



Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

Facoltà di Ingegneria

Dottorato di Ricerca in Elettronica Quantistica e Plasmi

Tesi di Dottorato

**Progettazione, realizzazione e primi
test in campo di un sistema Lidar a
Nd:YAG per l’allerta precoce di
incendi boschivi**

Tutor
Dott. Pasquale Gaudio

Candidata
Dott. Ing. Michela Gelfusa

Coordinatore
Prof. Carlo Bellecci

XXI Ciclo
Anno Accademico 2008/2009

A miei genitori,

Pasquale e Gemma.

Sommario

Sommario	2
Indice delle figure	5
Indice delle tabelle	9
Abstract.....	10
Introduzione	12
Capitolo 1. Il telerilevamento laser e gli incendi boschivi.....	16
1.1 Introduzione.....	16
1.2 Il telerilevamento laser: la tecnica Lidar	17
1.2.1 Il rumore nei sistemi telerilevamento.....	19
1.3 Caratteristiche ottiche dei prodotti di combustione.....	20
1.4 La combustione di materiale vegetale.....	28
1.4.1 Caratterizzazione del combustibile	28
1.4.2 La combustione.....	30
1.4.3 Composizione del fumo	31
Capitolo 2. Studio della diffusione dei prodotti di combustione.....	35
2.1 Introduzione.....	35
2.2 Metodi numerici	35
2.3 Metodo degli elementi finiti (FEM)	36
2.4 Simulazioni in ambiente confinato (cella).....	38

2.5 Misure sperimentali in cella.....	42
2.5.1 Calcolo del coefficiente di retrodiffusione.....	44
2.5.2 Risultati sperimentali.....	47
2.5.3 Confronto risultati sperimentali e simulazioni.....	53
2.6 Calcolo della concentrazione del vapore acqueo.....	54
Capitolo 3. Set-up del sistema sperimentale (SAI)	58
3.1 Introduzione.....	58
3.2 Sorgente Laser.....	58
3.3 Sistema di ricezione.....	59
3.4 Sistema di rivelazione.....	63
3.5 Progettazione e realizzazione del SAI.....	66
3.6 Sistema di alimentazione.....	69
3.7 Software di gestione del SAI.....	72
3.8 Primi test in campo	75
3.8.1 Campagna di misure.....	78
3.8.2 Risultati segnale elastico.....	80
3.8.3 Problemi riscontrati.....	81
Capitolo 4. Nuova configurazione del sistema SAI.....	83
4.1 Introduzione.....	83
4.2 Modifiche set-up sperimentale.....	84
4.3 Seconda campagna di misure.....	89

4.4 Analisi dei segnali anelastici: effetto Raman	98
4.4.1 Equazione Raman Lidar	99
4.4.2 Calcolo della concentrazione di vapore acqueo.....	99
4.5 Conclusioni.....	103
Capitolo 5. Gestione in remoto del sistema SAI.....	105
5.1 Introduzione.....	105
5.2 Controllo remoto	105
5.3 Misure del segnale elastico e ricostruzione del PBL	106
5.3.1Ciclo diurno del PBL.....	107
5.3.2 Misure Lidar dello Strato Limite Planetario	109
5.4 Conclusioni.....	119
Capitolo 6. Software per la riduzione dei falsi allarmi	120
6.1 Introduzione.....	120
6.2 Software riconoscimento picchi	121
6.3 Gestione acquisizione e controllo dei falsi allarmi.	126
6.4 Terza campagna di misure.....	128
6.5 Conclusioni.....	133
Conclusioni.....	134
Ringraziamenti.....	136
Appendice	137
Bibliografia	139

Indice delle figure

Figura 1.1 – Valori di assorbimento specifico nella fase di fiamma(A) e nella fase di smoldering (B) per particelle solubili (Δ - Δ) e insolubili (o-o) [11].	27
Figura 2.1 – Griglia di calcolo	39
Figura 2.2 – Condizioni al contorno	40
Figura 2.3 – Distribuzione dei prodotti della combustione in cella	41
Figura 2.4 – Simulazione dell'andamento dei prodotti di combustione lungo l'asse centrale della cella.	42
Figura 2.5 – Cella sperimentale con particolare del camino d'ingresso.	44
Figura 2.6 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all'interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d'onda utilizzata 1064 nm.	50
Figura 2.7 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all'interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d'onda utilizzata 532 nm.	50
Figura 2.8 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all'interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d'onda utilizzata 355 nm.	51
Figura 2.9 – Simulazione dell'andamento sei prodotti di combustione all'interno della cella lungo l'asse centrale.	53
Figura 2.10 – Andamento della concentrazione dei prodotti di combustione all'interno della cella.	53
Figura 2.11 – Diagramma psicrometrico.	57
Figura 3.1 – Configurazione Newtoniana del sistema di ricezione	59
Figura 3.2 – Disposizione strumentazione all'interno del carrello.	67
Figura 3.3 – Sistema movimentazione laser-telescopio.	69

Figura 3.4 – Schema di alimentazione.....	71
Figura 3.5 – Front panel programma di gestione.....	73
Figura 3.6 – Particolare del front panel	75
Figura 3.7 – Facciata del Santuario della Madonna di Canneto	76
Figura 3.8 – Immagine Google Earth.....	76
Figura 3.9 – Mappa della zona di misura.....	77
Figura 3.10 – Valle di Canneto 21 Novembre 2007.....	77
Figura 3.11 – Posizionamento sistema Lidar mobile.....	78
Figura 3.12 – Valle Canneto, il cerchietto indica la zona dove è stato acceso il fuoco.....	79
Figura 3.13 – Schema misure	79
Figura 3.14 – Segnale retrodiffuso a 1064 nm.....	80
Figura 3.15 – Segnale retrodiffuso a 355 nm.....	81
Figura 4.1 – Nuova configurazione del sistema SAI. Le misure riportate sono espresse in dm.....	86
Figura 4.2 – Nuova configurazione del sistema SAI	87
Figura 4.3 – Nuova disposizione del sistema Lidar all’interno del carrello	88
Figura 4.4 – Particolare montatura.....	88
Figura 4.5 – Valle Canneto. E’ segnata in rosso la zona monitorata	90
Figura 4.6 – Mappa orografica ottenuta analizzando i picchi dei segnali Lidar a 1064nm.	91
Figura 4.7 – Mappa orografica ottenuta analizzando i picchi dei segnali Lidar a 355 nm.	91
Figura 4.8 – Mappa relativa alla scansione di 20 gradi di campo alla lunghezza d’onda 1064nm.....	93

Figura 4.9 – Mappa relativa alla scansione di 20 gradi di campo alla lunghezza d’onda 355nm.....	93
Figura 4.10 – Andamento del fumo nella valle	94
Figura 4.11 – Direzione ed intensità del vento tra le ore 15:00 e le ore 18:00.....	95
Figura 4.12 – Mappa relativa alle scansioni anelastiche Raman (407.5nm)	96
Figura 4.13 – Direzione ed intensità del vento tra le ore 18:00 e le ore 19:00.....	97
Figura 4.15 – Andamento del coefficiente di backscattering.....	101
Figura 4.16 – Valore medio del coefficiente di backscattering per il vapore acqueo.....	102
Figura 4.17 – Andamento del rapporto segnale-rumore	103
Figura 5.1 – Struttura schematica dello strato limite planetario che si sviluppa sopra la superficie terrestre, in un ciclo giornaliero	108
Figura 5.2 – Segnale sperimentale elaborato relativo alle misure del 07/07/2008	109
Figura 5.3 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione degli aerosol ($m^{-1}\cdot sr^{-1}$) con la quota relativo alle misure del 07/07/2008.....	110
Figura 5.4 – Andamento del PBL dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08.....	111
Figura 5.5 – Andamento della temperatura a livello del suolo dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08.....	112
Figura 5.6 – Andamento dell’umidità relativa (%) dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08	113
Figura 5.7 – Andamento della velocità del vento (m/s) a livello dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08.....	113
Figura 5.8 – Andamento della pressione atmosferica (Pascal) a livello del suolo dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08.....	114

Figura 5.9 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione degli aerosol ($m^{-1}\cdot sr^{-1}$) con la quota relativo alle misure del 07/07/2008.....	115
Figura 5.10 – Andamento del PBL dalle 7.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08.....	116
Figura 5.11 – Andamento della temperatura(K) a livello del suolo dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08.....	117
Figura 5.12 – Andamento dell’umidità relativa(%) dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08	117
Figura 5.13 – Andamento della velocità del vento (m/s) a livello dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08.....	118
Figura 5.14 – Andamento della pressione atmosferica (Pascal) a livello del suolo dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08.....	118
Figura 6.1 – Flow-chart programma creazione mappa orografica	122
Figura 6.2 – Flow-chart programma principale	124
Figura 6.3 – Flow-chart routine “Trova-picchi”	125
Figura 6.4 – In assenza di fumo il sistema procede nella sua scansione.....	129
Figura 6.5 – Generazione file allarme per rivelazione fumo	130
Figura 6.6 – Segnale Lidar acquisito lungo la direzione 1	131
Figura 6.7 – Individuazione di due focolai e conseguente generazione file allarme.....	132
Figura 6.8 – Segnale Lidar acquisito lungo la direzione 4.....	132

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 – Concentrazione, diametro medio e coefficiente di diffusione riportati dai vari autori (1) Stith [7], (2) Hueglin [8], (3)Vries) [9].	24
Tabella 1.2 – Proporzione dei singoli prodotti della combustione durante la fase di fiamma e durante la fase di smoldering [12].	32
Tabella 2.1 – Parametri di inizializzazione	40
Tabella 2.2 – Parametri di inizializzazione	40
Tabella 2.3 – Caratteristiche della cella sperimentale.....	44
Tabella 2.4 – Coefficiente di retrodiffusione in presenza del fumo in cella prodotto bruciando materiale vegetale utilizzando la sorgente laser a CO ₂	49
Tabella 2.5 – Valori medi del coefficiente di retrodiffusione per i due tipi di combustibile vegetale.	51
Tabella 2.6 – Concentrazione vapore acqueo.	56
Tabella 3.1 – Caratteristiche della sorgente Laser Nd:YAG	59
Tabella 3.2 – Caratteristiche del sistema di ricezione.....	60
Tabella 3.3 – Caratteristiche della guida di luce	61
Tabella 3.4 – Caratteristiche dei filtri.....	62
Tabella 3.5 – Caratteristiche del PMT per $\lambda = 355\text{nm}$	66
Tabella 3.6 – Caratteristiche del PMT per $\lambda = 1064\text{nm}$	66

Abstract

Forest fires can be the cause of serious environmental and economic damages. For this reason considerable effort has been directed toward forest protection and fire fighting.

Lidar and dial techniques in laser remote sensing represent two methodologies that allow the exploration of the atmosphere. They are often used to acquire information necessary to create and/or validate several models relevant to different topics of atmospheric physics. Furthermore, they can also be employed in environmental control for monitoring particulate and gases. In the last years, experimental and theoretical investigations have shown that lidar is a powerful tool to detect the tenuous smoke plumes produced by forest fires at an early stage, but the problem of false alarm occurrence is not resolved, yet.

In the present work, it has been developed a technique to minimize false alarm in the detection of forest fire by lidar based on a measurement of secondary components emitted in a combustion process. Usually to detect a fire, a rapid increase in the aerosol amount is measured. If the backscattering signal reports a peak, the presence of a forest fire will be probable. Our idea to confirm this hypothesis is to measure the secondary components emitted in a forest fire with an aim to minimize the false alarms. As is known in a combustion process of vegetable fuel, a large amount of water vapor is emitted in to the atmosphere. If an increment to the humidity concentration level is measured, a second fire warning is obtained.

To develop our system, the measurements of smoke backscattering coefficients for several kind of vegetable fuel using a CO₂ laser source and a Nd:YAG Q-switched have been carried out. Thank to this work, it has been possible to decide which laser was the best for our aim. The experimental results have shown that smoke backscattering coefficients measured with the Nd:YAG are bigger than those obtained with the CO₂, guaranteeing a better efficiency of the system. Another reason for which we have chosen the Nd:YAG is that a solid state laser is more compact than a gas one, and therefore, easily transportable.

The next step of our work was to focus on how to make the system self-powered and easy to transport . As a result, all the instrumentation has been installed on a mobile system equipped with a power generator and an uninterrupted power supply (UPS).

Moreover, it has been developed a software to allow the remote control of the lidar system thus that one can be checked if the equipments work correctly or there are some problems by a control room located not necessarily near the surveillance zone.

The designed system has been tested during an experimental campaign carried out in the Parco Nazionale dell'Abruzzo, locality "Valle di Canneto". These measurements have been more important to understand the problems shown by our system during its working and how to resolve them.

After this campaign we have improved the system with hardware and software modifications.

In particular, the program for recognizing the smoke-plume due to the combustion of vegetable matter has been developed.

New measurements campaigns have been carried out, in the same place, thus to optimize the our lidar system. The obtained results during these campaigns have shown how our system is able to localize a smoke-plume, recognizing if the peak on the backscattering lidar signal is due to the combustion of vegetable fuel or to a fixed targets. Moreover, with our system has been possible to evaluate the increment of atmospheric water vapour concentration connected to the forest fire, using Raman technique.

In this thesis will be shown the experimental set-up of our lidar system and the results obtained during the several measurements campaigns realized to estimate the capability of our lidar system for revealing the forest fire event and for minimizing the false alarms occurrence.

Introduzione

L'incendio boschivo è un problema grave e di difficile approccio che interessa, purtroppo, una considerevole parte del nostro pianeta: basti pensare che, nel solo decennio scorso e solo in Italia, sono andati perduti circa 500 mila ettari di bosco.

Gli incendi causano danni che si ripercuotono sull'ambiente e sull'uomo sia in modo diretto che indiretto. Quelli diretti sono facilmente valutabili, anche visivamente, e sono costituiti dalla perdita di massa legnosa. I secondi, di più difficile stima, sono connessi alle funzioni "senza prezzo" del bosco, vale a dire la difesa idrogeologica, la produzione di ossigeno e la conservazione della conformazione e delle caratteristiche di vegetazione del territorio.

L'importanza di questi fattori pone in rilievo la necessità di disporre di metodiche e tecnologie per poter fronteggiare con successo l'incendio boschivo, il che significa necessariamente affiancare ai sistemi già presenti in tutto il mondo nuovi apparati con caratteristiche di prontezza ed affidabilità più vantaggiose.

