, come detto, sono cinque: *segnale_minuto*, *rsc_30min*, *beta_integrato*, *rsc_minuto_mappe* e *rsc_mappe*;

le sub-function invece sono: *leggi_bin*, *segnale_min*, *media_minuto*, *media*, *sottrai_fondo*, *binning_8_punti*, *import_molecolare*, *media_30min*, *import_density*, *import_quote*, *trova_posiz*, *integrale* e *rs_min_mappe*.

4.2.1 Segnale_minuto

```
%-----function per l'elaborazione dei dati ogni minuto-----
%-----da utilizzare nell'algoritmo di Klett-----

% Questa function effettua la lettura dei files binari nonchè la
% conversione,attraverso la sub function leggi_bin,dei files stessi
% ed il calcolo del segnale laser, tramite la function segnale_min,
% in un minuto di acquisizione.

% Vengono dati in input il percorso dal quale prendere i files e il
% percorso nel quale immettere poi i files processati

path_read=input('inserire il percorso dal quale prendere i files');
path_write=input('inserire il percorso nel quale memorizzare i
risultati');
graph=input('si desidera visualizzare il grafico?digita 1 in caso
affermativo,0 in caso contrario');

%-----
% Creo una matrice le cui righe forniscano la lista dei files che si
% vogliono analizzare
lista_files=ls(path_read);
% Definisco le dimensione della matrice
[r c]=size(lista_files);
%-----

%-----processamento dei files-----
% inizializzazioni matrice dei dati da processare
a=0;
d=0;
% contatore indicante l'indice del file che viene processato
cont=1;
% La lista dei files comincia a partire dalla terza riga della
% matrice lista_files prima creata
i=3;
```

```

disp(['processamento in corso ... file ',num2str(cont)]);
% si definisce il primo file della lista che viene processato
file_corrente=lista_files(i,:);
% si determina l'orario di acquisizione di tale file
orario=file_corrente(10:11);
% Per questo primo file viene richiamata la function leggi_bin
[data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_corrente,graph);

% Si ricorda che data_1 e data_2 sono i valori ottenuti applicando
le
% formule di conversione dei valori binari e ad_1 e ad_2 sono
variabili che
% tengono conto del tipo di acquisizione(1 se in digitale e 0 se in
% analogico).
clc
% Una volta ricavati i dati,a seconda del tipo di acquisizione, creo
% due matrici,una che memorizzi tutti i dati in digitale e l'altra
% che memorizzi invece quelli in analogico
if ad_1==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_1;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_1;
end
if ad_2==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_2;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_2;
end
clear data_1 data_2

%-----Ciclo di processamento dei files successivi al primo-----
% Per poter considerare solo i files relativi ad uno stesso minuto
% di acquisizione,è necessario effettuare un confronto tra due
% files,il primo e quello che,di volta in volta, segue,in modo da
% fermare il processamento quando il file seguente non rientra nello
% stesso minuto di acquisizione del primo.
for j=i+1:r
    % incremento del contatore
    cont=cont+1;
    disp(['processamento in corso ... file ',num2str(cont)]);
    % file da processare
    file_succ=lista_files(j,:);
    % orario di acquisizione
    orario_new=file_succ(10:11);
    % controllo sulla procedura
    if orario_new == orario
        [data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_succ,graph);
        % si continua a creare la matrice definita fuori dal ciclo
        if ad_1==1
            d=d+1;
            data_digitale(:,d)=data_1;

```

```

else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_1;
end
if ad_2==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_2;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_2;
end
clear data_1 data_2
else
    % se il file analizzato non rientra nello stesso minuto di
    % acquisizione del precedente, allora si richiama la
    % function segnale_min per poter determinare il profilo
    % lidar dei segnali acquisiti nel precedente minuto

    % è necessario definire dapprima un nome che sia relativo a
    % tutti i files precedenti
    name=lista_files(j-1,1:11);

[profilo_binnato]=segnale_min(data_digitale,path_write,name);
% clear profilo_binnato

% a questo punto,per ricominciare il processo, è necessario:
% azzerare la matrice dei dati
a=0;
d=0;
% inizializzare nuovamente il contatore
cont=1;
% definire nuovamente l'orario
orario=orario_new;
disp(['processamento in corso ... file ',num2str(cont)]);
[data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_succ,
graph);
if ad_1==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_1;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_1;
end
if ad_2==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_2;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_2;
end
clear data_1 data_2
end
if j == r
    % si processa l'ultimo blocco di files
    name=lista_files(j,1:11);
[profilo_binnato]=segnale_min(data_digitale,path_write,name);

```

```

        % clear profilo_binnato
    end
end
%-----

```

4.2.2 Leggi_bin

```

% -----
% Questo programma serve a convertire i files binari, generati dal
% programma di acquisizione PLAPMI, in grandezze fisiche
% rappresentanti il rate di conteggio dei fotoni. In particolare si
% avranno MHz nel caso di acquisizione in digitale e V nel caso di
% acquisizione in analogico
% -----

%-----
% I files binari hanno il seguente formato:
%
% la I LINEA contiene informazioni relative al nome del file e
% alla data di creazione. Solitamente comincia con uno SPAZIO
% seguito sempre da una lettera con le relative informazioni sulla
% data e l'ora di acquisizione della misura
%
% la II LINEA riguarda il sistema, quindi il sito, con parametri
% relativi alla posizione del sistema stesso
%
% la III LINEA fornisce informazioni sui 2 laser utilizzati, ovvero
% il numero di impulsi inviati e la velocità con cui questi vengono
% ripetuti
%
% la IV e V LINEA contengono informazioni riguardanti il tipo di
% acquisizione, se in analogico o digitale, il tipo di laser, il numero
% di data points, la larghezza di binnaggio, la lunghezza
% d'onda del fascio laser e ulteriori informazioni sul set di dati.
% In particolar modo queste si presentano quasi sempre nella
% seguente forma
% 1 0 1 01024 1 0000 07.5   355.o 0 0 00 000 12 004010 0.500 BT0
% 1 1 1 01024 1 0000 07.5   355.o 0 0 00 000 00 004010 25.0000 BC0
% dove
% il primo carattere è sempre uno SPAZIO
% il secondo (1/0) indica il DATA SET ACTIVE
% il terzo (1/0) indica l'acquisizione dei fotoni, digitale o
% analogico
% viene indicato poi
% il tipo di laser(1)
% il numero di punti(01024)
% il voltaggio(0000)
% la larghezza di binnaggio(07.5)

```

```

% la lunghezza d'onda(355 opp 532) seguita da un punto
% lo stato di polarizzazione (0-nessuno p-parallelo
% s-perpendicolare)
% 0 0 000
% il numero di bits dell'ACD(12 se analogico,00 se digitale)
% il numero di colpi(questo è l'unico valore che cambia per ogni
% file)
% il data range dell'ACD(0.500 se analogico,25.0000 se digitale)
% il dispositivo di identificazione(BT0 se analogico,BC0 se
% digitale)
% -----

% ----- Apertura files binari -----
function [data_1,data_2,ad_1,ad_2,wavelength_1,wavelength_2,
        bin_width_1,bin_width_2] = leggi_bin(percorso,file_name,grafico);

% Per poter utilizzare i files binari, è necessario:
% 1) Definire il percorso dal quale prendere il file
path = percorso;

% 2) Definire il nome del file
filename=file_name;
% 3) Concatenare percorso e nome
file_dati=[path,'\', filename];
% -----

% ----- Analisi dei files binari -----
% Apertura del file in modalità testo
fid=fopen(file_dati,'rt');

% Una volta aperto il file,è necessario interpretarne le righe di
% codice,per riuscire a ricavare i parametri utili ai fini del
% calcolo delle grandezze fisiche che si vogliono determinare

% ----- Prima header -----
header1(1,:)=fgetl(fid);
% nome del file
nome_file=header1(1,2:17);
% -----

% ----- Seconda header -----
header2(1,:)=fgetl(fid);
% luogo nel quale si effettua la misura
sito=header2(1,2:7);
% data
data=header2(1,9:18);
% ora
inizio_misura=header2(1,20:27);
fine_misura=header2(1,40:47);
% posizione
altitude=str2num(header2(1,49:52));
longitude=str2num(header2(1,54:59));
latitude=str2num(header2(1,61:66));
zenith_angle=str2num(header2(1,68:69));

```

```

% -----

% ----- Terza header -----
header3(1,:)=fgetl(fid);
% numero di impulsi
number_of_laser_shots_of_type_1=str2num(header3(1,2:8));
% velocità
repetition_rate_of_laser_1=str2num(header3(1,10:13));
% numero di impulsi
number_of_laser_shots_of_type_2=str2num(header3(1,15:21));
% velocità
repetition_rate_of_laser_2=str2num(header3(1,23:26));
number_of_data_set=str2num(header3(1,28:29));
% -----

% ----- Quarta header -----
header4(1,:)=fgetl(fid);
data_set_active_1=str2num(header4(1,2));
% tipo di acquisizione
ad_1=str2num(header4(1,4));
% tipo di laser
laser_type_1=str2num(header4(1,6));
% numero di punti
number_of_data_points_1=str2num(header4(1,8:12));
% voltaggio
high_voltage_of_the_PM_1=str2num(header4(1,16:19));
% binning
bin_width_1=str2num(header4(1,21:24));
% lunghezza d'onda
wavelength_1=str2num(header4(1,28:30));
% polarizzazione
polarization_status_1=header4(1,32);
number_of_bits_of_the_ADC_1=str2num(header4(1,45:46));
number_of_shots_1=str2num(header4(1,48:53));
data_range_of_the_ADC_1=str2num(header4(1,55:59));
device_identificator_1=header4(1,61:63);
% -----

% ----- Quinta header -----
header5(1,:)=fgetl(fid);
data_set_active_2=str2num(header5(1,2));
% tipo di acquisizione
ad_2=str2num(header5(1,4));
% tipo di laser
laser_type_2=str2num(header5(1,6));
% numero di punti
number_of_data_points_2=str2num(header5(1,8:12));
% voltaggio
high_voltage_of_the_PM_2=str2num(header5(1,16:19));
% binning
bin_width_2=str2num(header5(1,21:24));
% lunghezza d'onda
wavelength_2=str2num(header5(1,28:30));
% polarizzazione
polarization_status_2=header5(1,32);
number_of_bits_of_the_ADC_2=str2num(header5(1,45:46));

```

```

number_of_shots_2=str2num(header5(1,48:53));
data_range_of_the_ADC_2=str2num(header5(1,55:61));
device_identificator_2=header5(1,63:65);
% -----

% Chiusura del file in modalità testo
stato_chiusura=fclose(fid);
% -----

% ----- Calcolo delle dimensioni del file da analizzare -----

% Apertura del file
fid=fopen(file_dati,'r');

% Per calcolare la dimensione del file bisogna portarsi alla fine
% del file stesso
fseek(fid,0,'eof');

% Calcolo dimensione del file
filesize=ftell(fid);

% Poichè ci troviamo alla fine del file,una volta ottenuta la
% dimensione è opportuno chiudere il file stesso perchè ulteriori
% operazioni,come ad esempio la lettura della parte di codice
% binario,potrebbero generare messaggi di errore
fclose(fid);
% -----

% ----- Conversione del file -----
% Apertura del file in modalità binaria
fid=fopen(file_dati,'r');

% Si fanno scorrere le prime headers già analizzate,fino alla parte
% riguardante il codice binario
for i=1:6
    fgetl(fid);
end

% Ciclo di conversione del file da binario a decimale

% la conversione verrà eseguita per i primi 1024 campioni
for i=1:number_of_data_points_1
    % si considerano 4 byte per volta che,dopo essere
    % convertiti in valori binari,devono essere concatenati.

    % si leggono,uno per volta,i valori all'interno del file
    % binario a partire dalla posizione corrente
    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario
    bin1=dec2bin(val,8);

    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario
    bin2=dec2bin(val,8);
end

```

```

val=fread(fid,1);
% si effettua la conversione da decimale a binario
bin3=dec2bin(val,8);

val=fread(fid,1);
% si effettua la conversione da decimale a binario
bin4=dec2bin(val,8);

% a questo punto i quattro valori binari vengono accodati
% l'uno all'altro in modo tale da considerare prima il meno
% significativo
concat=[bin4 bin3 bin2 bin1];

% una volta ottenuto concat, questo deve essere nuovamente
% convertito in decimale
dec(i)=bin2dec(concat);
end

% per analizzare i successivi 1024 campioni bisogna saltare 2
% posizioni, relative ai caratteri 13,10
fread(fid,1);
fread(fid,1);

% la conversione verrà eseguita ora per gli altri 1024 campioni
for j=1:number_of_data_points_2
    % si considerano 4 byte per volta che, dopo essere stati
    % convertiti in valori binari, devono essere concatenati.

    % si leggono, uno per volta, i valori all'interno del file
    % binario a partire dalla posizione corrente
    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario
    bin1=dec2bin(val,8);

    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario
    bin2=dec2bin(val,8);

    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario
    bin3=dec2bin(val,8);

    val=fread(fid,1);
    % si effettua la conversione da decimale a binario

    bin4=dec2bin(val,8);

    % a questo punto i quattro valori binari vengono accodati
    % l'uno all'altro in modo tale da considerare prima il meno
    % significativo
    concat=[bin4 bin3 bin2 bin1];
    % una volta ottenuto concat, questo deve essere nuovamente
    % convertito in decimale, tenendo conto questa volta che
    % bisogna accodare i nuovi valori a quelli ottenuti con il

```

```

        % precedente ciclo
        dec(j+number_of_data_points_1)=bin2dec(concat);
end
% -----

% A questo punto,dopo aver effettuato tutte le operazioni di lettura
% del file è necessario chiudere il file stesso
fclose(fid);

% ----- Conversione dei valori binari in grandezze fisiche -----

% Dopo aver ottenuto il vettore dei valori decimali, dec ,è
% necessario effettuare la conversione dei valori stessi in
% grandezze fisiche,attraverso delle formule che si differenziano
% nel caso di acquisizione in analogico e in fotoconteggio.
% Le formule di conversione,quindi,sono le seguenti:
%
% ----- ANALOGICO -----
%
% Analog(V) =
% =(raw accumulated data * data range of ADC) / (4096 * shot number)
%
%
% ----- DIGITALE -----
%
% Photoncount(MHz) =
% =raw accumulated data * (binwidth/7.5(m)) * (20 MHz/shotnumber)
% Per poter applicare le formule appena scritte è necessario quindi
% analizzare il tipo di acquisizione effettuato dai due strumenti
% separatamente.
% Dall'interpretazione delle headers effettuata all'inizio,sono
% state ricavate due variabili ad_1 e ad_2 che forniscono proprio
% l'informazione relativa all'acquisizione analogico/digitale del
% primo e del secondo strumento.
% Analizziamo i vari casi:
% 1) il primo laser acquisisce i dati in modalità analogica
%     e il secondo in digitale

if (ad_1==0) & (ad_2==1)
    % Per i primi 1024 valori si considera la formula per
    % l'Analogico
    data_1 = (dec(1:1024) * data_range_of_the_ADC_1) / (4096 *
    number_of_shots_1);

    % Per i valori che vanno dal 1025 alla fine si considera la
    % formula per il digitale

    data_2 = dec(1025:end) * (bin_width_2/7.5) *
    (20/number_of_shots_2);

    % 2) il primo laser acquisisce i dati in modalità digitale
    %     e il secondo in analogico

elseif (ad_1==1) & (ad_2==0)

```

```

% formula per il digitale
data_1 = dec(1:1024) * (bin_width_1/7.5) *
(20/number_of_shots_1);

% formula per l'analogico
data_2 = (dec(1025:end) * data_range_of_the_ADC_2) / (4096 *
number_of_shots_2);

% 3) entrambi i laser acquisiscono i dati in modalità analogica
elseif (ad_1==0) & (ad_2==0)
% formula per l'analogico
data_1 = (dec(1:1024) * data_range_of_the_ADC_1) / (4096 *
number_of_shots_1);

% formula per l'analogico
data_2 = (dec(1025:end) * data_range_of_the_ADC_2) / (4096 *
number_of_shots_2);

% 4) entrambi i laser acquisiscono i dati in modalità digitale
elseif (ad_1==1) & (ad_2==1)
% formula per il digitale
data_1 = dec(1:1024) * (bin_width_1/7.5) *
(20/number_of_shots_1);
% formula per il digitale
data_2 = dec(1025:end) * (bin_width_2/7.5) *
(20/number_of_shots_2);

end

% -----
quota_max = number_of_data_points_1 * 50*(10^-9)*3*10^8/2;
quota=0:7.5:(quota_max-15);
if grafico==1
    if ad_1==1
        figure
        plot(quota,data_1(1:end-1))
        xlabel('quota (m)')
        ylabel('fotoni acquisiti(Hz)')
        title('Dati acquisiti in modalità DIGITALE')
    else
        figure
        plot(quota,data_1(1:end-1))
        xlabel('quota (m)')
        ylabel('fotoni acquisiti(Hz)')
        title('Dati acquisiti in modalità ANALOGICA')
    end

    if ad_2==1
        figure
        plot(quota,data_2(1:end-1))
        xlabel('quota (m)')
        ylabel('fotoni acquisiti(Hz)')
        title('Dati acquisiti in modalità DIGITALE')
    else
        figure

```

```

        plot(quota,data_2(1:end-1))
        xlabel('quota (m)')
        ylabel('fotoni acquisiti(Hz)')
        title('Dati acquisiti in modalit  ANALOGICA')
    end

end

%-----

% ----- Generazione dell'output -----

% Si vuole a questo punto fare in modo che nel workspace del matlab
% compaiano soltanto le variabili di interesse,peranto verranno di
% seguito eliminate tutte quelle variabili che non risultino
% strettamente necessarie

% clear altitude analog ans bin concat data data_set_active_a
% data_set_active_p device_identificator_a device_identificator_p
% fid filename filesize fine_misura header1 header2 header3 header4
% header5 high_voltage_of_the_PM_a high_voltage_of_the_PM_p i
% inizio_misura_j laser_type_a laser_type_p latitude longitude
% nome_file number_of_bits_of_the_ADC_a number_of_bits_of_the_ADC_p
% number_of_data_points_a number_of_data_points_p number_of_data_set
% sito path polarization_status_a polarization_status_p
% repetition_rate_of_laser_1 repetition_rate_of_laser_2
% photon_counting stato_chiusura val p
% number_of_laser_shots_of_type_1 number_of_laser_shots_of_type_2
% zenith_angle wavelength_a wavelength_p
% -----

```

4.2.3 Segnale_min

```

%-----function per l'elaborazione del segnale laser-----
%-----in un minuto di acquisizione-----

function[profilo_binnato]=segnale_min(data_digitale,path_write,name)

% i parametri dati in input sono stati determinati nella function
% segnale_lidar_min

%-----Correzione di pile-up-----
% In genere vengono processati 14 o 15 files alla volta,relativi
% all'acquisizione ogni 4 secondi in un minuto,per cui la matrice
% dei data_digitale sar  costituita da 1024 righe,corrispondenti ad
% ogni quota e da 14 o 15 colonne relative ai files analizzati.
% La correzione di PILE-UP viene cos  effettuata:

```

```

%
%          dati pile-up = dati/(1-dati*1.8*10^-9)

% dimensioni della matrice dei dati digitali
[x y]=size(data_digitale);

I=ones(x,y);

% multiplico i dati digitali per un fattore di correzione
data_corr=data_digitale*1.8*10^-9;

data_pile_up=data_digitale./(I-data_corr);
%-----

%-----Segnale mediato su un minuto-----
% Di questi dati è necessario farne la media per ottenere un unico
% file ogni minuto.
% Viene richiamata a tal proposito la function media_minuto
profilo_ogni_minuto=media_minuto(data_pile_up); %1024 componenti

% l'ultima componente,dovuta all'elettronica di acquisizione,
% determina uno sbalzo di valori,pertanto non essendo
% rappresentativa di effettivi valori fisici,può essere eliminata
profilo_ogni_minuto=profilo_ogni_minuto(1:end-1); %1023 componenti
%-----

%-----Calcolo del fondo-----
% Una volta ottenuto il file relativo ad un minuto,bisogna sottrarre
% il fondo,che corrisponde al valore relativo alla quota zero.
% La componente relativa alla quota 457,5m è la 61
quota_zero=476.25;
ro=quota_zero/7.5;

% Per sottrarre il fondo,devo effettuare la media dei fotoconteggi
% che si ottengono prima del picco di tempo zero,in cui sicuramente
% quanto si osserva non deriva da retrodiffusione in atmosfera,ma
% dai fotoni della radiazione di fondo.
% I valori sono quelli precedenti ro.
% Viene a tal punto richiamata la function media
fondo=media(profilo_ogni_minuto,ro);
%-----

%-----
% A questo punto si calcola il nuovo file relativo al minuto,
% ottenuto sottraendo il fondo,attraverso la function sottrai_fondo.
% Si ottiene così un vettore con un numero di componenti pari a
% quello di partenza scalato di 60(sono le componenti che precedono
% quella corrispondente alla quota zero)
profilo_minuto_new=sottrai_fondo(profilo_ogni_minuto,fondo,ro);
%(1x963)
%-----

```

```

%-----Binning-----
% Una volta ottenuto il segnale ogni minuto è necessario effettuare
% il binning ogni 8 punti, in modo da ottenere dati ogni 60 metri

% Applicando la function binning_8_punti si ottiene:
profilo_binnato=binning_8_punti(profilo_minuto_new);    % 1x120
%-----

%-----Salvataggio del segnale-----

file_name=[path_write, '\', name, '.mat'];

% salvataggio dati
save(file_name, 'profilo_binnato');
%-----