Uno dei punti critici che interessa i sistemi attualmente in funzione è il ritardo che si registra tra l'innescò dell'incendio ed il momento in cui i centri operativi competenti ottengono informazioni sufficienti per disporre le opportune contromisure. Se si riuscisse ad intervenire nelle prime fasi dell'incendio, si otterrebbe una riduzione notevole dei danni ed un risparmio sensibile delle risorse necessarie alla sua estinzione.

E' facile comprendere come il telerilevamento possa offrire un valido contributo alla risoluzione di questo problema.

In particolare, il telerilevamento attivo basato sulle tecniche Lidar/Dial è uno tra gli strumenti più adatti a monitorare con regolarità un incendio boschivo, per la possibilità di operare da un punto fisso su una superficie estesa e senza la necessità, per chi esegue la misura, di accedere di persona al sito in esame.

Per tali motivi è stato progettato, realizzato e messo a punto un sistema Lidar/Dial mobile per la rivelazione precoce degli incendi boschivi e per la riduzione dei falsi allarmi.

Il sistema Lidar, presentato in questo lavoro, è stato interamente progettato ed assemblato presso il laboratorio di ricerca di Elettronica Quantistica e Plasmi dell'Università di Roma "Tor Vergata" in collaborazione con i laboratori del Crati s.c.r.l di Lamezia Terme, nell'ambito del contratto di ricerca industriale SAI (Sistema Allerta Incendi) finanziato dal Miur (n. 7979/DSPAR/2002-DM 593/2000 art. 5).

Il sistema si basa, principalmente su due componenti strutturali: un Lidar per le misurazioni in campo ed un software, sviluppato *ad hoc*, per la minimizzazione dei falsi allarmi. Il primo componente è il cuore del sistema in quanto emette un fascio laser che, interagendo con i prodotti di combustione rilasciati in atmosfera durante un incendio boschivo, ne rileva la presenza. Il secondo componente opera al fine di minimizzare i falsi allarmi dovuti alla presenza di fumi che non si originano da incendi boschivi (fumi industriali, particolato atmosferico sollevato da vento forte, fumi che si originano da pratiche agricole "sicure", nebbie, ecc), e di diminuire il tempo impiegato dal sistema per l'elaborazione dei segnali Lidar.

La realizzazione del dimostratore finale è stata possibile solo dopo un attento studio delle proprietà ottiche dei prodotti emessi durante la combustione di materiale vegetale, e di come essi interagiscano con il fascio laser. E' per questo motivo che inizialmente sono state testate due sorgenti laser, una operante nell'IR e l'altra negli UV, al fine da stabilire quale fosse la migliore per i nostri scopi.

Sono state effettuate, quindi, misure del coefficiente di retrodiffusione da fumo in cella utilizzando una sorgente laser a CO₂ ed un laser Nd:YAG operante alle tre lunghezze d'onda 1064 nm, 532 nm e 355 nm.

Dai risultati ottenuti si è visto che il laser a stato solido è quello più idoneo ad essere impiegato per la rivelazione di incendi boschivi, in quanto i valori ottenuti per i coefficienti di retrodiffusione del fumo sono più alti (circa due ordini di grandezza), assicurando così una maggiore sensibilità del sistema

Scelta la sorgente laser, tutto il lavoro si è concentrato nel dotare il sistema di quelle caratteristiche fondamentali per un suo impiego, quali l'autonomia elettrica, la gestione in remoto ed la trasportabilità.

Il sistema è stato quindi installato su un supporto mobile, facilmente trasportabile da qualunque autovettura, e dotato di tutta quella strumentazione necessaria alla sua alimentazione.

Per quanto riguarda il controllo remoto, è stato sviluppato un software che consente la gestione da una sala controllo di tutta la strumentazione che compone il sistema di rivelazione incendi boschivi (compresi i sistemi di supporto).

E' stato infine realizzato il programma per il riconoscimento dei picchi e la minimizzazione dei falsi allarmi.

Sono state effettuate diverse campagne di misure al fine di testare il sistema dopo ogni fase critica della progettazione. Questo approccio al collaudo del sistema ne ha permesso le ottimizzazioni step-by-step.

Nel primo capitolo verrà data una breve introduzione degli aspetti teorici legati alla tecnica Lidar/Dial ed illustrate le proprietà ottiche dei prodotti emessi durante la combustione di materiale vegetale.

Nel capitolo seguente sarà inizialmente presentato il modello matematico sviluppato per studiare l'andamento dei prodotti di combustione in un ambiente confinato (cella). Successivamente, saranno mostrate le misure preliminari dei parametri ottici significativi di alcuni materiali vegetali tipici delle zone e dei boschi della Calabria, effettuate in una cella realizzata *ad-hoc*. I risultati sperimentali saranno, quindi, confrontati con quelli ottenuti dalle simulazioni.

A questo punto, il terzo capitolo sarà interamente dedicato alla progettazione e realizzazione del dimostratore SAI e verranno presentati i risultati dei primi test in campo, evidenziando i problemi riscontrati. Questi saranno risolti apportando alcune

modifiche strutturali al sistema che saranno discusse nel capitolo quarto, insieme ai risultati ottenuti nella seconda campagna di misure.

Nel quinto capitolo sarà mostrato il funzionamento in remoto del sistema, testato effettuando misure dello strato limite planetario (PBL) nell'arco delle ventiquattro ore.

Infine, nel sesto capitolo, verrà illustrato nel dettaglio il funzionamento del software per il riconoscimento dei picchi da fumo e la minimizzazione dei falsi allarmi e presentate l'ultima campagna di misure effettuata.

Capitolo 1.

Il telerilevamento laser e gli incendi boschivi

1.1 Introduzione

Il fuoco è un particolare fenomeno chimico di ossidazione violenta che si verifica in presenza di tre elementi contemporaneamente: combustibile, comburente e fattore di innesco. Un combustibile è per definizione tutto ciò che arde, che può bruciare. Nel caso dei sistemi forestali il combustibile è dato da sostanze vegetali quali paglia, rami, tronchi, radici, erbe, ecc. Tali sostanze vegetali possono reagire con l'ossigeno iniziando una reazione che produce calore. Fino ad un certo limite il calore prodotto viene disperso e la reazione si blocca. Però il combustibile può ricevere calore dall'esterno in maniera tale da incrementare la temperatura e, raggiunto un certo grado proprio di ogni combustibile che corrisponde alla "temperatura di accensione", la quantità di calore prodotto diventa nettamente superiore a quella dispersa e la reazione prosegue da sola, senza ulteriore apporto di calore dall'esterno. Si hanno così elevate temperature e sviluppo di fiamma. Le sorgenti di calore esterne possono essere di natura diversa: scintille, cerini, mozziconi di sigarette, fulmini, ecc.

Il comburente, invece, è generalmente costituito dall'ossigeno atmosferico e quindi la costante ventilazione del combustibile innescato permette l'autosostentamento del processo.

Il primo segnale della presenza di un incendio boschivo è l'avvistamento di un pennacchio di fumo ("smoke-plume"), ovvero un aerosol costituito dal particolato prodotto dalla combustione delle biomasse sospeso in aria, da cui si allontanano progressivamente i composti molecolari risultanti dalla reazione di ossidazione.

La superficie boschiva persa o solo danneggiata dagli incendi, negli ultimi anni, è cresciuta a dismisura. Per cercare di contrastare questo fenomeno, si è reso, quindi, necessario adottare una serie di provvedimenti specifici per la salvaguardia degli

ambienti naturali dal fuoco: quest'ultimi costituiscono un potenziamento di tutte quelle strutture già presenti sul territorio.

In questo processo di potenziamento, si distinguono tutte le misure dedicate al conseguimento di un'azione di carattere preventivo. Una delle strutture più efficaci, appartenenti a quest'ultima metodologia, si è dimostrata essere l'utilizzo di impianti di monitoraggio per la rivelazione degli incendi, basati su tecnica Lidar/Dial.

1.2 Il telerilevamento laser: la tecnica Lidar

Con il termine "remote sensing" o "telerilevamento" si intende l'acquisizione di informazioni riguardanti le proprietà di un fenomeno, oggetto o materiale senza essere a diretto contatto con esso.

Una prima classificazione del telerilevamento può essere fatta distinguendo tra quello passivo e quello attivo. Nel primo caso il sensore è deputato al solo ricevimento della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie o dall'oggetto in analisi. Nel caso di telerilevamento attivo invece il sensore è allo stesso tempo emettitore di radiazione elettromagnetica e misuratore delle radiazioni una volta che queste hanno interagito con la superficie e ne sono state riflesse.

Tutte le tecnologie basate sul telerilevamento sfruttano quattro elementi fondamentali:

- bersaglio;
- sorgente di energia;
- sistema di trasmissione;
- sensore.

La tecnica Lidar (Light Detection And Ranging- Rivelazione di Luce a Distanza e Misura), è una tecnica di telerilevamento attivo a distanza ed è una delle metodologie che permettono lo studio dei fenomeni atmosferici naturali ed antropogenici [1,2].

I Lidar funzionano sullo stesso principio base dei Radar, a differenza dei quali utilizzano radiazioni a lunghezza d'onda ottiche, ossia paragonabili alle dimensioni delle molecole e aerosol atmosferici. La tecnica Lidar prevede l'invio in atmosfera, tramite un opportuno sistema ottico, di un breve impulso laser verso il bersaglio di interesse, e la raccolta da parte dell'ottica ricevente, della radiazione retrodiffusa, che viene misurata dal sistema di rivelazione. Uno degli obiettivi di questa ricerca è quello di utilizzare la tecnica lidar per misurare la variazione della densità aerosolica del fumo prodotto dalla combustione di materiale boschivo per una rivelazione precoce degli incendi. Alla base della tecnica Lidar c'è l'equazione Lidar [2, 3], che nel caso di scattering elastico, ovvero quando è verificata la condizione che la lunghezza d'onda del segnale ricevuto è uguale a quella del segnale inviato dalla sorgente laser λ_L , è scritta usualmente nella forma:

$$P(\lambda_L, R) = P_L \xi(\lambda_L) \xi(R) \frac{A_0}{R^2} \beta(\lambda_L, R) \frac{c\tau}{2} \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(\lambda_L, R) dR\right] \quad (1.1)$$

dove $P(\lambda_L, R)$ è la potenza ottica ricevuta dal rivelatore alla distanza R , P_L la potenza dell'impulso laser incidente, R la distanza del bersaglio dal punto di osservazione, c la velocità della luce, τ la durata dell'impulso laser, A_0 l'area attiva del telescopio ricevente, $\alpha(\lambda_L, R)$ il coefficiente di attenuazione atmosferico totale, $\xi(R)$ il fattore di forma geometrica $\xi(\lambda_L)$ il fattore di trasmissione spettrale e $\beta(\lambda, R)$ il coefficiente volumetrico atmosferico di retrodiffusione.

L'equazione Lidar nasce sulla base delle seguenti approssimazioni :

- la larghezza di riga della radiazione diffusa dal campione in esame è molto piccola rispetto alla finestra spettrale del ricevitore ottico in modo da approssimarla ad una delta di Dirac;
- l'andamento temporale dell'impulso laser è rettangolare di durata τ_L , ossia in questo intervallo temporale il bersaglio viene illuminato in modo uniforme dalla radiazione;

- nella zona di sovrapposizione tra il campo di vista dell'ottica di ricezione ed il fascio laser, il mezzo in esame è omogeneo e la probabilità che la radiazione diffusa da una certa posizione nel piano del bersaglio raggiunga il ricevitore ottico è unitaria.

Come si evince dall'equazione, si mette in relazione la radiazione retrodiffusa dai componenti atmosferici, per effetto della propagazione di un impulso laser, con le proprietà ottiche (β , α) relative al mezzo che ha prodotto la diffusione. E' dunque possibile ricavare informazioni fisiche sulle specie diffondenti.

1.2.1 Il rumore nei sistemi telerilevamento

Il segnale Lidar di ritorno è affetto da fluttuazioni dovute agli effetti atmosferici e a un rumore associato alla strumentazione ottica dello stesso sistema di rivelazione. Il rumore può essere interpretato come un falso segnale che può ridurre il segnale fino ad oscurarlo. Per valutare l'entità di questo effetto si definisce come rapporto segnale-rumore SNR il rapporto tra il segnale desiderato e il rumore casuale:

$$SNR = \frac{I_s}{I_n} \quad (1.2)$$

dove:

- I_s è la corrente dovuta al segnale incidente sul rivelatore
- I_n è la corrente dovuta al rumore

L'SNR viene valutato tenendo conto del rumore della strumentazione ottica.

La potenza ricevuta dal rivelatore, espressa mediante l'equazione Lidar viene convertita in corrente elettrica da un fotomoltiplicatore. Il segnale di uscita del fotomoltiplicatore include tre componenti [2]:

- la corrente dovuta all'energia della radiazione laser retrodiffusa:

$$I_s = P_r R_p \quad (1.3)$$

- la corrente dovuta alla radiazione di fondo (corrente di background):

$$I_{bgnd} = P_{bgnd} R_p \quad (1.4)$$

- la corrente di buio I_{dark} , dovuta alla generazione termica di portatori in assenza di segnale ottico.

Nelle espressioni per le correnti sopra scritte P_r è la potenza che arriva al rivelatore, R_p la responsività (o sensibilità) del fotocatodo, G è il guadagno del rivelatore e P_{bgnd} è la potenza della radiazione solare di fondo ricevuta:

$$P_{bgnd} = A_r \tau_r B_f \frac{\pi \gamma^2}{4} L_\lambda \quad (1.5)$$

dove A_r è l'area effettiva del ricevitore, τ_r è l'efficienza del ricevitore, γ è l'angolo che definisce il campo visivo e L_λ è la radianza solare di fondo.

Sostituendo i vari termini si ottiene:

$$SNR = \frac{P_r R_p G}{\sqrt{2eG^2 F B_e (P_r R_p + P_{bgnd} R_p + I_{dark})}} \quad (1.6)$$

dove

- e è la carica dell'elettrone
- $B_e = 1/2t_p$ è la banda passante elettronica con t_p durata dell'impulso laser
- F rappresenta un fattore di rumore associato al guadagno G (generalmente $F \sim 1$ e può essere trascurato) [2].