```

4.2.4 Media_minuto

```

%-----function per il calcolo della media dei dati su 1 minuto-----

function M=media_minuto(A)

[r c]=size(A);
for i=1:r
    somma=0;
    for j=1:c
        s=A(i,j);
        somma=somma+s;
    end
    M(i)=somma/c;
end

```

4.2.5 Media

```

%-----funzione per il calcolo del fondo-----

function media=media(x,ro);
% quota_zero=457.5;
% riga corrispondente al fondo
% ro=quota_zero/7.5+1;

```

```

% ciclo di calcolo della media relativa alle righe precedenti quella
% corrispondente alla quota zero
somma=0;
for i=1:ro-1
    s=x(i);
    somma=somma+s;
end
media=somma/(ro-1);

```

4.2.6 Sottrai_fondo

```

%-----function per la sottrazione del fondo-----

function x_new=sottrai_fondo(x,a,ro);

% x:vettore dal quale sottrarre il fondo
% a:fondo
% ro:riga corrispondente alla quota 457.5

[r c]=size(x);

% inizializzazione
d=0;

% il fondo viene sottratto a partire dalla componente corrispondente
% alla quota 457.5
for i=ro:c
    d=d+1;
    x_new(d)=x(i)-a;
end

```

4.2.7 Binning_8_punti

```

%-----function per il binning ogni 8 punti-----

function media=binning_8_punti(x);

% x:vettore al quale applicare il binning

[r c]=size(x);
i=1;
d=1;

```

```

while i<c-3
    somma=0;
    % si effettua la somma ogni 8 punti
    for b=0:7
        s=x(i+b);
        somma=somma+s;
    end
    % si calcola a questo punto la media
    media(d)=somma/8;
    i=i+8;
    d=d+1;
end

```

4.2.8 RCS_30min

```

%-----function per l'elaborazione dei files ogni 30 min-----

function []=rcs_30min(path_read,path_write);

% Definisco il percorso dal quale leggere i files.
% Come percorso di lettura deve essere fornita la directory
% contenente i segnali laser relativi allo stesso intervallo
% temporale
path_lettura=path_read;

% Creo una matrice le cui righe forniscano la lista dei files che si
% vogliono analizzare
lista_files=ls(path_lettura);
% Definisco le dimensioni della matrice
[r c]=size(lista_files);

%-----processamento dei files-----
% La lista dei files comincia a partire dalla terza riga della
% matrice lista_files prima creata
i=3;
while i < r
    % inizializzazione matrice dei dati
    d=0;
    % contatore indicante l'indice del file che viene processato
    cont=0;
    for j=i:i+29
        % incremento del contatore
        cont=cont+1;
        disp(['processamento in corso ... file ',num2str(cont) ,
            ' di ', num2str(30)]);
        % si definisce il file che deve essere processato
        curr_file=lista_files(j,:);
        % si crea il nome
    end
end

```

```

file_name=[path_lettura, '\\', curr_file];
% per importare i dati contenenti nel vettore da analizzare
% è necessario aprire il file
fid=fopen(file_name, 'r');
d=d+1;
dati(d, :)=importdata(file_name);
fclose(fid);
end
%-----

%-----Quote-----

% la massima quota è 7680
quota_zero=457.5;
quota_max = 7680;
quote=7.5:7.5:quota_max;    %sono 1024 punti di quota

% ricavo le quote corrette
quote_corrette=quote-quota_zero;
quota_max_corretta=quote_corrette(end);

% il vettore delle quote associate ai dati binnati sarà
quote_binnate=60:60:quota_max_corretta; %sono 120 punti di quota
%-----

%-----molecolare medio-----
molecolare=import_molecolare('C:\Documents and Settings\
CORISTA\Desktop\luisa\tavole', 'molecolare.dat');

figure
plot(quote_binnate, molecolare)
xlabel('quote [m]')
ylabel('molecolare')
%-----

%-----profilo mediato su 30 min-----
% Una volta costruita la matrice dei dati, (30x120), in cui ogni
% riga contiene i dati relativi ad ogni minuto di acquisizione,
% bisogna effettuare la media su 30 minuti

segnale_lidar=media_30min(dati); %(1x120)

figure
plot(quote_binnate, segnale_lidar)
xlabel('quote [m]')
ylabel('segnale lidar')
%-----

%-----Adagiamento del segnale sul molecolare-----
fondo=input('inserire fondo');

fs=input('inserire fattore di scala');

```

```

segnale_lidar_new=(segnale_lidar-fondo)*fs;

% è importante ricordare che i grafici devono essere in scala
% logaritmica, per cui una volta ottenuta la figura occorre
% modificare la scala delle y dal menù edit axis property

figure
plot(quote_binnate,segnale_lidar_new,'-g',quote_binnate,
     molecolare,'-b')
xlabel('quote [m]')
%-----

%-----RCS del segnale lidar-----
% Una volta ottenuto il file mediato su 30 minuti devo
% moltiplicarlo per il quadrato della quota

RCS_segnale_lidar=segnale_lidar_new.*quote_binnate.^2;

% anche l'RCS deve essere in scala logaritmica
figure
plot(quote_binnate,RCS_segnale_lidar)
xlabel('quote [m]')
ylabel('Range corrected signal')
%-----

%-----Errore-----
% A questo punto occorre calcolare l'errore,visto come la
% deviazione standard dei files mediati ogni 30 minuti
errore=std(RCS_segnale_lidar);
%-----

%-----Calcolo del segnale molecolare-----
%-----dovuto alle sole molecole-----

% Per poter calcolare il segnale molecolare dovuto alle sole
% molecole e non agli aerosol è necessario determinare dapprima
% i valori del number density alle varie quote. Questi valori ci
% vengono forniti richiamando il programma "ussal976", che
% calcola inoltre i valori di pressione e temperatura alle varie
% quote.

number_density=import_density2('C:\Documents and Settings\
                             CORISTA\Desktop\luisa\tavole','densità.dat');
% sono 128 valori, si esclude quello relativo alla quota 0 m
quote_60_m=import_quote('C:\Documents and Settings\CORISTA\
                        Desktop\luisa\tavole da ussal976','TABLE2_1.DAT');
% sono 128 valori, si esclude quello relativo alla quota 0 m

% Noto il number density è possibile calcolare il beta
% molecolare attraverso la seguente formula:
%
%
%           beta_molecolare = Ng * dsigma/domega

```

```

%
% dove Ng rappresenta il numero di molecole di gas x unità di
% volume e dsigma/domega la sezione d'urto
% esplicitando:
%
%   beta_molecolare=number_density*5.45*(550/lambda)^4*10^-28

lambda=input('inserisci lunghezza d_onda:');

% Coefficiente di backscattering

% il number density ha le dimensioni di 1/m^3,mentre la sezione
% d'urto di cm^2/sr,per cui,passando tutto in metri occorre
% moltiplicare per 10^-4
beta_molecolare=(5.45*(550/lambda)^4)*10^-32*number_density;

% coefficiente di estinzione dell'atmosfera
alfa_molecolare=beta_molecolare*8*pi/3;

% incremento relativo alla quota
dz=60;

spessore_ottico=sum(alfa_molecolare)*dz;

% E' possibile a questo punto calcolare il segnale molecolare
% applicando la seguente formula:
%
% segnale molecolare =
%   = number_density * e^(-2*spessore_ottico)/quota^2

segn_molecolare=number_density*exp(-2*spessore_ottico)./
    quote_60_m.^2;
segn_molecolare=segn_molecolare';

% Una volta ottenuto il molecolare devo moltiplicarlo per il
% quadrato della quota,in modo da ottenere l'RCS del molecolare

RCS_molecolare=segn_molecolare(1:end-8).*quote_binnate.^2;
% (1x120)

figure
plot(quote_binnate,RCS_molecolare)
xlabel('quote (m)')
ylabel('RCS del molecolare')
%-----

%-----
%-----Algorithmo di Klett-----
%-----

% Occorre determinare,a questo punto,il valore della quota a
% partire dal quale il segnale laser e il molecolare coincidono.

quota_rif=input('inserire quota di riferimento');

```

```

posiz=trova_posiz(quota_rif,quote_binnate);

% trovo il valore dell'RCS del segnale laser e del molecolare
% corrispondente alla posizione relativa alla quota di
% riferimento
segn=RCS_segnaile_lidar(posiz);
mol=RCS_molecolare(posiz);

% calcolo il loro rapporto
k=segn/mol;

% effettuo la correzione del segnale,moltiplicando il molecolare
% stesso per il parametro appena determinato
RCS_molecolare_corr=RCS_molecolare*k;      %(1x120)
%-----

%-----Confronto RCS molecolare-RCS segnale laser-----

figure
plot(quote_binnate,RCS_segnaile_lidar,'-g',quote_binnate,
      RCS_molecolare_corr,'-b')
xlabel('quote (m)')
legend('RCS del segnale di ritorno del laser','RCS del segnale
       molecolare',1)
% in scala logaritmica
%-----

%-----Calcolo del punto d'intersezione dei 2 segnali-----

inters=intersect(RCS_segnaile_lidar,RCS_molecolare_corr);
%-----

%-----
% L'equazione Lidar di singolo scattering presenta due
% incognite,il coefficiente di estinzione aerosolico e il
% coefficiente di backscattering aerosolico.
% Allo scopo di ricavare questi coefficienti,sono stati messi a
% punto opportuni algoritmi di calcolo per l'inversione
% dell'equazione.
% Il metodo di KLETT,nello specifico,consente di determinare
% tali parametri in condizioni di scattering elastico,supposto
% noto il LIDAR RATIO,ovvero il rapporto tra alfa e beta
% aerosolici. E'nessario introdurre una variabile
% S(z),definita come il log(RCS),e fissare un valore di tale
% variabile ad una quota di riferimento,dove per quota di
% riferimento si intende il punto a più alta quota,dove non si
% riscontra più la presenza di aerosol,ovvero dove molecolare e
% segnale risultano coincidenti.
% Analogamente è necessario calcolarsi il beta molecolare a tale
% quota.Una volta noti tutti i parametri,è possibile calcolare
% il coefficiente di retrodiffusione totale applicando la
% seguente formula:

```

```

%
%
%   beta(z)=exp(S(z)-Sm)/[1/betam + 2*integ(K*exp(S(z)-Sm) dz)
%
%   dove K è il LIDAR RATIO e
%
%   S(z)=log(RCS)-2*integ((1-3K/8pi)*alfa_mol dz)

% lidar ratio,variabile a seconda della quota

quota=input('inserire quota per il lidar ratio');
% indice corrispondente alla quota indicata
val_1=trova_posiz(quota,quote_binnate);
% valore del lidar ratio
K1(1:val_1)=input('inserire lidar ratio');

quota=input('inserire quota per il lidar ratio');
val_2=trova_posiz(quota,quote_binnate);
val=val_2-val_1;
K2(1:val)=input('inserire lidar ratio');

quota=input('inserire quota per il lidar ratio');
val_3=trova_posiz(quota,quote_binnate);
val_n=val_3-val_2;
K3(1:val_n)=input('inserire lidar ratio');

%quota=input('inserire penultima quota per il lidar ratio');
% l'ultima quota che si considera è sempre pari a 7140 m
quota=7140;
val_4=trova_posiz(quota,quote_binnate);
val_m=val_4-val_3;
K4(1:val_m+1)=input('inserire lidar ratio');

% si crea a questo punto il vettore contenente tutti i valori
% del lidar ratio da inserire nell'algorithmo di klett
K=[K1 K2 K3 K4];

% beta molecolare alla quota di riferimento
betam=beta_molecolare(posiz);

alfa_molecolare=alfa_molecolare(1:end-8)';

alfa_corr=(1-3*K/(8*pi)).*alfa_molecolare;   %(1x120)

% logaritmo dell'RCS
S=log(RCS_segnale_lidar)-2*
    integrale(alfa_corr,dz,posiz);           %(1x120)

% logaritmo dell'RCS alla quota di riferimento
Sm=S(posiz);

%figure
%plot(quote_binnate,S)
%xlabel('quote [m]')

```

```

%ylabel('logaritmo RCS')

esp=exp(S-Sm);

% figure
% plot(quote_binnate,esp)

esp_corr=esp.*K;

% coefficiente di backscattering totale
beta=esp./(1/betam+2*integrale(esp_corr,dz,posiz));

figure
plot(quote_binnate,beta)
xlabel('quote [m]')
ylabel('beta')

% Noto il beta totale è possibile infine calcolare la nostra
% incognita, ovvero il coefficiente di backscattering aerosolico,
% come differenza del beta appena calcolato e del beta
% molecolare
beta_aer=beta-beta_molecolare(1:end-8)';

figure
plot(quote_binnate,beta_aer)
xlabel('quote [m]')
ylabel('beta aerosolico')

% Per ottenere l'alfa aerosolico occorre moltiplicare il beta
% aerosolico appena calcolato per il lidar ratio
alfa_aer=beta_aer.*K;

figure
plot(quote_binnate,alfa_aer)
xlabel('quote [m]')
ylabel('alfa aerosolico')
%-----

%-----Salvataggio del beta aerosolico-----
name=lista_files(i,1:11);

file_name=[path_write,'\', name, '.mat'];

% salvataggio dati
save(file_name, 'beta_aer');
%-----

% Dopo aver effettuato la procedura per i 30 files analizzati,
% bisogna considerare i successivi 30 e ripetere il procedimento
% fino all'ultimo blocco di 30 files.
% Per passare ai successivi 30 è necessario incrementare il

```

```

    % contatore
    i=i+30;
end

```

4.2.9 Import_molecolare

```

%--function per importare i valori del molecolare alle varie quote--

function molecolare=import_molecolare(percorso,file_name);

% per poter aprire il file è necessario:
% 1)Definire il percorso dal quale prendere il file
path = percorso;

% 2) Definire il nome del file
filename=file_name;

% 3) Concatenare percorso e nome
file_dati=[path,'\', filename];

% 4) Aprire il file
fid=fopen(file_dati,'r');

% 5) Importare i dati
dati=textscan(fid,'%f','headerlines',1);

% i diversi valori del molecolare alle varie quote sono:
d=dati(:,1);
mol=d{:};
molecolare=mol(1:end-1);

% 6) Chiudere il file
fclose(fid);

```

4.2.10 Media_30min

```
%-----function per la media ogni 30 minuti-----  
  
function x=media_30min(A);  
  
[r c]=size(A);  
  
for j=1:c  
    somma=0;  
    for i=1:r  
        s=A(i,j);  
        somma=somma+s;  
    end  
    x(j)=somma/r;  
end
```

4.2.11 Import_density

```
%--function per importare i valori della densità alle varie quote---  
  
function number_density=import_density(percorso,file_name);  
% per poter aprire il file ottenuto dal programma ussa1976 è  
% necessario:  
% 1)Definire il percorso dal quale prendere il file  
path = percorso;  
  
% 2) Definire il nome del file  
filename=file_name;  
  
% 3) Concatenare percorso e nome  
file_dati=[path,'\', filename];  
  
% 4) Aprire il file  
fid=fopen(file_dati,'r');  
  
% 5) Importare i dati  
dati=textscan(fid,'%f','headerlines',1);  
  
% i diversi valori della densità alle varie quote sono:  
d=dati(:,1);  
dens=d{:};  
number_density=dens(1:end);  
  
% 6) Chiudere il file  
fclose(fid);
```

4.2.12 Import_quote

```
%--function per importare i valori della densità alle varie quote---  
  
function quote_60_m=import_quote(percorso,file_name);  
  
% per poter aprire il file ottenuto dal programma ussa1976 è  
% necessario:  
% 1)Definire il percorso dal quale prendere il file  
path = percorso;  
  
% 2) Definire il nome del file  
filename=file_name;  
  
% 3) Concatenare percorso e nome  
file_dati=[path,'\', filename];  
  
% 4) Aprire il file  
fid=fopen(file_dati,'r');  
  
% 5) Importare i dati  
dati=textscan(fid,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f','headerlines',1);  
  
% i diversi valori della densità alle varie quote sono:  
q=dati(:,1);  
quote=q{:};  
quote_60_m=quote(2:end);  
  
% 6) Chiudere il file  
fclose(fid);
```

4.2.13 Trova_posiz

```
%-----function per la ricerca della quota di riferimento-----  
  
function posizione=trova_posiz(a,x);  
  
% x vettore nel quale effettuare la ricerca  
% a elemento da trovare  
  
% dimensioni del vettore  
[r c]=size(x);  
  
i=1;  
while i<c  
    vall=x(i);
```

```

    val2=x(i+1);
    if (a>=val1)& (a<val2)
        posizione=i;
    end
    i=i+1;
end

```

4.2.14 Integrale

```

%-----function per il calcolo dell'integrale che-----
%-----compare nella formula del logaritmo dell'RCS-----

% La formula è:
%
%          S(z)=log(RCS)-2*integ((1-3K/8pi)*alfa_mol dz)
%
% ciò che si vuole calcolare in questa function è
%
%          integrale(alfa_mol*dz)
%
% Si vuole approssimare quest'integrale ad una sommatoria,
% considerando per ogni intervallo,di ampiezza costante,il valor
% medio della funzione,che nel nostro caso è,per l'appunto,alfa_mol.

function int=integrale(x,dx,posiz);

[r c]=size(x);
% inizializzazione
p=1;

for i =1:posiz-1
    val_medio(p)=(x(i)+x(i+1))/2;
    p=p+1;
end

for i=posiz:c
    val_medio(p)=0;
    p=p+1;
end

int=val_medio*dx;

```

4.2.15 Beta_integrato

```
%-----  
%-----  
% Questa function consente il calcolo dell'integrale del beta  
% aerosolico nell'intervallo di quote fino a circa 4000m ed in un  
% prefissato intervallo temporale.  
%-----  
%-----  
  
function []=beta_integrato(path_read);  
  
% Definisco il percorso dal quale leggere i files  
path_lettura=path_read;  
  
% Creo una matrice le cui righe forniscano la lista dei files che si  
% vogliono analizzare  
lista_files=ls(path_lettura);  
% Definisco le dimensione della matrice  
[r c]=size(lista_files);  
  
% inizializzazione vettore beta integrato  
d=0;  
  
% La lista dei files comincia a partire dalla terza riga della  
% matrice lista_files prima creata  
for i=3:r  
    curr_file=lista_files(i,:);  
    % si crea il nome  
    file_name=[path_lettura,'\',curr_file];  
    % per importare i dati è necessario aprire i files  
    fid=fopen(file_name,'r');  
    dati=importdata(file_name);  
    fclose(fid);  
  
%-----Quote-----  
  
% la massima quota è 7680  
quota_zero=457.5;  
quota_max = 7680;  
quote=7.5:7.5:quota_max;    %sono 1024 punti di quota  
  
% ricavo le quote corrette  
quote_corrette=quote-quota_zero;  
quota_max_corretta=quote_corrette(end);  
  
% il vettore delle quote associate ai dati binnati sarà  
quote_binnate=60:60:quota_max_corretta; %sono 120 punti di quota  
%-----
```

```

% Per poter effettuare l'integrazione di beta occorre calcolare
% l'integrale di beta in corrispondenza della quota iniziale e
% finale.

% quota di inizio integrazione
quota_iniz=input('inserire quota inizio integrazione');
%indice quota iniziale
indice_in=trova_posiz(quota_iniz,quote_binnate);
beta_int_1=sum(dati(1:indice_in));

%quota di fine integrazione
quota_finale=input('inserire quota fine integrazione');
%indice quota finale
indice_fin=trova_posiz(quota_finale,quote_binnate);
beta_int_2=sum(dati(1:indice_fin));

% intervallo spaziale
dz=60;

d=d+1;
beta_integrato(d)=(beta_int_2-beta_int_1)*dz

end

time=1:1:7;
figure
plot(time,beta_integrato)

```

4.2.16 Rcs_minuto_mappe

```

%-----function per l'elaborazione dei dati ogni minuto-----
%-----da utilizzare per le mappe-----

% Questa function effettua la lettura dei files binari nonchè la
% conversione,attraverso la sub function leggi_bin,dei files stessi
% ed il calcolo del range corrected signal in un minuto di
% acquisizione.

% Vengono dati in input il percorso dal quale prendere i files e il
% percorso nel quale immettere poi i files processati

path_read=input('inserire il percorso dal quale prendere i files');
path_write=input('inserire il percorso nel quale memorizzare i
                risultati');
graph=input('si desidera visualizzare il grafico?digita 1 in caso
            affermativo,0 in caso contrario');

```

```

%-----
% Creo una matrice le cui righe forniscano la lista dei files che si
% vogliono analizzare
lista_files=ls(path_read);
% Definisco le dimensione della matrice
[r c]=size(lista_files);
%-----

%-----processamento dei files-----
% inizializzazioni matrice dei dati da processare
a=0;
d=0;
% contatore indicante l'indice del file che viene processato
cont=1;
% La lista dei files comincia a partire dalla terza riga della
% matrice lista_files prima creata
i=3;
disp(['processamento in corso ... file ',num2str(cont)]);
% si definisce il primo file della lista che viene processato
file_corrente=lista_files(i,:);
% si determina l'orario di acquisizione di tale file
orario=file_corrente(10:11);
% Per questo primo file viene richiamata la function leggi_bin
[data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_corrente,graph);

% Si ricorda che data_1 e data_2 sono i valori ottenuti applicando
% le formule di conversione dei valori binari e ad_1 e ad_2 sono
% variabili che tengono conto del tipo di acquisizione(1 se in
% digitale e 0 se in analogico).
clc
% Una volta ricavati i dati,a seconda del tipo di acquisizione, creo
% due matrici,una che memorizzi tutti i dati in digitale e l'altra
% che memorizzi invece quelli in analogico
if ad_1==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_1;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_1;
end
if ad_2==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_2;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_2;
end
clear data_1 data_2

%-----Ciclo di processamento dei files successivi al primo-----
% Per poter considerare solo i files relativi ad un dato minuto di
% acquisizione,è necessario effettuare un confronto tra due files,il
% primo e quello che,di volta in volta, segue,in modo da fermare il
% processamento quando il file seguente non rientra nello stesso

```

```

% minuto di acquisizione del primo.
for j=i+1:r
    % incremento del contatore
    cont=cont+1;
    disp(['processamento in corso ... file ', num2str(cont)]);
    % file da processare
    file_succ=lista_files(j,:);
    % orario di acquisizione
    orario_new=file_succ(10:11);
    % controllo sulla procedura
    if orario_new == orario
        [data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_succ,graph);
        % si continua a creare la matrice definita fuori dal ciclo
        if ad_1==1
            d=d+1;
            data_digitale(:,d)=data_1;
        else
            a=a+1;
            data_analogico(:,a)=data_1;
        end
        if ad_2==1
            d=d+1;
            data_digitale(:,d)=data_2;
        else
            a=a+1;
            data_analogico(:,a)=data_2;
        end
        clear data_1 data_2
    else
        % se il file analizzato non rientra nello stesso minuto di
        % acquisizione del precedente, allora si richiama la
        % function rcs_min_mappe per poter determinare il profilo
        % lidar dei segnali acquisiti nel precedente minuto

        % è necessario definire dapprima un nome che sia relativo a
        % tutti i files precedenti
        name=lista_files(j-1,1:11);
        [RCS]=rcs_min_mappe(data_digitale,path_write,name);
        % clear RCS

        % a questo punto,per ricominciare il processo, è necessario:
        % azzerare la matrice dei dati
        a=0;
        d=0;
        % inizializzare nuovamente il contatore
        cont=1;
        % definire nuovamente l'orario
        orario=orario_new;
        disp(['processamento in corso ... file ', num2str(cont)]);
        [data_1,data_2,ad_1,ad_2]=leggi_bin(path_read,file_succ,graph);
        if ad_1==1
            d=d+1;
            data_digitale(:,d)=data_1;
        else
            a=a+1;
            data_analogico(:,a)=data_1;
        end
    end
end

```

```

end
if ad_2==1
    d=d+1;
    data_digitale(:,d)=data_2;
else
    a=a+1;
    data_analogico(:,a)=data_2;
end
clear data_1 data_2
end
if j == r
    % si processa l'ultimo blocco di files
    name=lista_files(j,1:11);
    [RCS]=rcs_min_mappe(data_digitale,path_write,name);
    % clear RCS
end
end
%-----

```

4.2.17 Rcs_min_mappe

```

%-----function per il calcolo del Range cirrected signal-----
%-----in un minuto di acquisizione-----
%-----da inserire nelle mappe-----

function [RCS]=rcs_min_mappe(data_digitale,path_write,name)

%-----Correzione di pile-up-----
% In genere vengono processati 14 o 15 files alla volta,relativi
% all'acquisizione ogni 4 secondi in un minuto,per cui la matrice
% dei data_digitale sarà costituita da 1024 righe,corrispondenti ad
% ogni quota, e da 14 o 15 colonne relative ai files analizzati.
% La correzione di PILE-UP viene così effettuata:
%
%          dati pile-up = dati/(1-dati*1.8*10^-9)

% dimensioni della matrice dei dati digitali
[x y]=size(data_digitale);

I=ones(x,y);

% multiplico i dati digitali per un fattore di correzione
data_corr=data_digitale*1.8*10^-9;

data_pile_up=data_digitale./(I-data_corr);
%-----

```

```

%-----Segnale mediato su un minuto-----
% Di questi dati è necessario farne la media per ottenere un unico
% file ogni minuto.
% Viene richiamata a tal proposito la function media_minuto
profilo_ogni_minuto=media_minuto(data_pile_up); %1024 componenti

% l'ultima componente,dovuta all'elettronica di acquisizione,
% determina uno sbalzo di valori,pertanto non essendo
% rappresentativa di effettivi valori fisici,può essere eliminata
profilo_ogni_minuto=profilo_ogni_minuto(1:end-1); %1023 componenti
%-----

%-----Quote-----

% la massima quota è 7680
quota_zero=457.5;
quota_max = 7680;
quote=7.5:7.5:quota_max; %sono 1024 punti di quota

% ricavo le quote corrette
quote_corrette=quote-quota_zero;
quota_max_corretta=quote_corrette(end);

% il vettore delle quote associate ai dati binnati sarà
quote_binnate=60:60:quota_max_corretta; %sono 120 punti di quota
%-----

%-----Calcolo del fondo-----
% Una volta ottenuto il file relativo ad un minuto,bisogna sottrarre
% il fondo,che corrisponde al valore relativo alla quota zero.
% La componente relativa alla quota 457,5 è la 61
ro=quota_zero/7.5;

% Per sottrarre il fondo,devo effettuare la media dei fotoconteggi
% che si ottengono prima del picco di tempo zero,in cui sicuramente
% quanto si osserva non deriva da retrodiffusione in atmosfera,ma ù
% dai fotoni della radiazione di fondo.
% I valori sono quelli precedenti ro.
% Viene a tal punto richiamata la function media(x,ro),
fondo=media(profilo_ogni_minuto,ro);
%-----

%-----
% A questo punto si calcola il nuovo file relativo al minuto,
% ottenutosottraendo il fondo,attraverso la function sottrai_fondo.
% Si ottiene così un vettore con un numero di componenti pari a
% quello di partenza scalato di 60(sono le componenti che precedono
% quella corrispondente alla quota zero)
profilo_minuto_new=sottrai_fondo(profilo_ogni_minuto,fondo,ro);
%(1x963)
%-----

```

```

%-----Binning-----
% Una volta ottenuto il segnale ogni minuto è necessario effettuare
% il binning ogni 8 punti,in modo da ottenere dati ogni 60 metri

% Applicando la function binning_8_punti si ottiene:
profilo_binnato=binning_8_punti(profilo_minuto_new);    % 1x120
%-----

%-----Calcolo del Range Corrected Signal-----
% Una volta ottenuto il file mediato su 1 minuto su cui è stato
% eseguito il binning,devo moltiplicarlo per il quadrato della
% quota

RCS=profilo_binnato.*quote_binnate.^2;
%-----

%-----

file_name=[path_write,'\ ', name, '.mat'];

% salvataggio dati
save(file_name, 'RCS');
%-----

```

4.2.18 RCS_mappe

```

%-----function per l'elaborazione delle mappe-----
%-----dei profili ogni 30 min-----

function []=rsc_mappe(path_read);

% Definisco il percorso dal quale leggere i files
path_lettura=path_read;

% Creo una matrice le cui righe forniscano la lista dei files che si
% vogliono analizzare
lista_files=ls(path_lettura);
% Definisco le dimensione della matrice
[r c]=size(lista_files);

%-----processamento dei files-----
j=1;
% La lista dei files comincia a partire dalla terza riga della
% matrice lista_files prima creata

```

```

for i=3:r
    disp(['processamento in corso ... file ', num2str(i-2) ,
         ' di ', num2str(r-2)]);
    curr_file=lista_files(i,:);
    file_name=[path_lettura, '\', curr_file];
    fid=fopen(file_name, 'r');
    dati(j, :)=importdata(file_name);
    j=j+1;
    fclose(fid);
end
%-----

%-----Quote-----
% la massima quota è 7680
quota_zero=457.5;
quota_max = 7680;
quote=7.5:7.5:quota_max;    %sono 1024 punti di quota

% ricavo le quote corrette
quote_corrette=quote-quota_zero;
quota_max_corretta=quote_corrette(end);
% il vettore delle quote associate ai dati binnati sarà
quote_binnate=60:60:quota_max_corretta;    %sono 120 punti di quota
%-----

dati=dati';

% vettore tempo
t=1:1:1130;

imagesc(t, quote_binnate, dati)
xlabel('time UT')
ylabel('quote [m]')

```

4.3 Documentazione del programma

Nella stesura del programma sono stati individuati i seguenti sottoproblemi:

1. analisi dei files binari generati dal programma di acquisizione PLAPMI, in modo da conoscerne la forma e il contenuto;
2. conversione dei files;
3. analisi di metodi di acquisizione di una misura lidar;
4. studio del metodo di Klett per l'inversione dell'equazione lidar.

Verranno in seguito descritte in dettaglio tutte le procedure utilizzate per la risoluzione dei sottoproblemi sopra elencati, poste in ordine di utilizzo da parte del programma.

4.3.1 Leggi_bin

Questa function converte i dati acquisiti attraverso il programma PLAPMI in grandezze fisiche rappresentanti il rate di conteggio dei fotoni.

In input devono essere forniti il percorso dal quale prendere i files che di volta in volta saranno processati, il nome del file, entrambi compresi tra due apici, e un parametro indicante la possibilità o meno di visualizzare l'andamento del segnale acquisito. Ad esempio:

```
leggi_bin('C:\Documenti\tesi\raw data','k0551018.4310509',0)
```

È necessario poi analizzare i files in modo da conoscerne forma e contenuto, e ciò viene fatto aprendo ciascun file in modalità lettura.

Ogni file si presenta nel seguente formato:

- La I^a header contiene informazioni relative al nome del file e alla data di creazione. Solitamente comincia con uno spazio sempre seguito da una lettera (in questo caso la lettera k), con le relative informazioni sulla data e l'ora di acquisizione;
- la II^a header riguarda il sistema, quindi ci indica il sito e i parametri relativi alla posizione del sistema stesso;
- la III^a header fornisce informazioni sui laser utilizzati, ovvero il numero di impulsi e la velocità con cui questi vengono ripetuti;
- la IV^a e V^a header contengono informazioni riguardanti il tipo di acquisizione, se in analogico o digitale, il tipo di laser, la bin width, la lunghezza d'onda del fascio laser e ulteriori informazioni sul set di dati.

A queste headers segue poi la parte da decodificare; la conversione viene eseguita in due cicli separati, uno per l'analogico e l'altro per il digitale, considerando 1024 campioni alla volta, corrispondenti ai 1024 canali di acquisizione di cui è dotata la scheda multicanale.