1.3 Caratteristiche ottiche dei prodotti di combustione

Gli incendi di aree incolte sono fenomeni variabili e il fumo da loro prodotto è una complessa miscela di materiali organici e inorganici. La frazione di particolato del fumo è variabile sia nella composizione chimica sia nelle proprietà fisiche. Molte particelle presenti nel fumo si formano da componenti organici gassosi prodotti durante le fasi di pirolisi e combustione. Attraverso processi di nucleazione, condensazione e coagulazione

si formano, invece, particelle solide e liquide. I pennacchi di fumo contengono una grossa quantità di particelle che diffondono fortemente la radiazione incidente. Nell'interazione radiazione-fumo l'intensità della radiazione laser viene attenuata, seguendo la nota legge di Beer-Lambert [2, 4].

L'attenuazione è causata dall'assorbimento e dalla diffusione da parte di molecole e particolato presenti in atmosfera durante la propagazione dell'incendio boschivo, che possiamo tradurre nella formula seguente:

$$\alpha(\lambda) = \sum_i [\alpha_a(\lambda) + \alpha_R(\lambda) + \alpha_{Ra}(\lambda)] + \alpha_{Mie}(\lambda) \quad (1.7)$$

dove \sum_i è estesa a tutti i costituenti atmosferici, $\alpha_a(\lambda)$ è il coefficiente di attenuazione volumetrico di assorbimento, $\alpha_{Ra}(\lambda)$ il coefficiente di attenuazione volumetrico dovuto alla sola diffusione Raman, e $\alpha_R(\lambda)$ è il coefficiente di attenuazione volumetrico dovuto alla sola diffusione Rayleigh, e, infine, α_{Mie} è il coefficiente di attenuazione volumetrico dovuto alla sola diffusione Mie. Introduciamo così il coefficiente di attenuazione totale atmosferico $\alpha(\lambda)$, che racchiude tutti i fenomeni di interazione che avvengono in essa. Nel presente lavoro di tesi siamo interessati ai parametri ottici (β , α).

Se siamo interessati ai soli processi diffusivi possiamo esprimerli in funzione della sezione d'urto totale $\sigma(\text{cm}^2)$ e, in particolare occorre separare i due contributi, molecolare ed aerosolico, cioè porre $\beta = \beta_{mol} + \beta_{aer}$. Il primo contributo è dovuto alla retrodiffusione di tipo Mie da parte delle particelle aerosoliche.

Per una densità molecolare uniforme N , il coefficiente volumetrico di attenuazione è dato da $\beta = \sigma N$. Poiché la diffusione della radiazione non è isotropa, si deve considerare, nel processo, la sezione d'urto differenziale che nel caso di diffusione Rayleigh ha la nota formula [2, 5]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N^2} (\cos^2 \vartheta \cos^2 \varphi + \sin^2 \vartheta) \quad (1.8)$$

dove φ è l'angolo di polarizzazione, ϑ l'angolo di diffusione e n l'indice di rifrazione. Nel caso specifico di telerilevamento attivo mediante laser, siamo interessati al segnale retrodiffuso, e cioè con angolo ϑ pari a π . In questo caso otteniamo:

$$\frac{d\sigma(\vartheta = \pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N^2} \quad (1.9)$$

dalla quale si ottiene che il coefficiente volumetrico di attenuazione è:

$$\beta = N\sigma(\pi) = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N} \quad (1.10)$$

In conclusione il coefficiente volumetrico di attenuazione atmosferica dovuto alla sola diffusione Rayleigh è [2, 6]:

$$\alpha_R = (8/3)\pi N\sigma_R(\pi) \quad (1.11)$$

Questa quantità è nota a partire da modelli atmosferici e rappresenta la concentrazione totale di molecole presenti in atmosfera.

Il coefficiente volumetrico di attenuazione atmosferico dovuto alla sola diffusione Raman, con una sezione d'urto dell'ordine di $10^{-28}\text{cm}^2/\text{sr}$ [2], se confrontato con i contributi di Rayleigh e Mie, risulta trascurabile.

L'intensità totale della radiazione diffusa dal particolato emesso durante un incendio boschivo dipende dalla densità e dall'efficienza di diffusione riferita alla distribuzione dimensionale delle particelle.

Le dimensioni e le proprietà degli aerosol sono variabili, così che risulta molto complesso calcolare la sezione d'urto di Mie, la cui diffusione diviene importante quando le dimensioni delle particelle diffondenti sono confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione incidente, o maggiori.

Introduciamo il parametro p , sezione di diffusione, definito come il prodotto fra il vettore d'onda K e le dimensioni del particolato a , $p=Ka=2\pi a/\lambda$, la sezione d'urto di retrodiffusione è [2]:

$$\sigma_M^\pi = a^2 \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) \quad (1.12)$$

Questa ha una dipendenza proporzionale alla sesta potenza delle dimensioni del particolato e a parità di lunghezza d'onda, la diffusione Mie è di due ordini di grandezza maggiore rispetto a quella di Rayleigh.

Si ricava dalla teoria di Mie sulla diffusione da particelle sferiche il coefficiente volumetrico di attenuazione Mie [4]:

$$\beta_\pi = \int Q_\pi(\tilde{m}, Ka) \pi a^2 n(a) da \quad (1.13)$$

con Q_π indichiamo il fattore adimensionale di efficienza di diffusione di Mie, definito come il rapporto fra la sezione d'urto di retrodiffusione e la sezione d'urto geometrica,

che in formula diventa $Q_\pi = \frac{\sigma_M^\pi}{\pi a^2}$, che è una grandezza in funzione dell'indice di rifrazione complesso, della forma e delle dimensioni degli aerosol, e con $n(a)$ la distribuzione della taglia del particolato, supposta sferica (numero/cm²).

La distribuzione dimensionale dei prodotti di combustione è stata misurata da molti autori, come Stith[7], Hueglin [8] e De Vries [9]; i dati per le concentrazioni e i diametri medi risultanti dai vari esperimenti sono mostrati in tabella 1.2.1.

Per gli esperimenti (1) e (3) le concentrazioni sono state ottenute assumendo che la concentrazione in peso del particolato avesse un valore pari a quello di riferimento $C_p \approx 0.3\text{g/m}^3$, mentre nell'esperimento (2) è stata fatta l'assunzione $C_p \approx 0.7\text{g/m}^3$.

Combustibile	Concentrazione (cm ⁻³)	Diametro Medio (μm)	Coefficiente di diffusione (m ⁻¹ sr ⁻¹)
Legno (fase iniziale) (1)	8.7·10 ⁷	0.12	6.6·10 ⁻³
Legno (fase iniziale) (2a)	4.4·10 ⁷	0.26	3.8·10 ⁻²
Legno (fase intermedia) (2b)	3.8·10 ⁷	0.19	1.3·10 ⁻²
Legno (smoldering*) (2c)	1.9·10 ⁹	0.05	3.6·10 ⁻⁴
Legno (fase iniziale) (3)	1.3·10 ⁶	0.53	4.6·10 ⁻³
* <i>smoldering</i> fase in cui la combustione procede senza una fiamma visibile			

Tabella 1.1 – Concentrazione, diametro medio e coefficiente di diffusione riportati dai vari autori (1) Stith [7], (2) Hueglin [8], (3) Vries [9].

Dai dati riportati si nota che il diametro medio varia da 0.05 a 0.53 μm.

Il coefficiente di scattering è stato calcolato mediante la relazione:

$$\beta(n, \lambda) = \pi \int_0^{\infty} Q_s(a, \lambda, n) a^2 N(a) da \quad (1.14)$$

dove

- Q_s = efficienza di backscattering
- a = raggio della particella
- λ = lunghezza d'onda
- $n = n_1 - in_2$ indice di rifrazione complesso
- $N(a)$ = distribuzione dimensionale delle particelle

La relazione del coefficiente di scattering lega la distribuzione dimensionale delle particelle all'efficienza di scattering delle stesse. In accordo con Benech [10], Patterson e Mc Mahon [11] per l'indice di rifrazione complesso del fumo prodotto dalla combustione del legno si può utilizzare il valore $n = 1.53 - 0.03i$. Assumendo per tutte le particelle una forma sferica, si può determinare la sezione d'urto di backscattering sulle basi della teoria di Mie [12, 13] in cui i termini dell'equazione dipendono dal parametro $2\pi a/\lambda$.

Dai dati riportati in tabella 1.1, in cui gli autori assumono una lunghezza d'onda pari a $1.53 \mu\text{m}$, è evidente che il coefficiente di backscattering assume valori molto variabili: per la fase iniziale si ha un valore abbastanza elevato: $\beta = 3.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$, mentre per la fase di smoldering si ha un valore più basso: $\beta = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$.

I pennacchi di fumo contengono una porzione elevata di particelle di cenere che diffondono fortemente la radiazione incidente. Il risultato degli studi di Stith [7] dimostra che l'intensità totale della radiazione retrodiffusa da questo particolato dipende dalla sua densità e dalla distribuzione riferita alla dimensione delle particelle e che la maggior parte delle particelle nel pennacchio di fumo si forma nel fuoco stesso, mentre le particelle secondarie si formano all'interno del fumo. Inoltre dall'analisi condotta si evince che il particolato prodotto negli incendi è un eccellente diffusore della luce e molta della sua massa è contenuta in particelle di alcune decine di μm di diametro, dimensione ottimale per la diffusione della luce incidente.

Per quanto riguarda invece l'assorbimento molecolare, questo dipende dalla frequenza della radiazione incidente e dalla forma delle numerose transizioni rotovibrazionali delle molecole atmosferiche [2, 4].

Anche in questo caso è necessario considerare separatamente i contributi aerosolici e molecolari ed inoltre bisognerà valutare i diversi fenomeni responsabili dell'attenuazione.

$$\alpha = \alpha_{mol} + \alpha_{mol} = \alpha_{mol,a} + \alpha_{mol,s} + \alpha_{aer,a} + \alpha_{aer,s} \quad (1.15)$$

In questa formula gli indici s ed a si riferiscono, rispettivamente, allo scattering e all'assorbimento. Il termine $\alpha_{mol,s}$ è legato alla sezione d'urto di Rayleigh σ_R dalla relazione:

$$\alpha_{mol,s} = N_{mol}\sigma_R \quad (1.16)$$

Il contributo dovuto all'assorbimento da parte di molecole gassose, è funzione di λ e predomina sugli altri in corrispondenza delle righe dell'assorbimento dei componenti atmosferici. Inoltre, ci siamo in precedenza soffermati sul noto legame fra β_{mol} e α_{mol} ($\alpha_{mol} = \alpha_{mol,a} + \alpha_{mol,s}$), $\alpha_{mol} = \beta_{mol} / 0.119$, che si evince dalla teoria di Rayleigh. Per quanto riguarda il contributo aerosolico nella (1.10), nell'ipotesi che gli aerosol possano essere considerati sferici o come una polidispersione omogenea di sfere, come per il caso del coefficiente di retrodiffusione aerosolico, si ottiene:

$$\alpha_{aer}(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_E(a, \lambda, n) N_{aer}(a) da \quad (1.17)$$

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:

$$\sigma_{aer,s}(a, \lambda, n) = \pi a^2 Q_s(x, n) \quad (1.18)$$

$$\sigma_{aer,a}(a, \lambda, n) = \pi a^2 Q_a(x, n) \quad (1.19)$$

dove Q_s e Q_a rappresentano, rispettivamente, l'efficienza di scattering e di assorbimento aerosolico e possono essere determinate con metodi numerici. Quindi, in definitiva, il segnale elastico descritto dall'equazione lidar dipende dai coefficienti di estinzione e di backscattering dovuti alle sole particelle aerosoliche in atmosfera. E' chiaro quindi che, quando le lunghezze d'onda della radiazione incidente coincidono con le righe di assorbimento delle molecole che costituiscono l'atmosfera, il fascio inviato risulta attenuato e il segnale retrodiffuso dal particolato assai debole in corrispondenza del

passaggio del fascio attraverso volumi di aria in cui la densità della sostanza in esame è maggiore.

Una diminuzione sostanziale dell'assorbimento gassoso è quindi responsabile della finestra di trasmissione atmosferica. Patterson e Mc Mahon [11] hanno effettuato misure sull'assorbimento, in termini di assorbimento specifico B_s espresso in m^2/g , di particelle solubili e insolubili prodotte nella combustione di aghi di pino al variare della lunghezza d'onda, osservandone il comportamento nelle fasi di fiamma e di smoldering.

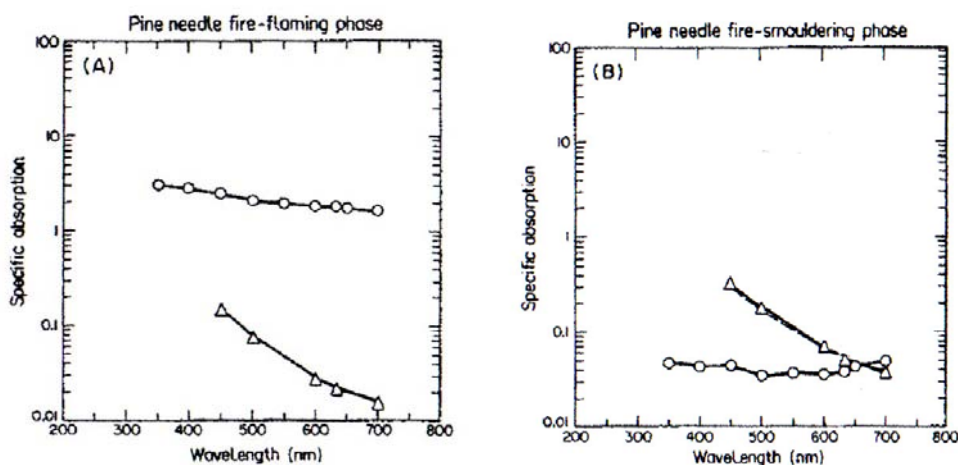


Figura 1.1 – Valori di assorbimento specifico nella fase di fiamma(A) e nella fase di smoldering (B) per particelle solubili (Δ - Δ) e insolubili (o-o) [11].

Come risulta evidente dalla figura 1.1, il comportamento delle particelle solubili è simile nelle due fasi, mentre le particelle insolubili hanno mostrato basso assorbimento nella fase di smoldering.

Il particolato emesso nella fase di fiamma presenta quindi elevate proprietà di assorbimento (approssimativamente $B_s = 1m^2g^{-1}$) con scarsa dipendenza dalla lunghezza d'onda, mentre quello emesso nella fase di smoldering sono caratterizzati da valori di assorbimento molto più bassi a lunghezze d'onda del medio visibile.

1.4 La combustione di materiale vegetale

Prima di analizzare le proprietà dei gas emessi durante un incendio boschivo è necessario illustrare in dettaglio i processi che governano questo fenomeno, la combustione di materiale organico infatti è estremamente complicato a causa della complessa composizione fisico chimica dei costituenti in essa coinvolti e a causa dell'ambiente incontrollato in cui avviene. Al fine di ottenere una utile semplificazione spesso si ricorre ad un modello che descrive la combustione come un processo in cui un combustibile viene ossidato per produrre anidride carbonica e acqua. Va considerato, però, che intercorrono molti altri processi che conducono alla formazione di numerosissime specie chimiche la cui composizione e percentuale dipende strettamente dalla composizione del combustibile.

1.4.1 Caratterizzazione del combustibile

I combustibili possono essere distinti in [12]:

- leggeri: erba, foglie secche, rami di piccole dimensioni, rami morti di diametro inferiore a 5 cm; sono molto infiammabili e bruciano rapidamente.
- pesanti: tronchi, rami di grosse dimensioni, ceppaie secche che bruciano a lungo e ad alte temperature.

I parametri che definiscono le proprietà di un combustibile sono [13]:

- composizione
- contenuto di umidità
- quantità di calore prodotta

Composizione

Il materiale vegetale coinvolto nella combustione può essere analizzato considerando i suoi componenti strutturali oppure considerando i suoi componenti chimici.

I componenti strutturali possono essere suddivisi in materiali inorganici e materiali organici [14].

I materiali inorganici dipendono dal tipo di specie vegetale che si considera e dal tipo di suolo in cui cresce; un legno medio ne contiene circa lo 0.5%. I componenti insolubili abbassano l'efficienza di combustione come l'umidità, mentre i componenti ionici solubili possono avere un effetto catalitico nel processo di combustione. La presenza di materiale inorganico favorisce la carbonizzazione.

I materiali organici presenti nel combustibile vegetale sono la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina. L'emicellulosa, in particolare, ha un calore di combustione più basso della cellulosa poiché contiene molte molecole di acqua nella sua composizione chimica: $[C_6(H_2O)_5]_n$ oppure $[C_5(H_2O)_4]_n$. La lignina ha una composizione chimica di $C_{10}H_{11}O_2$.

I componenti chimici del combustibile vegetale sono carbonio, idrogeno e ossigeno, azoto, zolfo e altri componenti come residui non combustibili classificati come ceneri. Le composizioni dei combustibili hanno piccole fluttuazioni intorno ad un valore medio preso come riferimento. Il combustibile di riferimento è definito dalla seguente composizione percentuale in peso [14]:

- o % in peso di C = 50.5 %
- o % in peso di H = 6 %
- o % in peso di O = 42.4 %
- o % in peso di ceneri = 0.85 %
- o % in peso di N = 0.2 %
- o % in peso di S = 0.05 %

Contenuto di umidità

Fattore importante per i combustibili è l'umidità, ossia il contenuto d'acqua, infatti quando è superiore al 25% l'accensione è possibile solo con un elevato apporto esterno di calore. La quantità di umidità presente nei materiali vegetali presenta una larga fluttuazione, dal 15% all'80% del peso del combustibile [13].

Quantità di calore prodotta

Il calore prodotto nella completa combustione di una unità di massa di combustibile vegetale presenta piccole fluttuazioni intorno al valore medio di $20.6 \cdot 10^6$ J/kg del combustibile di riferimento.

1.4.2 La combustione

Il processo di combustione è una reazione chimica di ossidazione fortemente esotermica nella quale il carbonio e l'idrogeno contenuti nel combustibile si combinano con l'ossigeno, per produrre anidride carbonica e acqua.

Il processo di combustione di un combustibile vegetale può essere descritto approssimativamente con la reazione:



dove CH_2O rappresenta la composizione media delle biomasse.

In questo caso il rapporto aria combustibile è dato dalla relazione:

$$\frac{32 + 3.76 \cdot 28}{12 + 18} = 4.58 \quad (1.21)$$

La reazione di combustione è caratterizzata da due parametri fondamentali: l'aria teorica e l'aria in eccesso. L'aria è costituita dal 21% in volume da ossigeno e dal 79% in volume da azoto, per cui il rapporto azoto/ossigeno è uguale a 3.76. L'aria teorica è la quantità di aria stechiometricamente necessaria all'ossidazione totale del combustibile.

Questo parametro può essere determinato o sulla base delle ragioni di combustione o mediante la seguente formula semplificata:

$$A_t = 0.089C + 2.256H + 0.0333S - 0.0334O \quad (1.22)$$

dove:

- A_t è il volume in m^3 di aria teoricamente necessaria per la combustione di 1 kg di combustibile;
- C è la % di carbonio presente nel combustibile;
- H è la % di idrogeno presente nel combustibile;
- S è la % di zolfo presente nel combustibile;
- O è la % di ossigeno presente nel combustibile.

Nel caso in cui la combustione non sia completa si ha la produzione di altre specie del carbonio, quali monossido di carbonio (CO), metano (CH₄), idrocarburi non-metano (NMHC) e particolato. Inoltre l'azoto e lo zolfo presenti nella composizione delle biomasse generano ossidi di azoto (NO_x) ammoniaca (NH₃) ed ossidi di zolfo (SO_x).

1.4.3 Composizione del fumo

Il fumo prodotto durante gli incendi boschivi è una complessa miscela di materiali organici e inorganici, quindi la frazione di particolato immessa in atmosfera può avere proprietà fisiche e composizione chimica variabile. La maggior parte del particolato nei fumi è composto da gas organici prodotti per pirolisi e combustione. La nucleazione, la condensazione e la coagulazione formano particolato solido o liquido. Le particelle di liquido hanno forma pressoché sferica, mentre quelle solide si presentano, più frequentemente, come aggregati concatenati caratteristici della fuliggine.

La composizione del fumo dipende sia dalla natura del combustibile organico che dal tipo, dall'intensità e dalla fase del fuoco. I vari componenti del fumo si originano mediante varie fasi di decomposizione termica. Nella fase di pre-ignizione, ad esempio, si ha una graduale variazione dell'umidità e l'inizio del processo di pirolisi, mentre nella

fase di fiamma i gas prodotti nella pirolisi subiscono combustione. Nella fase di smoldering la combustione procede senza una fiamme visibile mentre in quella finale ardente, predomina l'ossidazione delle superfici solide dopo che tutta la fase volatile si è allontanata dal centro del fuoco. La tabella 1.2 mostra le percentuali dei prodotti di combustione generati durante la fase di fiamma e durante la fase di smoldering.

	Percentuale prodotta in fase di combustione	
	Fiamma	Smoldering
CO ₂	63	37
CO	16	84
CH ₄	27	73
NMHC	33	67
NO _x	66	34
NH ₃	15	85
HCN	33	67
CH ₃ Cl	28	72

Tabella 1.2 – Proporzione dei singoli prodotti della combustione durante la fase di fiamma e durante la fase di smoldering [12].

Le sostanze sprigionate nella combustione possono essere così suddivise:

- Particolato (PM)
- Idrocarburi aromatici polinucleari (PAH)
- Ossidi di carbonio (CO e CO₂)
- Aldeidi
- Acidi organici
- Componenti volatili e semi-volatili (VOC)
- Composti a base di azoto e zolfo
- Radicali liberi
- Ossidanti dell'ozono

- Particelle inorganiche

Il particolato, abbondantemente prodotto negli incendi di aree incolte, può essere classificato in base alle dimensioni delle particelle che lo costituiscono. Particelle ultrafini hanno diametro inferiore a $0.1\mu\text{m}$, particelle fini con diametro inferiore a $2.5\mu\text{m}$ e particelle grossolane con diametro maggiore di $2.5\mu\text{m}$. Ad esempio si indica con PM_{10} il particolato con diametro medio inferiore a $10\mu\text{m}$. La fase di smouldering produce particelle molto più fini rispetto alla fase di fiamma. La distribuzione del particolato nel pennacchio di fumo è disomogenea, ha infatti una densità maggiore nelle vicinanze del fuoco e un'attenuazione verso l'alto dovuta alla dispersione in atmosfera.

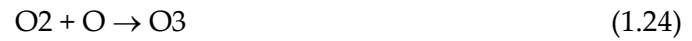
Gli Idrocarburi aromatici polinucleari (PAH) sono composti provenienti dalla sintesi di frammenti di carbonio in grandi strutture molecolari in ambienti scarsi di ossigeno, come avviene intorno alla fiamma nella zona ricca di combustibile. Se la temperatura non è adeguata decomporre i componenti prima che escano dalla zona di fiamma, vengono rilasciati in atmosfera e condensati o assorbiti dalla superficie delle particelle di particolato.

Gli ossidi di carbonio sono i composti del carbonio con l'ossigeno. In particolare il monossido di carbonio è un gas tossico incolore prodotto durante la combustione incompleta delle biomasse. La maggior parte viene prodotta nella fase di smouldering e continua ad essere emessa anche durante i primi cinque minuti della fase di estinzione.

Gli ossidi di azoto e di zolfo sono prodotti dalla combustione di biomassa contenente azoto e zolfo. La fase di smoldering produce composti come l'ammoniaca (NH_3) mentre la fase di fiamma produce ossidi di azoto. Inoltre negli incendi di grande entità in cui la temperatura è molto elevata può accadere che gli ossidi di azoto subiscano una dissociazione descritta dalla seguente reazione di fotolisi:



L'ozono si forma fotochimicamente alla sommità del pennacchio di fumo in condizioni di elevato soleggiamento. L'ossigeno atomico, prodotto nella fotolisi degli ossidi di azoto, presenta un' affinità di legame verso l'ossigeno molecolare:



generalmente si forma quando il fumo è intrappolato nelle valli o sotto inversioni di temperatura dell'atmosfera.

Capitolo 2.

Studio della diffusione dei prodotti di combustione

2.1 Introduzione

Le prestazioni di un sistema di rivelazione passano innanzitutto per un modello che permetta di studiare le caratteristiche chimiche e termiche del fumo stesso. Per far questo è stato necessario uno studio approfondito del processo di combustione e di tutte le variabili che in esso entrano in gioco, come, ad esempio il tipo di vegetazione presente, la morfologia del terreno ed il fattore climatico (vento, umidità).

Ovviamente non potendo realizzare un modello che tenesse conto contemporaneamente di tutte queste variazioni che influenzano sia l'inizio che il procedere dell'incendio, sono state effettuate delle scelte sulla base delle informazioni reperite in letteratura, cercando di considerare il maggior numero di variabili possibili.

La soluzione, per via numerica, del modello fluidodinamico sviluppato è stata ottenuta tramite un software noto come Comsol Multiphysics basato sul metodo degli elementi finiti che sarà brevemente descritto nel corso di questo capitolo.

Il modello è stato, quindi, validato andando ad effettuare misure in cella dei coefficienti di backscattering da fumo per diverse tipologie di combustibile vegetale. La cella di assorbimento, realizzata *ad hoc*, consente di effettuare misure in un ambiente uniforme e controllato dove il fumo può diffondere senza essere influenzato da perturbazioni esterne. Questa condizione è fondamentale perché ci assicura che i risultati del modello matematico e le misure sperimentali sono stati ottenuti nelle medesime condizioni e quindi confrontabili tra di loro.

2.2 Metodi numerici

La risoluzione delle equazioni del moto dei fluidi non è conseguibile analiticamente se non in casi in cui siano ammesse drastiche semplificazioni. Nei casi generali si deve

ricorrere alla risoluzione per via numerica. Il concetto di discretizzazione è alla base di ogni metodo numerico [15], e consiste nel definire all'interno del dominio di calcolo dei punti, *nodi*, in cui valutare le grandezze incognite. In alcuni casi è comodo pensare ogni nodo come centro della rispettiva zona di influenza, o cella (in sostanza si pensa di suddividere il dominio in tanti volumetti, all'interno di ognuno dei quali è posizionato un nodo). Si suppone, inoltre, un andamento per dette grandezze tra nodo e nodo, ad esempio lineare, quadratico, etc. La trasformazione delle equazioni differenziali dalla forma continua a quella discreta avviene con modalità differenti a seconda del metodo numerico adottato, ma ha come risultato finale l'ottenimento di un sistema di equazioni algebriche aventi per incognite i valori della grandezze di interesse nei nodi, valori approssimati in virtù delle semplificazioni insite nell'operazione di discretizzazione. L'insieme dei nodi e delle celle costituisce la cosiddetta griglia di calcolo, e può essere caratterizzata in vario modo. Si possono avere griglie Cartesiane, ossia caratterizzate da celle a forma di parallelepipedo; ortogonali, in cui gli spigoli delle celle, pur non necessariamente rettilinei, si incontrano ortogonalmente; si distinguono inoltre griglie strutturate, caratterizzate da una struttura topologicamente analoga a quella delle griglie Cartesiane, e griglie non strutturate, con una distribuzione delle celle di tipo più generale.

2.3 Metodo degli elementi finiti (FEM)

Il *Metodo degli elementi finiti* [16] (FEM) nasce in sordina negli anni 60, ma successivamente allo sviluppo degli strumenti informatici, ha un'evoluzione ed uno sviluppo esponenziali, suscitando notevole interesse per il vasto numero di campi cui è possibile applicare i suoi principi. L'uso del FEM si afferma come uno dei migliori strumenti per lo studio di sistemi complessi, per i quali indagini e sperimentazioni in laboratorio comporterebbero spese eccessive, difficoltà logistiche e difficoltà legate alla misurazione fisica delle varie grandezze. Se i primi approcci automatici per la soluzione delle equazioni differenziali che governano i fenomeni fisici, si affermano con le differenze finite¹, il FEM offre una gamma di applicazioni che non ha eguali, grazie alla sua flessibilità. Il metodo degli elementi finiti, come tutti i metodi numerici, consente di determinare il valore approssimato della variabile incognita in un numero finito di punti (nodi). L'applicazione

del metodo alla soluzione di un problema fisico avviene con un processo sequenziale che comprende i seguenti passi:

- il dominio viene discretizzato, ovvero diviso in *elementi*. Questi non devono sovrapporsi o lasciare degli spazi vuoti. Il tipo di elemento è determinato dal numero di nodi e dalla loro disposizione spaziale;
- in base al tipo di elementi si scelgono opportune *funzioni di forma* che consentono l'approssimazione della variabile incognita all'interno e lungo i contorni degli elementi;
- per ogni elemento viene formulata un'equazione di tipo matriciale basata su una forma integrale dell'equazione differenziale da risolvere;
- le equazioni di ogni elemento vengono "assemblate" per formare un sistema globale di equazioni lineari;
- si risolve il sistema lineare e si determinano i valori "nodali" dell'incognita.