Dopodiché si applicano le formule di conversione, che si differenziano a seconda del tipo di acquisizione in:

$$analog(V) = \frac{rawdata * datarangeofADC}{4096 * shotnumber} \quad (4.1)$$

$$photon\ count\ (MHz) = rawdata * \frac{binwidth}{7.5(m)} * \frac{20MHz}{shotnumber} \quad (4.2)$$

Come è stato già detto, durante questa campagna di misure il segnale è stato acquisito solo in fotoconteggio, per cui `leggi_bin` fornirà in output due vettori di cui uno, quello relativo all'acquisizione in analogico, costituito da tutti zeri. Altri output vengono generati dalla function, ad esempio due parametri indicanti il tipo di acquisizione, 1 per il digitale e 0 per l'analogico, tuttavia è possibile decidere quanti parametri ottenere semplicemente indicandoli o meno tra le variabili in uscita.

Così ad esempio:

```
function[data_1,data_2,ad_1,ad_2,wavelength_1,wavelength_2,bin_width_1,  
bin_width_2]= leggi_bin(percorso,file_name,grafico)
```

darà in uscita tutti i parametri indicati tra le parentesi quadre; se si vuole ottenere solo i primi due, si scriverà

```
function[data_1,data_2]= leggi_bin(percorso,file_name,grafico)
```

Bisogna tener presente però che il matlab rispetta l'ordine con cui una variabile è scritta, così se si vogliono in uscita, ad esempio, `data_1` e `ad_1`, che sono, rispettivamente, un vettore ed un numero, non è possibile scrivere

```
function[data_1,ad_1]= leggi_bin(percorso,file_name,grafico)
```

perché in questo modo il programma assegnerà a `ad_1` il vettore dei dati `data_2`, è necessario quindi scrivere

```
function[data_1,data_2,ad_1]= leggi_bin(percorso,file_name,grafico)
```

4.3.2 Segnale_min

Attraverso tale function vengono processati quindici o quattordici files alla volta, relativi all'acquisizione ogni 4 secondi in 1 minuto.

All'interno di `segnale_min` sono presenti un certo numero di sub-function, tramite le quali è possibile ottenere l'output previsto.

La struttura dati di tale routine è una matrice costituita da 1024 righe, corrispondenti ad ogni quota, e da 15(14) colonne, relative ai files analizzati. Attraverso la function **media_minuto** si ottiene un unico file corrispondente ad ogni minuto di acquisizione. L'output di tale function è pertanto un vettore di 1024 componenti.

Questa routine, infatti, effettua una media di tutti i valori presenti su ciascuna riga della matrice, fornendo, quindi, come risultato, un vettore di 1024 componenti. L'ultima componente, dovuta all'elettronica di acquisizione, determina uno sbalzo dei valori, pertanto, non essendo rappresentativa di effettivi valori fisici, può essere eliminata.

Il vettore ottenuto avrà dunque 1023 componenti.

Successivamente, attraverso la function **media**, viene calcolato il fondo da sottrarre, si determina cioè la componente relativa alla quota a partire dalle quale bisogna sottrarre e si effettua poi una media di tutte le componenti precedenti. In seguito, attraverso **sottrai_fondo**, viene calcolato il nuovo vettore che avrà, dunque, un numero di componenti pari a quello di partenza scalato di 61, che è il numero di componenti che precedono quelle relative alla quota zero. Il risultato è quindi un vettore di 963 componenti. A questo punto occorre eseguire il binning, attraverso la procedura **binning_8_punti**; questa function effettua una

media ogni 8 componenti del vettore in maniera da ottenere un nuovo vettore di sole 120 componenti. Questo risultato dovrà essere salvato in una directory scelta dall'utente e data in input alla procedura `rsc_30min`. I files salvati hanno estensione `.mat` e possono essere direttamente visualizzati nel workspace del matlab semplicemente cliccando sul file scelto nella cartella in cui sono stati conservati.

4.3.3 `Segnal_minuto`

Questa routine non fa altro che processare i dati in base a quanto descritto nelle pagine precedenti. Essa infatti utilizza le funzioni `leggi_bin` e `segnale_min`, ma la particolarità di tale procedura consiste nel fatto che essa permette di processare un numero indefinito di files, non noto a priori. Le routines `leggi_bin` e `segnale_min`, infatti, elaborano un numero prefissato di files, che varia tra 15 e 14 a seconda dei minuti e dei secondi di acquisizione (si acquisisce un file ogni 4 secondi, per cui in un minuto possono rientrarne 15 o 14 a seconda dei casi), mentre grazie a `segnale_minuto` è possibile processare tutti i files contenuti all'interno di una data cartella.

I parametri di input sono, in questo caso, chiesti direttamente all'utente all'inizio dell'esecuzione della function; in seguito viene creata una lista contenente tutti i files da analizzare, dopodiché comincia l'inizializzazione del processamento dei files. Viene, cioè, elaborato il primo file della lista attraverso la function `leggi_bin` e definita l'ora di acquisizione,

precisamente i minuti, che costituiscono il controllo sulla scelta dei successivi files da considerare. L'orario di acquisizione dei dati è fornito dallo stesso nome del file analizzato

```
orario= curr_file(10:11)
```

dove curr_file indica il nome del file corrente che di volta in volta viene processato, mentre l'istruzione tra parentesi consente di prendere quella parte del nome che va dal decimo all'undicesimo carattere, ovvero la parte relativa ai minuti.

Finché i minuti di acquisizione sono gli stessi, verrà richiamata la function leggi_bin, ma, non appena si scatta nel minuto successivo, i dati fino ad allora ottenuti saranno processati attraverso segnale_min. Appena finita l'elaborazione, la matrice dei dati verrà azzerata e sarà disponibile per un nuovo ciclo. Il tutto si ripete fino all'ultimo blocco di 15 o 14 files.

È stato richiesto un controllo sui minuti perché non è possibile conoscere quanti files saranno contenuti in un minuto, tutto sarebbe stato più semplice e veloce se, in ciascun minuto, fosse stato effettuato un numero fisso di acquisizioni.

4.3.4 Rcs_30min

I profili lidar così ottenuti, salvati in un'opportuna cartella, vengono forniti in input a tale function per l'elaborazione dei dati ogni trenta minuti. Attraverso tale function, quindi, si elaborano i dati ottenuti da segnale_minuto, considerando cicli di 30 files alla volta, senza la

necessità di alcun controllo. Si ottiene così una matrice 30x120, in cui le 30 righe sono relative ai minuti processati, mentre le 120 colonne non sono altro che le componenti di ciascun vettore generato da segnale_min. Di questa matrice si calcola, poi, una media dei valori di ciascuna colonna, tramite la function **media_30min**, in modo da ottenere un unico file relativo ai 30 minuti di acquisizione. Si determina successivamente il profilo del molecolare medio, attraverso la function **import_molecolare**, in modo da poter normalizzare il segnale lidar a tale profilo. È possibile quindi ottenere l'andamento di tali segnali in funzione della quota. Per fare ciò è necessario che il vettore delle quote abbia, rigorosamente, le stesse dimensioni del vettore che si vuole plottare, in caso contrario il matlab genera errore.

Il vettore rappresentante il segnale lidar viene poi moltiplicato per il quadrato della quota in modo da ottenere l'RCS.

Si effettua, successivamente, il calcolo del segnale molecolare; in questo caso, per poter determinare i parametri da immettere nelle formule, vengono richiamate le procedure **import_quote** ed **import_density**. Tramite queste, come suggerisce il loro nome, vengono importati, nella function `rsc_30min`, due vettori contenenti i valori delle quote e del number density ad esse associato. Tali valori sono ricavati da un'apposita tavola, il cui nome deve essere dato come input alle due routine, insieme alla directory in cui è stata salvata. Questa tavola, fornita dal programma `ussa1976`, deve tuttavia essere modificata per poter essere importata in matlab.

Infatti il comando matlab usato per importare i dati è *textscan*, che consente di importare files alfanumerici che abbiano però una sola riga

contenente stringhe di caratteri, per tale ragione la tavola è stata modificata in modo da avere solo una riga contenente caratteri alfabetici. Inoltre sono stati considerati solo i valori di interesse, ovvero le quote a partire da 60 m fino a 7680m e i corrispondenti valori del number density. Ricavati tali valori, si determina il segnale molecolare e il grafico relativo al suo andamento, tramite il quale è infine possibile effettuare un confronto con l'RCS del segnale lidar precedentemente determinato. A questo punto, per effettuare l'operazione di normalizzazione al profilo molecolare del segnale lidar, è stata compilata la procedura **trova_posiz**, che consente di determinare, fissata una quota di riferimento, il punto in cui i due segnali coincidono. In corrispondenza di tale quota si calcolano poi i valori dei due segnali, se ne considera il rapporto e si moltiplica il molecolare per tale valore.

Si procede, infine, con la determinazione del coefficiente di retrodiffusione aerosolico attraverso il metodo di Klett. Da questo punto di vista nella routine non ci sono comandi particolari, si è cercato soltanto di tradurre in linguaggio di programmazione le formule viste durante lo studio teorico. L'output di tale procedura è proprio il coefficiente di retrodiffusione aerosolico, nonché gli andamenti dei parametri utili all'analisi del particolato atmosferico.

4.3.5 **Beta_integrato**

Questa function consente il calcolo dell'integrale del coefficiente di retrodiffusione aerosolico fino alla quota di 4000 metri ed in prefissato intervallo temporale. In input viene fornito il percorso nel quale sono stati memorizzati i files contenenti i beta aerosolici precedentemente determinati. I dati sono, quindi, rappresentati da una matrice $120 \times m$, dove m è variabile a seconda dell'intervallo temporale nel quale si decide di effettuare l'integrazione. L'integrale viene calcolato fissando le quote di inizio e fine integrazione, che possono essere variabili per ogni beta considerato, ottenendo, infine, l'andamento del carico aerosolico totale sulla quota e nel tempo.

4.3.6 **RCS_minuto_mappe**

Tale function consente di elaborare i dati in ogni minuto di acquisizione, da utilizzare per la determinazione delle mappe.

Al suo interno viene richiamata la routine **rcs_min_mappe**, che non fa altro che ripetere la procedura seguita da `segnale_min`, l'unica differenza, una volta determinato il vettore relativo al profilo lidar, consiste nel moltiplicare tale vettore per quello delle quote al quadrato in modo da ricavare il Range Corrected Signal del segnale lidar relativo ad un solo minuto di acquisizione.

Questo vettore viene poi memorizzato in un apposita cartella per poter, successivamente, essere utilizzato.

La routine `rcs_minuto_mappe` è analoga, invece, alla procedura `segnale_minuto`, in essa vengono, quindi, processati, attraverso opportuni cicli, i dati relativi ad ogni minuto di acquisizione di una misura.

4.3.7 RCS_mappe

L'ultima function presentata consente, infine, di realizzare delle mappe di monitoraggio del range corrected signal.