Per determinare il valore della funzione incognita in punti diversi dai punti nodali è necessario definire delle opportune funzioni di forma, ovvero tali che:

$$u(x) \cong \tilde{u}^e(x) = N_1^e(x)u_1^e + \dots + N_r^e(x)u_r^e = \sum N_i^e(x)u_i^e = \mathbf{N}^e \mathbf{u}^e$$

dove \tilde{u}^e rappresenta il valore approssimato della soluzione $u(x)$, \mathbf{u} è il vettore, di lunghezza r , dato dall'incognita valutata ai nodi, l'apice e indica che la grandezza si riferisce all'elemento ed il pedice i (che può variare tra 1 ed r , con r numero totale dei nodi di un elemento) fa riferimento al nodo i -esimo. La matrice \mathbf{N}^e è una matrice riga di dimensioni $1 \times r$, data dalla funzione dell'elemento.

Inoltre, deve accadere che :

$$u(x_i) \cong \tilde{u}^e(x_i^e) = u_i^e$$

che implica

$$N_i^e(x_i^e) = 1$$

$$N_j^e(x_j^e) = 0 \quad \text{per } j \neq i$$

dove x_i sono le ascisse dei nodi dell'elemento.

Per ottenere un andamento costante dell'incognita all'interno dell'elemento, le funzioni di forma devono rispettare la seguente condizione:

$$\sum N_i^e(x) = 1.$$

2.4 Simulazioni in ambiente confinato (cella)

E' stato sviluppato un modello matematico per conoscere l'andamento dei prodotti di combustione all'interno di una cella di assorbimento. L'utilizzo di quest'ultima è importante per creare un ambiente uniforme e controllato dove il fumo può diffondere senza essere influenzato da perturbazioni esterne.

Le simulazioni sono state sviluppate mediante Comsol Multiphysics, software che utilizza il metodo degli elementi finiti per la soluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali [15, 16, 17].

L'equazione di partenza è la seguente [15]

$$d_a \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - \nabla(c \nabla \bar{q}) = R - \bar{u} \nabla \bar{q} \quad (2.1)$$

dove \bar{q} rappresenta la concentrazione del fumo, c è il coefficiente di diffusione, R è il tasso di reazione, e \bar{u} il vettore della velocità.

Per eseguire le simulazioni abbiamo utilizzato come composizione dei prodotti della combustione quella descritta nel capitolo precedente.

Definiti i prodotti di combustione e i dati geometrici del problema, viene generata automaticamente una maglia iniziale ad elementi finiti (mesh) per la triangolarizzazione del dominio. Questa maglia viene utilizzata per la discretizzazione del problema delle PDE e può essere modificata per migliorare l'esattezza dei risultati. La geometria, il PDEs

e le mesh sono definiti da un insieme di campi, simile alla struttura nel linguaggio C. Un'interfaccia grafica facilita l'input di questi dati. Il risultato di una buona simulazione dipende da molti fattori, tra i quali troviamo la dimensione del dominio ed il tipo di mesh scelta.

In particolare, in questo lavoro si è visto come la soluzione sia indipendente dal numero di elementi che compongono la mesh, a patto di superare un certo valore di soglia. A questo scopo tutte le simulazione sono state effettuate utilizzando diverse griglie con un numero differente di mesh. In figura 2.1 riportiamo la griglia di calcolo utilizzata nelle nostre simulazioni.

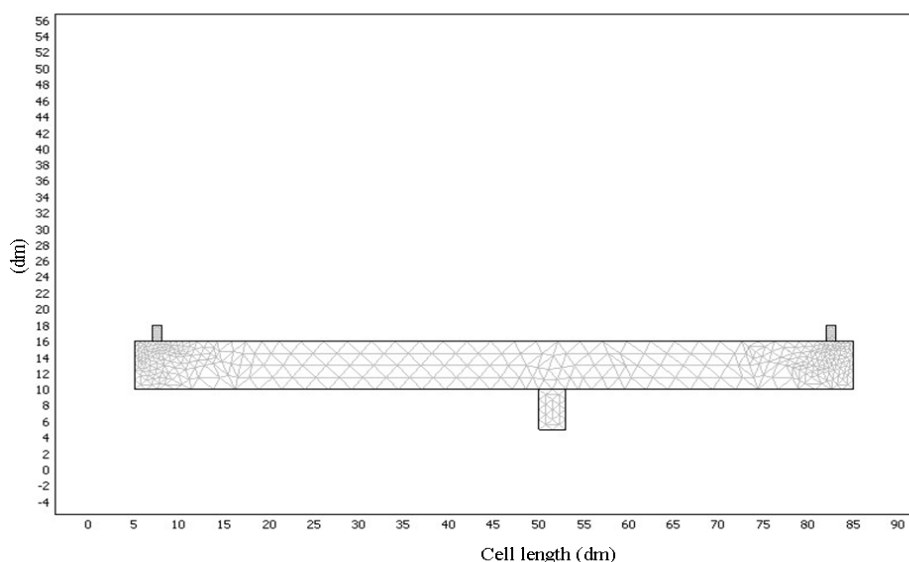


Figura 2.1 – Griglia di calcolo

Essa rappresenta, in scala, la cella di assorbimento appositamente realizzata per effettuare misure del coefficiente di retrodiffusione da fumo. Poiché questo coefficiente è specifico per ciascuna sostanza bruciata alle diverse lunghezze d'onda utilizzate, è chiaro come la messa a punto di un sistema di rivelazione di incendi boschivi in atmosfera passi inevitabilmente dalla misura di questo coefficiente.

La cella utilizzata è lunga circa 0.80 m, è di forma cilindrica con un diametro pari a 60 cm e presenta, all'ascissa di 0.53 m, un camino di ingresso per il fumo con diametro pari a 30

cm e due camini più piccoli alle due estremità per consentire il deflusso del fumo (poniamo l'attenzione sulla differenza di orientazione dell'asse x rispetto alla cella di misura sperimentale il cui camino si trova a 0.30 m). Per risolvere l'equazione differenziale, che descrive il nostro problema è stato necessario fissare delle condizioni al contorno. Nel nostro caso, quindi, sono state settate le condizioni sui 16 contorni che compongono la cella di misura come chiaramente indicato in figura 2.2.

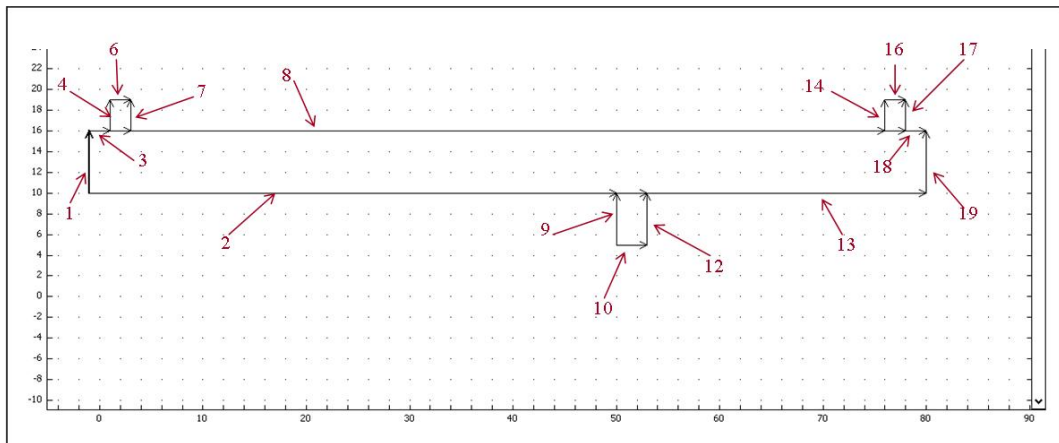


Figura 2.2 – Condizioni al contorno

Condizioni al contorno	Segmenti
Concentrazione $q_0=1$	10
Concentrazione $q_0=0$	6 - 16
Isolamento/simmetria	Altri segmenti

Tabella 2.1 – Parametri di inizializzazione

Parametri	Simboli	Valori
Coefficiente di diffusione	c	0.1
Rate di reazione	R	0.0
velocità	u	0.0 1.0

Tabella 2.2 – Parametri di inizializzazione

I valori impostati sono riportati nelle tabelle che seguono, dalle quali è possibile vedere che le condizioni al contorno che ci consentono di risolvere correttamente la nostra

equazione di convezione-diffusione riguardano la condizione di scorrimento sulle pareti della cella ed il valore della concentrazione dei prodotti di combustione in ingresso ed in uscita dalla cella stessa.

Il modello ideale del fumo per gli scopi preposti, considererebbe tantissimi variabili e parametri legati al processo di combustione, alla tipologia della vegetazione, all'orografia ed al clima. In queste simulazioni abbiamo utilizzato un modello abbastanza semplificato che da un lato ci ha permesso di ottenere risultati realistici e dall'altro ha reso accettabile il tempo di calcolo necessario al calcolatore per effettuare le simulazioni stesse.

Il risultato delle simulazioni è riportato in figura 2.3, che mostra l'andamento dei prodotti di combustione all'interno della cella. Come era facilmente prevedibile, la concentrazione maggiore (indicata dal colore rosso) si ha in corrispondenza dell'asse centrale del camino di immissione dei fumi.

La figura successiva (fig. 2.4) rappresenta la distribuzione dei prodotti ottenuti dalla combustione di materiale vegetale lungo l'asse della cella stessa.

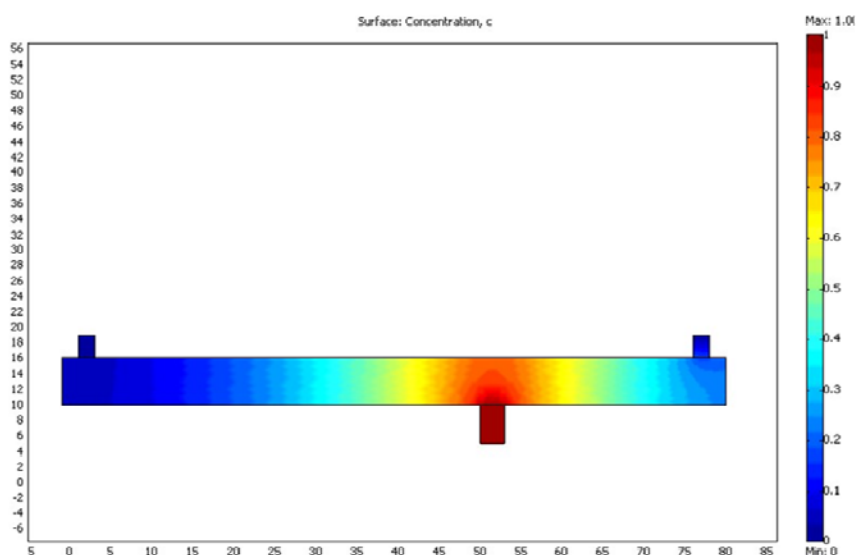


Figura 2.3 – Distribuzione dei prodotti della combustione in cella

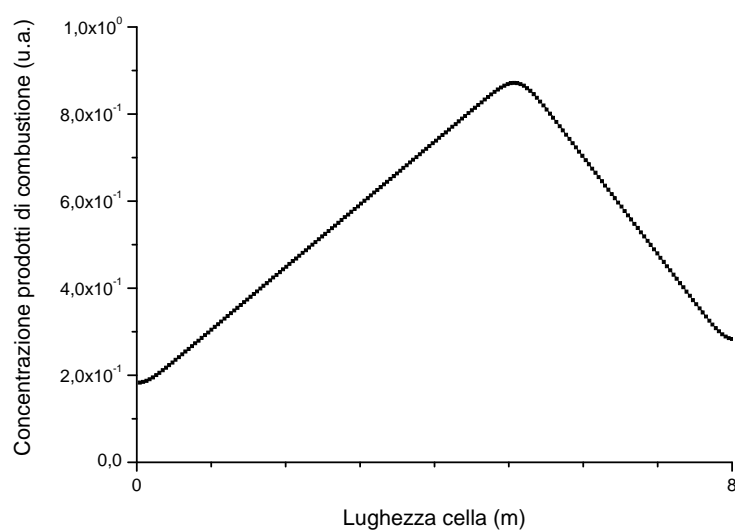


Figura 2.4 – Simulazione dell'andamento dei prodotti di combustione lungo l'asse centrale della cella.

2.5 Misure sperimentali in cella

Come detto in precedenza, la progettazione di un sistema di rivelazione di incendi boschivi efficace si basa sulla conoscenza delle proprietà ottiche e termiche dei prodotti emessi durante la combustione dei diversi materiali vegetali. Di fondamentale importanza è la conoscenza del coefficiente di retrodiffusione da fumo alle diverse lunghezze d'onda e per ogni combustibile vegetale utilizzato. Infatti senza questa informazione sarebbe impossibile effettuare misure della variazione di densità di particolato, dovuto ad un incendio boschivo, in atmosfera.

A questo scopo sono state condotte una serie di misure sperimentali in ambiente confinato (cella) utilizzando due sorgenti laser : un Nd:YAG operante alle tre lunghezze d'onda tipiche (fondamentale, seconda e terza armonica) ed una laser a CO₂ che lavora tra i 9-11 μm . e diverse tipologie di combustibile vegetale.

La cella di misura è stata dimensionata in modo tale che, posta alla distanza di circa di 60m possa contenere completamente i fasci delle due sorgenti laser e i campi di vista dei sistemi ottici di ricezione degli echi lidar. Per il dimensionamento della cella è stato necessario tenere conto della divergenza del laser TEA CO₂ poiché è quella predominante tra le due sorgenti. Essa, infatti, è pari a 0,77 mrad (mezzo angolo), questo implica che il

diametro del fascio laser a 60 m di distanza della sorgente è di circa 6,5 cm. Questo valore risulta essere minore delle dimensioni del campo di vista dell'ottica di raccolta del segnale alla stessa distanza.