In input a tale routine viene data la directory dalla quale prendere i files che si vogliono monitorare, ottenuti tramite `rcs_minuto_mappe`, dopodiché si crea una lista contenente tutti i files da importare all'interno di una matrice che costituirà, per l'appunto, la matrice dei dati da graficare. Si crea anche un vettore tempo, indicante l'intervallo temporale entro il quale monitorare il segnale e, attraverso il comando *imagesc*, è infine possibile ottenere l'andamento dei range corrected signals in funzione delle quote e del tempo.

CAPITOLO 5

SOFTWARE M.A.P.S : ANALISI DEI DATI

In quest'ultimo capitolo viene presentata una descrizione di tutti i risultati ottenuti attraverso il processamento dei dati LIDAR mediante il software M.A.P.S. realizzato nell'ambito di questo lavoro di tesi. Sono mostrati, in particolar modo, gli andamenti di grandezze, quale il coefficiente di retrodiffusione aerosolico, di importanza rilevante per la determinazione del carico aerosolico, e mappe indicanti la distribuzione e l'evoluzione del particolato atmosferico nell'arco di un prefissato intervallo temporale.

5.1 Mappa RCS

Attraverso il processamento dei dati lidar e utilizzando alcune delle procedure descritte nel precedente capitolo è possibile ottenere delle mappe indicanti, in un fissato intervallo temporale, la presenza e l'evoluzione del particolato atmosferico in funzione della quota.

In questo caso particolare, è stata presa in considerazione una parte dell'atmosfera fino a 7000 metri, che include il PBL già descritto, in modo da riuscire ad ottenere indicazioni sulla presenza di aerosol urbani.

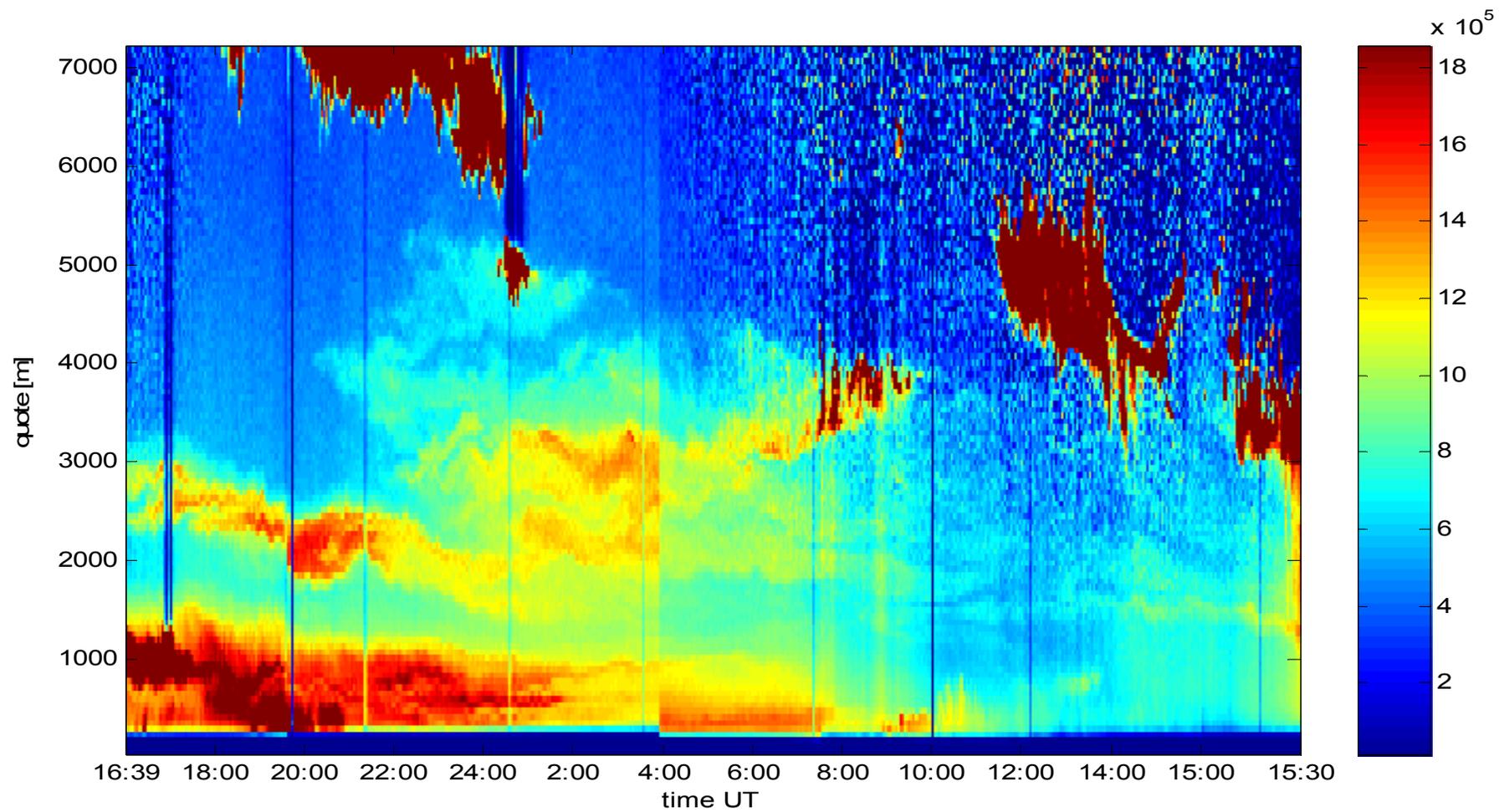


Figura 5- 1: Evoluzione dell'RCS nel tempo

In figura 5-1 riportiamo la mappe dei segnali acquisiti i giorni 9-10 maggio 2005 presso l'aeroporto di Pontecagnano. I dati sono stati acquisiti ad una lunghezza d'onda di 532 nm e con una risoluzione temporale di 1 minuto, a partire dalle 16:39 fino alle 15:30 del giorno successivo e sono stati elaborati secondo la procedura descritta nel paragrafo 3.3.

Sull'asse delle ascisse sono riportati i tempi, sulle ordinate le quote di atmosfera. L'indicatore a lato della mappa riproduce i colori usati per rappresentare la variazione di concentrazione relativa del particolato in atmosfera, con un'oscillazione dal colore blu (atmosfera pulita) al rosso (atmosfera inquinata). Da notare che il rosso intenso indica un livello di saturazione della misura dovuto, fino a 4000 metri, alla presenza del particolato, da 4000 metri in poi alla presenza di nuvole.

Questa mappa mostra, in particolar modo, un quadro atmosferico suddivisibile in tre intervalli di quote caratterizzati da una certa omogeneità interna. Nell'intervallo di quote fino a circa 1000-1500 metri è possibile osservare la presenza di una struttura aerosolica localizzata proprio all'interno del PBL. Nell'intervallo di quote immediatamente successivo, e cioè fra i 2000-4000 metri, si osserva di l'evoluzione di una struttura aerosolica, in un arco temporale che comincia alle 16:39 del 9 maggio e termina intorno alle 10:00 del giorno seguente, con una concentrazione relativa minore, ed infine l'intervallo di quote superiore a 4000 metri caratterizzato dalla presenza di cirri.

5.2 Evoluzione dello spessore del PBL

In figura 5-2 è riportata l'evoluzione dello spessore del PBL a Pontecagnano, calcolata con il metodo del minimo assoluto del logaritmo dell'RCS [14], con il quale è possibile identificare gli strati aerosolici che caratterizzano la struttura del PBL.

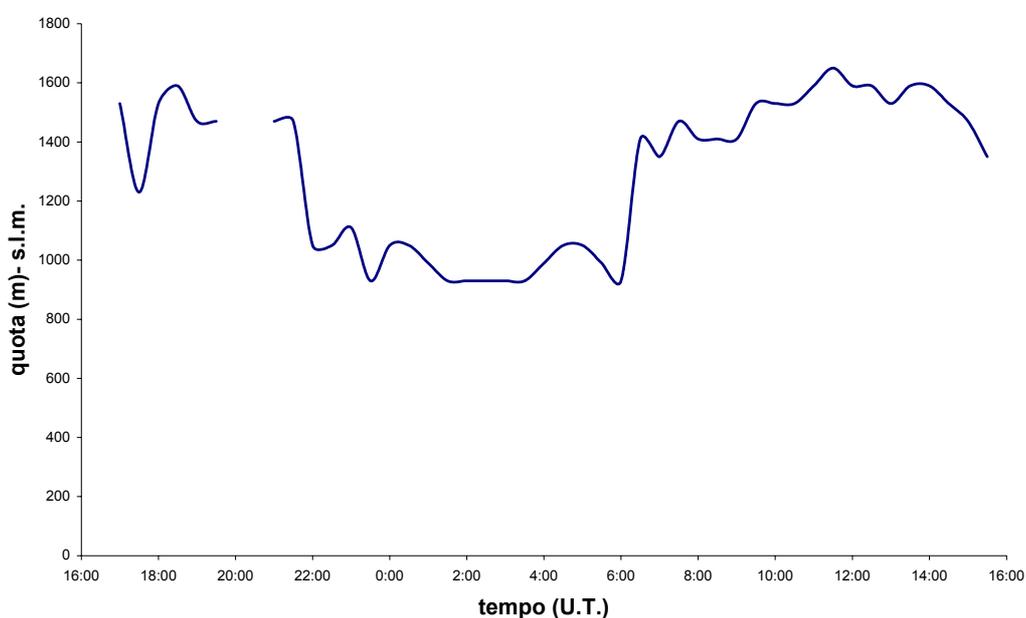


Figura 5- 2: Andamento del PBL

Le variazioni nella distribuzione verticale della concentrazione degli aerosol, infatti, sono interpretate generalmente come stratificazioni aerosoliche dovute ai cambiamenti di grandezze meteorologiche come la temperatura, il vento e l'umidità relativa.

Utilizzando gli aerosol come traccianti, è possibile studiare tali strutture calcolando le derivate del segnale dai profili aerosolici. Si sceglie il minimo in quanto si considera la variazione del segnale LIDAR dopo la

struttura aerosolica, quindi la derivata risulta negativa; si sceglie il minimo assoluto perché si considera la variazione più grande del segnale LIDAR, corrispondente alla variazione più grande della concentrazione di aerosol.

5.3 Coefficiente di backscattering aerosolico

A titolo di esempio del tipo di informazioni che si ricavano dal calcolo del coefficiente di backscattering aerosolico e dall'analisi della sua evoluzione nel tempo, riportiamo nella figura 5-3, il profilo in quota del β_{aer} relativo alle ore 17:00.