Il telescopio, utilizzato nella stazione Lidar per le misure nella regione spettrale dell'infrarosso, ha un campo di vista di 0.88 mrad ed un primario di 40 cm di diametro. Partendo da queste considerazioni possiamo calcolare il campo di vista alla distanza di 60m che risulta essere pari a 50 cm. Nell'ipotesi che si vogliano fare misure pari ad un cella unitaria è necessario tenere conto delle distribuzioni temporali dell'impulso laser. Risulta quindi indispensabile determinare la risoluzione spaziale effettiva del sistema Lidar usato.

La cella di range investigata, cioè l'intervallo minimo di distanza indagata ad un istante t , è determinata essenzialmente dalla durata dell'impulso laser τ_L , che risulta pari a $c \cdot \tau_L / 2$ [2]. L'informazione che si ottiene sulla concentrazione della sostanza in esame è relativa all'intera cella di lunghezza $c \cdot \tau_L / 2$. C'è da considerare comunque che la risoluzione spaziale è limitata sia dal tempo di risposta dell'elettronica di ricezione, che dal rivelatore. Sapendo, quindi, che il tempo di integrazione, τ_d , del detector utilizzato, è di circa 8 ns essa potrebbe considerarsi pari a $c \cdot \tau_d / 2 = 1.2 \text{ m}$, che è un valore buono per una prima campagna di misure. In realtà considerando che l'impulso della sorgente laser è pari a 100 ns, la risoluzione spaziale del sistema risulta essere pari a 15 m.

A questo punto abbiamo definito le dimensioni della cella di misura pari a circa la metà della cella unitaria per il campo di vista del telescopio, che tradotto in lunghezze risulta pari a 8 m con un diametro di circa 70 cm. Questo valore è concorde con la dimensioni dell'impulso laser. La cella di misura infatti è attraversata due volte dall'impulso prima di essere rivelata, quindi, il cammino ottico della luce in questo caso risulta essere di circa 16 m valore superiore alla cella minima rilevabile pari a 15 m. Per la radiazione emessa dalla sorgente laser Nd:YAG siamo sicuramente all'interno di questi valori. L'impulso laser, infatti avendo una larghezza temporale pari a 5 ns ha un valore minimo di cella pari a 0.75 m.

Le dimensioni e le caratteristiche della cella sono riportate in tabella 2.3, mentre in figura 2.5 è possibile vedere la cella realizzata (con un particolare del camino di ingresso dei fumi) posizionata davanti i laboratori del CRATI s.c.r.l. a Lamezia Terme.



Figura 2.5 – Cella sperimentale con particolare del camino d’ingresso.

	Cella di misura	Camino di ingresso	Camini di uscita
Materiale	alluminio	alluminio	Alluminio
Diametro	60 cm	29 cm	8 cm
Lunghezza	860 cm	50 cm distanza centro camino - bordo cella =328 cm	14 cm distanza dal centro all'estremità della cella = 12cm
Finestre ottiche	60 cm	60 cm	

Tabella 2.3 – Caratteristiche della cella sperimentale

2.5.1 Calcolo del coefficiente di retrodiffusione

Viene di seguito discussa tale metodologia di elaborazione dei segnali lidar in modo indipendente dalla lunghezza d’onda.

Consideriamo due echi lidar descritti dall'equazione 1.1 e definiamo (P_{off}) la potenza rivelata a cella vuota, e indichiamo con (P_{on}) la potenza rivelata nel caso in cui nella cella risulta piena di fumo.

Dal rapporto di due segnali lidar corrispondenti alla potenza rivelata rispettivamente a cella vuota (P_{off}) ed a cella piena (P_{on}) è possibile determinare il coefficiente di retrodiffusione del fumo prodotto dall'incendio simulato nella cella sperimentale.

Quindi, dal rapporto delle due potenze rivelate, si ha:

$$\frac{P_{off}}{P_{on}} = \frac{\alpha \cdot \beta_{off} \cdot T_{off}^2}{\alpha \cdot \beta_{on} \cdot T_{on}^2} \quad (2.2)$$

dove β_{off} rappresenta il coefficiente di backscattering a cella vuota e β_{on} quello a cella piena.

Il coefficiente di retrodiffusione β_{on} è costituito essenzialmente da due termini un coefficiente di backscattering dovuto al solo contributo in condizioni di cella vuota β_{off} , ed un coefficiente di backscattering dovuto alla presenza di fumo nella cella (β_f) che traduciamo nella relazione:

$$\beta_{on} = \beta_{off} + \beta_f \quad (2.3)$$

Andando a sostituire questa espressione nell'equazione precedente ed elidendo dalla stessa i parametri costanti che compaiono sia al numeratore che al denominatore, troviamo che:

$$\frac{1}{k} \cdot \frac{P_{off}}{P_{on}} = \frac{\beta_{off}}{\beta_{off} + \beta_f} \quad (2.4)$$

con $k = \frac{T_{off}^2}{T_{on}^2}$ coefficiente di trasmissione. Questo valore è stato calcolato in via sperimentale come ampiamente descritto precedentemente.

Invertendo questa espressione è possibile ricavare l'equazione che consente di conoscere il valore del coefficiente di backscattering del fumo:

$$\beta_f = \beta_{off} \cdot \left(k \cdot \frac{P_{on}}{P_{off}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

il coefficiente di backscattering a cella vuota (β_{off}) sono stati calcolati utilizzando un codice di simulazione standard FASCODE 3P (FAST ATMOSPHERIC SIGNATURE CODE), unito al data base HITRAN 92 di trasmissione e assorbimento molecolare, concordanti con quelli già presenti in letteratura [18, 19]. Tale codice simula il propagarsi in atmosfera di una radiazione elettro-magnetica e ci permette di ottenere informazioni sulla sua trasmissione spettrale, la sua radianza e la sua profondità ottica.

Procedendo con l'elaborazione dei dati lidar acquisiti con la metodologia indicata è stato necessario sviluppare un dedicato codice di calcolo in ambiente MATLAB.

La progettazione dell'algoritmo ha fornito un duplice vantaggio:

- standardizzare la procedura di conversione preliminare dei dati
- standardizzare il processo di calcolo e di elaborazione dei dati
- ridurre i tempi dell'elaborazione stessa visto l'elevato numero di acquisizioni effettuate durante la campagna di misure.

Il programma legge i dati in formato digitale, delle due curve corrispondenti all'acquisizione dei due segnali lidar a cella vuota ed a cella piena, ed in base ai valori di set-up della strumentazione adoperata, effettua la conversione da numero di acquisizioni per bit in secondi per volts come segue:

- sulla scala verticale (con livelli digitali pari a 28) secondo la relazione $(curva_digit - offset) \cdot dV$, in Volt.
- sulla scala orizzontale, espressa in campionamenti, questi vengono convertiti in tempi. Considerando, infatti, che il numero di campionamenti è il campione

ennesimo in cui il segnale viene discretizzato, se viene moltiplicato per l'incremento temporale Δt , tempo in cui i campioni vengono acquisiti, diventa anch'esso un tempo [20].

Una volta eseguita la conversione il programma calcola la media dei segnali e l'errore ad essa associato (deviazione standard). A questo punto viene fatto il rapporto della media dei due segnali lidar, rispettivamente, a cella piena ed a cella vuota e moltiplicato per il valore della trasparenza calcolato sempre dai dati sperimentali acquisiti tramite una subroutine.

Il valore ottenuto viene moltiplicato per il coefficiente di backscattering atmosferico, inserito da tastiera dopo essere stato stimato tramite il software FASCODE. E' così possibile conoscere l'andamento del coefficiente di backscattering da fumo all'interno della cella in base all'equazione 3.4.

2.5.2 Risultati sperimentali

L'obiettivo di queste prime misure sperimentali è quello di simulare in campo ma in ambiente confinato il processo di combustione di alcuni materiali vegetali e misurare, con i prototipi delle stazioni Lidar nell'IR e nel visibile, alcuni parametri ottici che caratterizzano i fumi generati e la variazione d'umidità relativa prodotta nelle varie fasi di combustione.

I materiali vegetali sono stati selezionati con quantitativi di umidità relativa in peso diversi tra loro, in particolare, con il 70% e il 50% [11, 13, 21]. Questa scelta è stata dettata per effettuare una valutazione dei limiti di sensibilità dei nostri sistemi lidar in termini di concentrazione minima di vapor d'acqua da essi rivelabile.

La quantità di materiale adoperata per la combustione indotta è pari a 10 grammi per ogni sostanza scelta. Questo ha permesso di valutare, con la misura del tempo impiegato dal materiale nel bruciare completamente (completa combustione), il rate di combustione [13, 21].

Le misure sono state eseguite utilizzando come combustibile vegetale due diverse tipologie di sostanze: agrumi ed eucalipto. La scelta di queste sostanze è dovuta al fatto che esse sono presenti in grande quantità in Calabria regione devastata ogni anno da un elevato numero di incendi boschivi. Si pensi che dal 1 gennaio 2008 al 25 agosto 2008 sono stati individuati 584, su un totale di 3788 incendi verificatesi nello stesso periodo in tutta Italia, “regalando” alla Calabria il primato di regione “più calda” [22].

Gli esperimenti sono stati condotti nel periodo luglio-agosto presso i laboratori del CRATI s.c.r.l. di Lamezia Terme.

Per la sorgente laser TEA CO₂, le righe spettrali scelte sono state la 10R18 e la 10R20, poiché queste sono generalmente utilizzate per eseguire misure di profili di acqua mediante la tecnica Dial in atmosfera [23, 24]. Questa scelta è stata fatta per proseguire nell’idea di poter eseguire, in caso di un segnale d’incendio, una seconda misura dei profili di acqua per minimizzare i falsi allarmi [25, 26].

Per eliminare il rumore di fondo, e le fluttuazione legate al sistema stesso, all’algoritmo di elaborazione è stato imposto di effettuare una media su 30 segnali lidar così da poter valutare l’errore statisticamente.

I risultati raggiunti sono descritti nella tabella di seguito:

Sostanza bruciata	Tempo impiegato per la combustione completa [s]	Riga Spettrale	$\beta_{\text{fumo}} [\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}]$	$\Delta\beta_{\text{fumo}} [\%]$
<i>Agrumi</i>	122	10R18	5.862×10^{-6}	15
	142	10R20	6.048×10^{-6}	15
<i>Eucaliptus</i>	61	10R18	5.762×10^{-6}	18
	60	10R20	6.123×10^{-6}	17

Tabella 2.4 – Coefficiente di retrodiffusione in presenza del fumo in cella prodotto bruciando materiale vegetale utilizzando la sorgente laser a CO₂

Allo stesso modo è stata effettuata l'analisi dei dati acquisiti dal dimostratore mobile nel visibile.

Nel caso della sorgente laser a stato solido Nd:YAG sono state eseguite misure utilizzando le tre lunghezze d'onda 355 nm, 532 nm, 1064 nm per ogni tipo di materiale vegetale preso in esame. La media è stata effettuata su 100 echi lidar così da poter valutare l'errore statisticamente, che risulta essere pari, rispettivamente, al 10%, 15% ed al 16%.

Poiché le dimensioni della cella minima di misura (0.75 m) sono inferiori alla lunghezza della cella sperimentale (8.60 m) è possibile avere una risoluzione spaziale e, quindi, un profilo del coefficiente di retrodiffusione del fumo.

Sono, di seguito, mostrati i risultati più significativi ottenuti per ciascuna delle tre sostanze bruciate (fig. 2.6, 2.7 e 2.8), sull'asse delle ordinate è possibile leggere il valore del coefficiente di backscattering in presenza del fumo durante l'esperimento, misurato in m⁻¹, mentre sulle ascisse è riportata la distanza in m il cui zero coincide con la finestra d'ingresso della cella sperimentale.

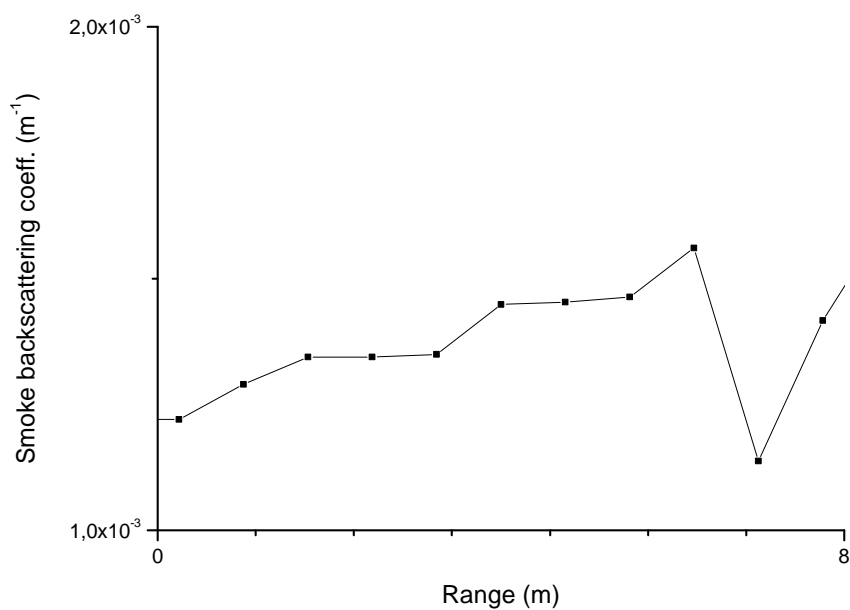


Figura 2.6 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all'interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d'onda utilizzata 1064 nm.

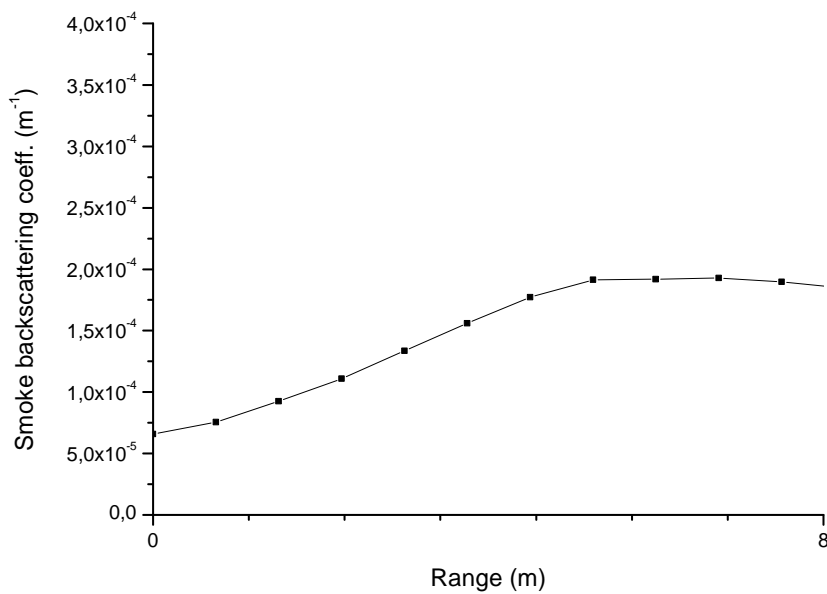


Figura 2.7 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all'interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d'onda utilizzata 532 nm.

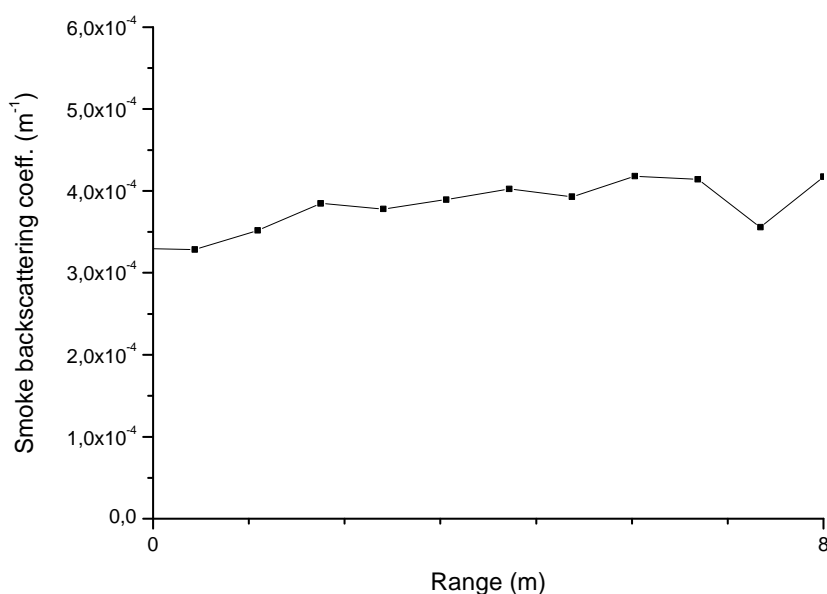


Figura 2.8 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione dovuto al fumo all’interno della cella. Materiale bruciato: eucalipto, lunghezza d’onda utilizzata 355 nm.

	Coefficiente di retrodiffusione del fumo [m ⁻¹ sr ⁻¹]		
	$\lambda = 1064nm$	$\lambda = 532nm$	$\lambda = 355nm$
<i>Eucalyptus</i>	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.36 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$
<i>Agrumi</i>	$3.08 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-4}$	$3.19 \cdot 10^{-4}$

Tabella 2.5 – Valori medi del coefficiente di retrodiffusione per i due tipi di combustibile vegetale.

Analizzando i risultati ottenuti, alle varie lunghezze d’onda laser, notiamo che in corrispondenza dell’intervallo compreso tra i due e i quattro metri sull’asse delle ascisse i valori del coefficiente di backscattering risultano essere sempre maggiori rispetto ai valori che incontriamo nel primo metro e negli ultimi metri della cella. Questo fenomeno è spiegabile se consideriamo che, nelle prime fasi del processo di combustione e precisamente nella fase di smoldering, dove la combustione procede senza una fiamma visibile, e in quella finale ardente, dove predomina l’ossidazione delle superfici solide, si

ha una maggiore concentrazione di fumo proprio in corrispondenza del camino della cella (circa 3 metri dall'origine degli assi). Il propagarsi del fumo è condizionato dalla geometria stessa della cella. Ricordiamo che la cella sperimentale è fornita di due comignoli dai quali il fumo è costretto a fuoriuscire, e, di conseguenza, lo scattering che si osserva in prossimità delle sue parti terminali, risulta essere minore rispetto a quello proveniente dalla parte in corrispondenza del camino, dove si osserva la massima presenza del fumo durante la simulazione dell'incendio.

Confrontando i risultati sperimentali ottenuti utilizzando le due sorgenti laser si nota subito che i valori assoluti dei coefficienti di backscattering relativi alla radiazione emessa dalla sorgente Nd:YAG (tabella 2.5) sono circa di due ordini di grandezza superiori rispetto a quelli misurati mediante l'uso della sorgente laser a CO₂.

Questo è essenzialmente dovuto ad una miglior efficienza di scattering alle lunghezze d'onda più corte del particolato. Inoltre, ricordiamo che i dati della sorgente laser Nd:YAG hanno una risoluzione spaziale molto più elevata, poiché la larghezza dell'impulso di questa sorgente laser è di circa 2 ordini di grandezza inferiore rispetto a quella della sorgente CO₂. I valori dei coefficienti di backscattering misurati con entrambe le sorgenti risultano in accordo ai valori degli stessi presenti in letteratura [7, 8, 9, 19, 27, 28, 29].

Le misure ottenute per le due sorgenti mostrano la capacità di poter rilevare la radiazione retrodiffusa, dovuta alla variazione di particolato emesso, in un fenomeno di incendio boschivo avvalorando il nostro proposito di ricerca.

Utilizzando i nostri sistemi Lidar/Dial abbiamo dimostrato la possibilità di valutare precocemente la presenza di un incendio boschivo determinando la variazione del valore del coefficiente di retrodiffusione dovuto alla presenza del fumo che risulta essere due ordini di grandezza superiore rispetto ai valori standard presenti in atmosfera [30, 31, 32, 33].

2.5.3 Confronto risultati sperimentali e simulazioni

I dati sperimentali e le simulazioni dell'evoluzione della distribuzione del fumo all'interno della cella sembrano in buon accordo con i profili ottenuti dalle misure (cfr. figura 2.9 e figura 2.10); queste ultime sono state, quindi, utilizzate per potenziare il modello matematico che descrive l'evoluzione del pennacchio di fumo in atmosfera.

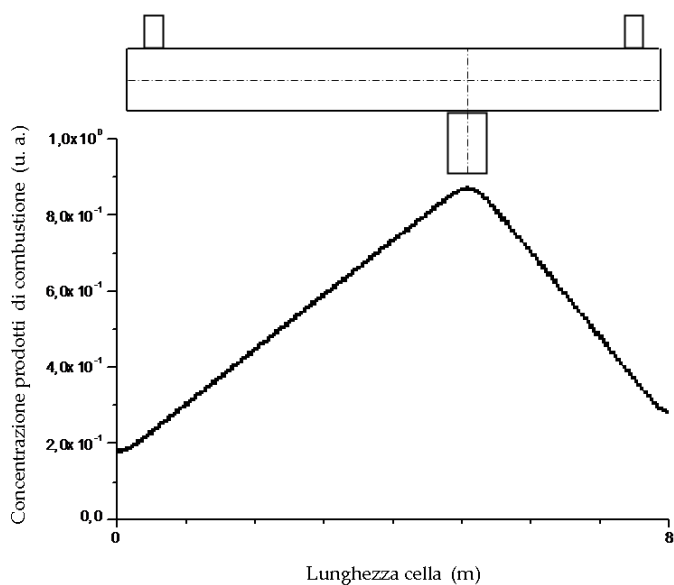


Figura 2.9 – Simulazione dell'andamento sei prodotti di combustione all'interno della cella lungo l'asse centrale.

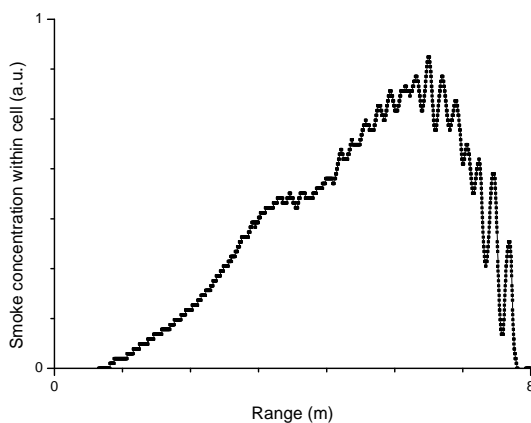


Figura 2.10 – Andamento della concentrazione dei prodotti di combustione all'interno della cella.

2.6 Calcolo della concentrazione del vapore acqueo

Il secondo obiettivo perseguito in questa fase preliminare del lavoro di ricerca, è stato quello di riuscire a rivelare la presenza di un incendio boschivo nella fase di pre-ignizione, fase in cui si ha una graduale variazione dell'umidità e l'inizio del processo di pirolisi. L'idea cardine è quella di valutare la variazione di concentrazione di vapore acqueo in atmosfera dovuta alla presenza di un processo di combustione. Sono state, quindi, eseguite misure della variazione di concentrazione del vapore acqueo nella cella sperimentale, per diverse tipologie di combustibile vegetale utilizzando la stazione fissa Lidar/Dial presso i laboratori del CRATI s.c.r.l. con la sorgente laser TEA CO₂.

Le righe utilizzate sono state la 10R20 e la 10R18, rispettivamente di assorbimento (on) e di non assorbimento (off), della molecola dell'acqua, con lunghezze d'onda pari a $\lambda_{on} = 10.247 \mu\text{m}$ e $\lambda_{off} = 10.260 \mu\text{m}$. Sono stati acquisiti 30 impulsi per ogni riga. La sorgente adoperata emette nella regione spettrale del lontano infrarosso e soddisfa le condizioni di eye-safe.

Nella prima fase di analisi è stata valutata la concentrazione del vapore acqueo nella cella sperimentale, partendo dall'equazione Dial ed assumendo un'atmosfera omogenea lungo il cammino orizzontale che percorre il fascio laser. E' possibile così calcolare la concentrazione di vapor d'acqua in funzione della lunghezza del percorso come [34]:

$$CL = \frac{\ln\left(\frac{P_{off}}{P_{on}}\right)}{2 \cdot (K_{on} - K_{off})} + \frac{\ln\left(\frac{\beta_{on}}{\beta_{off}}\right)}{2 \cdot (k_{on} - k_{off})} + \frac{(\alpha_{off}^a - \alpha_{on}^a) \cdot L}{k_{on} - k_{off}} + \frac{\sum_{i>1} (k_{off}^i - k_{on}^i) \cdot C_i L}{k_{on} - k_{off}} \quad (2.6)$$

dove P_{on} e P_{off} rappresentano la potenza del laser alle due lunghezze d'onda, K_{on} e K_{off} sono i coefficienti di assorbimento della molecole d'acqua rispettivamente alle lunghezze d'onda 10R20 e 10R18, β_{on} e β_{off} i coefficienti di retrodiffusione, α_{on} e α_{off} i valori del coefficiente di estinzione volumetrico ed L la lunghezza del cammino ottico.

Solitamente per le lunghezze d'onda dell'IR si assumono essere trascurabili gli effetti dovuti alla retrodiffusione differenziale (secondo termine), all'attenuazione differenziale

(terzo termine) e quelli relativi alla presenza di altri gas presenti lungo il cammino ottico (quarto termine). Poiché dalle misure effettuate si è visto che il valore del coefficiente di retrodiffusione da fumo è diverso per le due lunghezze d'onda così come lo è quello atmosferico, si è deciso di andare a determinare l'errore commesso nella stima della concentrazione del vapore acqueo, trascurando il secondo termine dell'equazione precedente, ovvero considerando uguali i due coefficienti β_{on} e β_{off} .

Da queste considerazioni la concentrazione del vapore acqueo risulta essere:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{P_{off}}{P_{on}}\right)}{2 \cdot (K_{on} - K_{off}) \cdot R_T} + \Delta(C) \quad (2.7)$$

$$\Delta(C) = \frac{\ln\left(\frac{\beta_{on}}{\beta_{off}}\right)}{2 \cdot (k_{on} - k_{off}) \cdot R_T} \quad (2.8)$$

dove R_T è la distanza tra la sorgente laser ed il target topografico, mentre i valori dei due coefficienti di backscattering alle due lunghezze d'onda sono dati da:

$$\begin{aligned} \beta_{on} &= \beta_{atm}^{on} + \beta_f^{on} \\ \beta_{off} &= \beta_{atm}^{off} + \beta_f^{off} \end{aligned} \quad (2.9)$$

I valori dei coefficienti differenziali di assorbimento delle righe laser on e off sono stati presi dalla letteratura [34], e risultano essere pari a:

1. riga 10R20: $K_{on} = 8.59 \times 10^{-4} [\text{atm}^{-1} \text{cm}^{-1}]$
2. riga 10R18: $K_{off} = 7.22 \times 10^{-5} [\text{atm}^{-1} \text{cm}^{-1}]$

Nella tabella che segue, sono stati riportati i valori della concentrazione di acqua misurata per i diversi combustibili vegetali, nonché l'errore commesso per la loro stima [34].

Sostanza	Concentrazione (ppm)	$\Delta(C)$ (ppm)
Agrumi	17765	2550
Eucaliptus	18038	6063

Tabella 2.6 – Concentrazione vapore acqueo.

A questo punto, sulla base dei dati forniti dalla centralina meteo, è possibile calcolare l'incremento della concentrazione di acqua dovuto alla combustione di 10 grammi di materiale vegetale.

Per le nostre giornate di misura, la centralina ha misurato un valore della umidità relativa pari a 55% ad una temperatura di 31°C, ed utilizzando il diagramma psicrometrico (fig. 2.11) si ricava una concentrazione di vapore acqueo presente pari a circa 15000 ppm. Quindi, la combustione di materiale vegetale ha prodotto un incremento di 2765 ppm per gli agrumi e di 3038 ppm per l'eucalipto.

Nell'uso del vapor d'acqua come tracciante per la rivelazione di incendi boschivi e la riduzione dei falsi allarmi [30] è necessario evidenziare l'incremento di acqua.

Nei risultati mostrati risulta che l'incremento di acqua ottenuto dalla combustione in cella di materiale vegetale è dello stesso ordine di grandezza dell'approssimazione del secondo ordine che considera i due coefficienti di retrodiffusione on ed off in presenza di fumo diversi. Va sottolineato che i due coefficienti sono stati ottenuti con la diffusione all'interno della cella di una quantità di fumo emesso dalla combustione di soli 10 grammi di materiale vegetale con un rate pari a 10 gr/ minuto.

A questo punto, sono state eseguite, nuove misure incrementando la quantità di combustibile vegetale di un fattore 10, ottenendo come risultato un incremento della concentrazione di vapore acqueo maggiore del doppio, e quindi notevolmente superiore

all'errore commesso trascurando gli effetti della retrodiffusione differenziale nell'equazione 2.6.