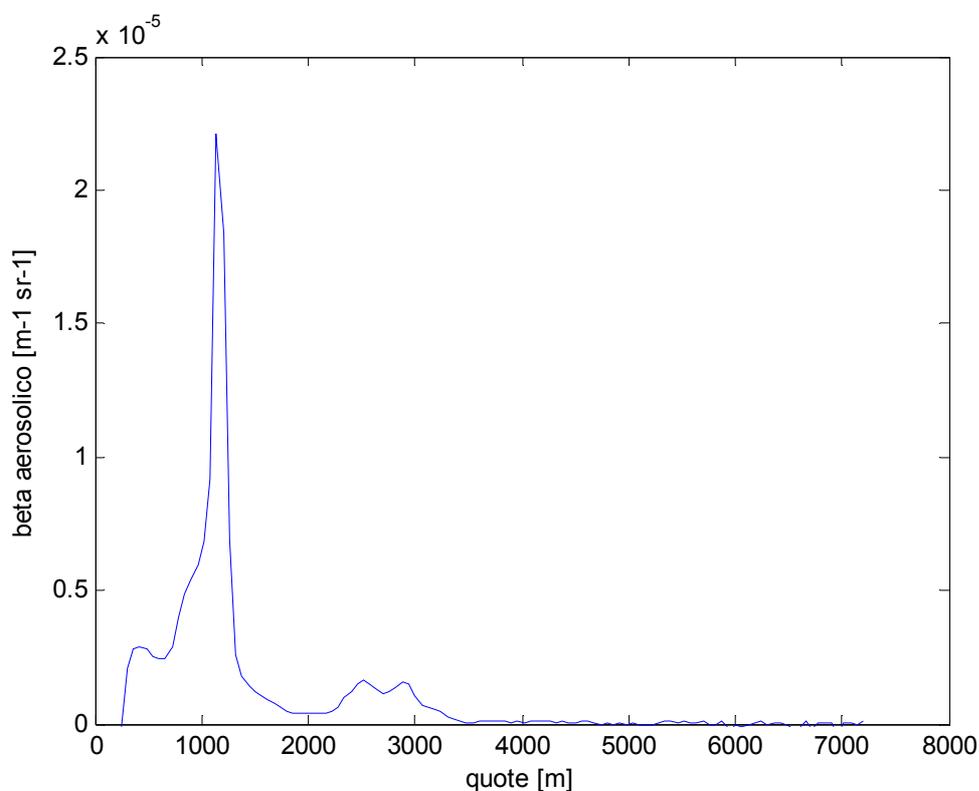


Figura 5- 3: Profilo del coefficiente di backscattering aerosolico alle ore 17:00

Esso fornisce indicazioni, in quota, della distribuzione di aerosol ad un dato intervallo temporale.

Si denota la presenza di una struttura aerosolica all'interno del PBL con una doppia stratificazione, la prima termina a circa 600 metri, mentre la seconda si distribuisce attorno a quota 1000 metri.

Queste due strutture corrispondono a quello che è stato definito come Convective Boundary Layer. Il valore del Lidar Ratio nell'intervallo di quote del PBL, considerato che si tratta di aerosol a preminente provenienza marina e, data la vicinanza della costa, lo si assume, in accordo con i dati di Ackermann [15], pari a 25.

In figura 5-4 è riportato l'integrale del coefficiente di backscattering aerosolico, che fornisce un valore indicativo del carico aerosolico totale, in quota e nel tempo.

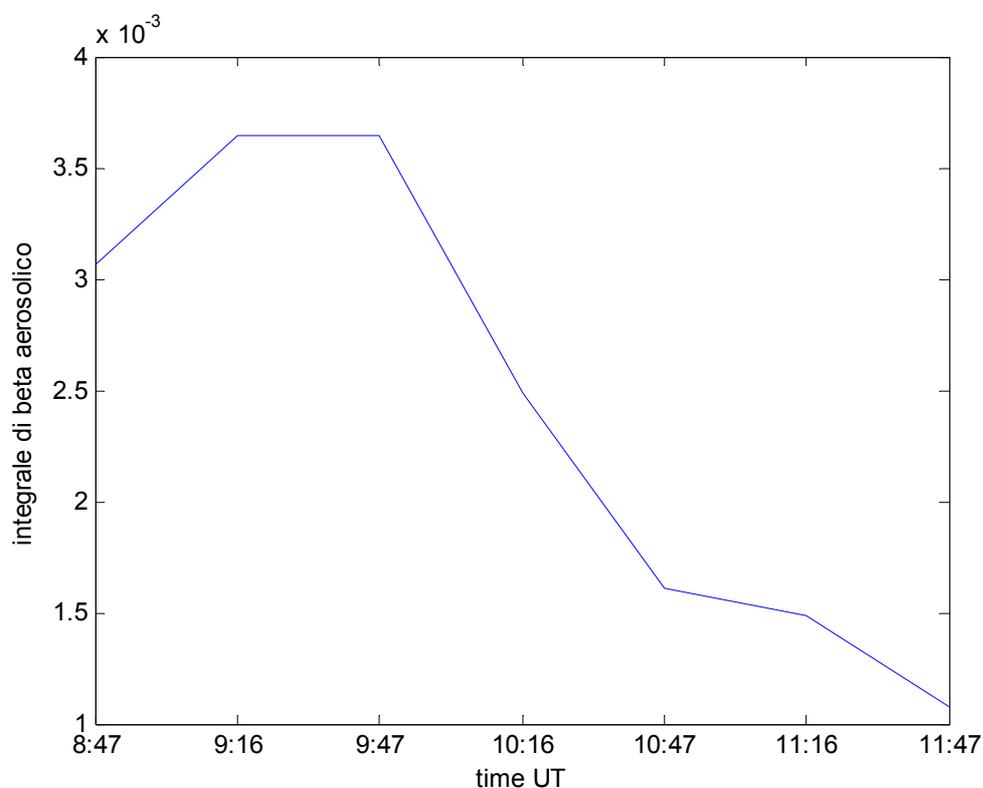


Figura 5- 4: Beta integrato fino a quota 4000 metri al variare del tempo

In particolare, misurando il valore dell'integrale di β_{aer} nell'intervallo di quote fino a 4000 metri, a partire dalle 8:47 e fino alle 11:47, si osserva un primo aumento del carico aerosolico totale, fino a metà mattina, e successivamente una netta diminuzione dovuta alla presenza della brezza marina che agisce riducendo il carico aerosolico totale presente in atmosfera.

CONCLUSIONI

Nell'ambito di questo lavoro di tesi è stato sviluppato il software M.A.P.S. per l'elaborazione di dati LIDAR.

Questo software, di facile utilizzo, permette di elaborare i dati forniti durante una campagna di misure Lidar e visualizzare in tempo reale la presenza e l'evolversi del particolato in aree urbane, fornendo informazioni sulla distribuzione, in quota e nel tempo, degli aerosol in atmosfera. È stato necessario, pertanto, effettuare uno studio dell'atmosfera e dei suoi costituenti, uno studio della tecnica LIDAR e degli algoritmi utilizzati per la risoluzione dell'equazione che ne descrive il funzionamento, analizzare il funzionamento dell'apparato sperimentale LIDAR mobile, realizzato dal consorzio CO.RI.S.T.A., ed infine analizzare la procedura di acquisizione di una misura LIDAR.

Il software M.A.P.S., acronimo di Monitoring of Atmosphere Particulate Software è scritto in linguaggio Matlab ed è costituito da un manuale d'uso, una stampa dei listati sorgente commentati e dalla relativa documentazione.

Il programma elabora i dati LIDAR al fine di ottenere gli andamenti del profilo lidar, del segnale molecolare, del coefficiente di retrodiffusione aerosolico e del coefficiente di estinzione aerosolico, nonché mappe qualitative indicanti la presenza e l'evoluzione del particolato in atmosfera.

In tabella 1 sono riportati i risultati numerici ottenuti durante la campagna di misure eseguita presso l'aeroporto di Pontecagnano nei giorni 9-10 maggio 2005.

PARAMETRO	VALORE	NOTE
beta aerosolico	2,2123e-005 m ⁻¹ sr ⁻¹ (aria inquinata; 1140 m) 4,3444e-009 m ⁻¹ sr ⁻¹ (aria pulita; 7000 m)	misura presa alle ore 17:00
alfa aerosolico	5,53075e-004 m ⁻¹ sr ⁻¹ (aria inquinata; 1140 m) 1,08e-007 m ⁻¹ sr ⁻¹ (aria pulita; 7000 m)	calcolato a partire dal beta aerosolico relativo alle stesse condizioni
integrale beta aerosolico	3,645 e-003 sr ⁻¹	misura presa alle 10:00 integrazione fino a 4000 metri

Tabella 1: Risultati numerici

Il calcolo del coefficiente di backscattering aerosolico fornisce informazioni sulla modalità di distribuzione degli aerosol e il suo integrale in quota consente di ottenere indicazioni sul carico aerosolico totale. Il coefficiente di estinzione aerosolico permette di avere informazioni sulla trasparenza dell'aria; un coefficiente basso indica un'area trasparente mentre un coefficiente alto significa area inquinata. L'utilizzo, inoltre, degli aerosol come traccianti permette di dare una stima dello spessore dello strato limite planetario e di seguirne la sua evoluzione nel tempo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Guido Visconti, “*Fondamenti di fisica e chimica dell’atmosfera*” - Cuen editore.
- [2] T.G.Kyle, “*Atmospheric Transmission Emission and Scattering*” - Pegamon Press.
- [3] Spacecraft attitude determination and control
- [4] R.Monti, G.Zuppari, “*Elementi di Aerodinamica Ipersonica*” - Liguore Editore.
- [5] R.M.Measures, “*Laser Remote Sensing: Fundamentals and Application*” -Krieger Pub. Co., 1992.
- [6] H.Patterson, “*Cosmic spherules and meteoric dust*” - Scientific American, vol. 202, 1960.
- [7] R.Stull, “*An introduction to boundary layer meteorology*” - Kluwer Academic Publishers (1991).
- [8] R.T.H. Collins and P.B. Russel, “*Laser Monitoring of the atmosphere*”, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York (1976)

-
- [9] A.Ansmann, U.Wandinger, M.Riebesell, C.Weitkamp, W.Michaelis
“Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus by using combined Raman elastic-backscatter lidar”.-Applied Optics, Vol. 31, n. 33 (1992).
- [10] J.Klett, *“Stable analytical inversion solution for processing lidar returns”*- Applied Optics, N.2, Vol.20 (1981).
- [11] J.Klett, *“Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios”*- Applied Optics, 24, N°11 (1 June 1985).
- [12] A.Ansmann, U.Wandinger, *“Combined Raman elastic backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter and lidar ratio”*.- Applied Physics, B 55, (1992).
- [13] G.Pica, A.Boselli, F.Castaldo, R.Fusco, S.Mattei, M.R.Santovito, W.Xuang, *“New Prototype of very compact LIDAR for atmospheric particulate monitoring”*, in Atti del 23° Simposio dell’associazione europea dei laboratori di remote sensing, Ghent 2004.
- [14] Endlich et al: *“An automatic method for determining the mixing depth from Lidar observation”*. Atmospheric Environment 13,1051-1056(1979).

[15] Ackermann, “*The extinction to backscatter ratio of tropospheric aerosol*”. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, vol 15 1043-1050 (1998).