Poiché in condizioni reali il rate di combustione risulta essere notevolmente maggiore a quello ottenuto durante i nostri test, e di conseguenza l'incremento della concentrazione di acqua ad esso connesso, è possibile rivelare la presenza di fumo in atmosfera semplicemente con il rapporto dei due segnali lidar alle due lunghezze d'onda on ed off rimanendo in prima approssimazione.

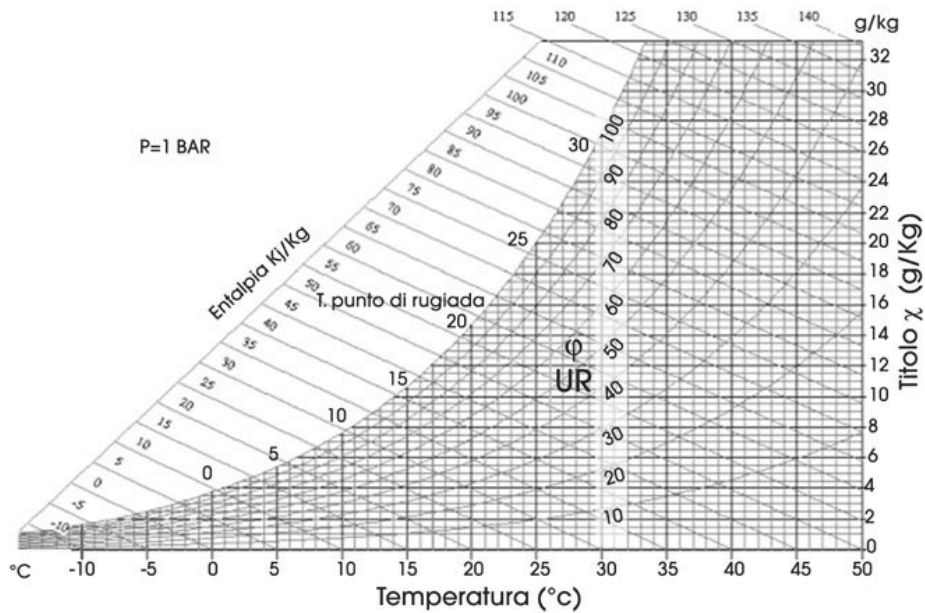


Figura 2.11 – Diagramma psicrometrico.

Capitolo 3.

Set-up del sistema sperimentale (SAI)

3.1 Introduzione

Il sistema Lidar SAI (sistema per l'allerta precoce degli incendi boschivi) è stato interamente progettato e assemblato presso il laboratorio di ricerca di Elettronica quantistica e plasmi dell'Università di Tor Vergata in collaborazione con i laboratori del Crati s.c.r.l di Lamezia Terme, nell'ambito del contratto di ricerca industriale SAI (Sistema Allerta Incendi) finanziato dal Miur (n. 7979/DSPAR/2002-DM 593/2000 art. 5).

Il Lidar SAI presenta uno schema costruttivo monostatico e biassiale ed è costituito essenzialmente da una sorgente Laser, un sistema di ricezione ottica, un rivelatore e da un sistema di acquisizione. Tutte queste componenti sono posizionate all'interno di un carrello.

L'apparato è dotato di un sistema di movimentazione a controllo remoto con motori passo-passo, che permettono la rotazione solidale del laser e dei dispositivi di ricezione attorno ad un asse centrale, nonché la loro inclinazione a qualsiasi angolo azimutale permettendo così la realizzazione di scansioni atmosferiche a due ed a tre dimensioni.

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

3.2 Sorgente Laser

La sorgente di radiazione utilizzata è un laser a stato solido Nd:YAG [35] Q – Switched, Questa sorgente emette radiazione con lunghezza d'onda pari a 1064 nm (armonica fondamentale), utilizzata per il pompaggio di cristalli non lineari che, tramite processi non lineari di seconda e terza armonica , forniscono in uscita radiazione laser con lunghezza d'onda rispettivamente pari a 532 nm e 355 nm.

Le specifiche di maggior interesse sono riportate nella tabella seguente:

Energia di impulso E_0 (1064 nm)	360 mJ
Energia di impulso E_0 (532 nm)	180 mJ
Energia di impulso E_0 (355 nm)	120 mJ
Durata dell'impulso τ (355 nm)	4 ns
Durata dell'impulso τ (1064-532 nm)	5 ns
Divergenza del fascio 2θ	0.5 mrad
Frequenza di sparo γ	10 Hz
Diametro del fascio $2W_0$	(5.00 ± 0.02) mm

Tabella 3.1 – Caratteristiche della sorgente Laser Nd:YAG

3.3 Sistema di ricezione

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 Newtoniana in cui sono presenti due specchi: il primario che ha la sezione parabolica e il secondario che è piano.

Questi sono sistemati all'interno di un tubo di materiale leggero lungo (1000 ± 1) mm (esternamente) e largo (255 ± 1) mm (esternamente).

In figura 3.1 è riportato lo schema della configurazione del sistema di ricezione:

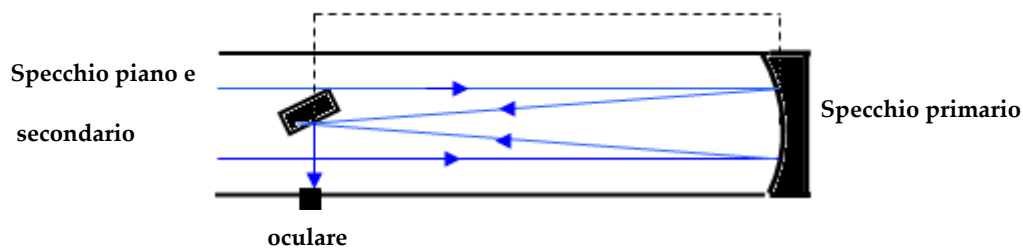


Figura 3.1 – Configurazione Newtoniana del sistema di ricezione

Nella tabella sottostante vengono riportate le principali caratteristiche del telescopio:

Distanza tra i due specchi lungo l'asse ottico d	(820 ± 1) mm
Lunghezza focale nominale f	1030 mm
Diametro dello specchio primario $2r_p$	(210 ± 1) mm
Proiezione circolare dello specchio secondario sul piano ortogonale all'asse ottico $2r_b$	(35.00 ± 0.02) mm
Raggio interno del telescopio r_0	(120.0 ± 0.5) mm

Tabella 3.2 – Caratteristiche del sistema di ricezione

Il ricevitore, in quanto strumento ottico di raccolta della radiazione, possiede la proprietà definita come campo di vista (FOV) ; il quale è geometricamente costituito da un volume conico di angolo di metà apertura e raggio $r_t(R)$ con vertice sul ricevitore e corrisponde al luogo dei punti dello spazio individuati dal ricevitore stesso.

L'ottimale raccolta della radiazione elettromagnetica retrodiffusa si verifica quando il doppio dell'angolo del campo di vista è maggiore o uguale della divergenza del fascio laser [2, 36].

Questa condizione permette di dimensionare il diametro della superficie di ingresso della guida di luce che quindi costituisce lo stop di campo del sistema di ricezione.

L'angolo del FOV è dato dalla formula seguente:

$$\phi = \arctan\left(\frac{r_D}{f}\right) \quad (3.1)$$

dove r_D è il raggio d'apertura minimo della superficie della guida.

Deve essere pertanto:

$$2\phi \geq 2\theta \quad (3.2)$$

e sostituendo la (3.1) al primo membro della (3.2) si ha:

$$2 \arctan\left(\frac{r_D}{f}\right) \geq 2\vartheta \quad (3.3)$$

$$d_D = 2r_D \geq 2f \tan \vartheta \quad (3.4)$$

dove d_D è il diametro dell'apertura minima della guida. Sostituendo i valori numerici al secondo membro della (3.4) deriva che il diametro dello stop di campo deve avere un valore non inferiore a 515 μm affinché il campo di vista del ricevitore e la divergenza del fascio laser coincidano.

A questo punto è possibile calcolare il raggio del FOV utilizzando la seguente equazione [35, 37, 38].

$$r_T(R) = r_0 + R \tan \phi = r_0 + R \frac{r_D}{f} = r_0 + R \frac{d_D}{2f} \quad (3.5)$$

La superficie di ingresso della guida di luce utilizzata, montata su una ghiera regolabile per consentire di ottimizzare la raccolta della luce, ha un diametro di 5 mm; esistono pertanto ampi margini per il suo allineamento.

Le guide di luce scelte sono costituite da supporti semirigidi che le rendono più versatili e meno soggette a stress meccanico; al loro interno è presente un materiale liquido con una trasparenza ottimale alla lunghezza d'onda di interesse.

Le caratteristiche delle guide utilizzate sono riportate in tabella 3.3:

Serie	Produttore	banda (nm)	Trasmissività (%)	Lungh. (mm)	D (mm)	N.A.
2000	Lumatec	450-1700	70- 78	3000	5	62°
300	Lumatec	300 - 600	60 - 80	3000	5	72°
300 d.b.	Lumatec	300 - 600	60 - 80	3000	5 - 3	72°

Tabella 3.3 – Caratteristiche della guida di luce

La notevole divergenza della guida di luce (62° e 72° in funzione della tipologia impiegata) ha rappresentato un problema fondamentale da risolvere.

La superficie utile del sensore (di cui parleremo dettagliatamente nel prossimo paragrafo) è pari ad un cerchio di raggio 10 mm e pertanto avrebbe potuto ricevere tutta la radiazione direttamente dalla guida solo se fosse stata messa quasi a contatto con quest'ultima; ciò non è stato possibile in quanto il sensore è separato dall'esterno da una zona a temperatura e pressione controllate. E' quindi necessario che la radiazione attraversi questo volume convergendo verso l'area del sensore. La superficie d'uscita della guida è stata, quindi, accoppiata al sensore tramite un sistema ottico.

Il sistema è composto da due lenti separate da un filtro e da una serie di supporti ottici necessari per l'assemblaggio. Le caratteristiche delle lenti impiegate sono riportate nella seguente tabella 3.4:

Produttore	Modello	Materiale	Spess. (mm)	F. l. (mm)	Diam. (mm)
Edmund Optics	08076	F_silica	7	12,7	12,7
Edmund Optics	48034	F_silica	5.66	50	25.4

Tabella 3.4 – Caratteristiche dei filtri.

Il filtro è posto subito dopo la prima lente (nel verso di propagazione della radiazione) in quanto è la zona dove i raggi hanno l'angolo minore rispetto alla normale alla superficie della stessa, avvicinandosi in tal modo all'utilizzo ottimale.

La scelta delle lenti, la relativa configurazione ed il posizionamento del filtro sono stati compiuti per mezzo del software di progettazione ottica ZEMAX. Il software ha permesso di confrontare le prestazioni di numerosi sistemi ottici costruiti con coppie di lenti commerciali presenti nel database, permettendo, quindi, la scelta del sistema migliore.

Per valutare le prestazioni del sistema devono essere analizzate le principali caratteristiche che determinano una perdita di energia:

- il coefficiente di trasmissione delle lenti alla lunghezza d'onda di interesse;
- la perdita di energia per dispersione ("vignetting") dovuta alla notevole divergenza dei raggi in uscita dalla guida;
- la frazione della radiazione che non raggiunge effettivamente la superficie del sensore di 5 mm di diametro;
- la già citata trasmissività delle guide di luce;
- la trasmissività del filtro interferenziale alla frequenza d'interesse.

Complessivamente, per ciascuna delle due lunghezze d'onda, si ha una perdita di segnale determinato dal sistema ottico pari al 32% per 1064 nm e del 37% per 355 nm

3.4 Sistema di rivelazione

Il rivelatore utilizzato è un tubo fotomoltiplicatore (PMT) modello R3235 per l'ultravioletto, e R3236 per l'infrarosso vicino (HAMAMATSU).

Come è ben noto, i tubi fotomoltiplicatori convertono la potenza ricevuta in un segnale elettrico amplificandolo notevolmente. I fotoelettroni emessi dal fotocatodo sono, infatti, accelerati da un campo elettrico e collidono sul primo dinodo che produce un' emissione secondaria di elettroni.

Il processo di emissione-accelerazione-urto si ripete (in tempi brevissimi) per un numero di volte proporzionale al numero di dinodi di cui è fatto il PMT.

I fotoelettroni vengono, poi, raccolti dall'anodo .

Questo processo di moltiplicazione consente di osservare un'elevata corrente in uscita a fronte di una piccola corrente in ingresso, questo implica però anche una amplificazione del rumore.

Il segnale Lidar di ritorno è affetto, quindi, da un rumore associato alla strumentazione ottica dello stesso tubo fotomoltiplicatore. Il rumore può raggiungere valori tali da oscurare completamente il segnale.

Per valutare l'entità di questo effetto è necessario stimare il rapporto segnale-rumore (SNR), ovvero il rapporto tra il segnale desiderato e il rumore casuale[2, 28]:

$$SNR = \frac{I_s}{I_n} \quad (3.6)$$

dove:

- I_s è la corrente dovuta al segnale incidente sul rivelatore;
- I_n è la corrente dovuta al rumore totale

Il segnale di uscita dal catodo del fotomoltiplicatore include tre componenti [2, 28, 39]:

- la corrente dovuta all'energia della radiazione laser retrodiffusa data da

$$I_s = \frac{P_s \eta \lambda e}{hc} \quad (3.7)$$

dove η è l'efficienza quantica, e la carica $1.6 \cdot 10^{-19}$, h la costante di Plank e c la velocità della luce. Il rapporto $\frac{\eta \lambda e}{hc}$ è detto *sensibilità del fotocatodo*;

- la corrente dovuta alla radiazione di fondo (*corrente di background*)

$$I_{bgnd} = \frac{P_{bgnd} \eta \lambda e}{hc} \quad (3.8)$$

dove P_{bgnd} è la potenza della radiazione di background;

- la corrente I_d dovuta alla generazione termica degli elettroni interni in assenza di segnale ottico (*corrente di buio*).

La corrente di rumore totale al catodo è data da:

$$I_n = \sqrt{2eB(I_s + I_b + I_d)} \quad (3.9)$$

dove B è la larghezza di banda stimabile in funzione del tempo di risposta del fotomoltiplicatore τ_d come:

$$B = \frac{1}{\tau_d} \quad (3.10)$$

Il rapporto segnale-rumore al catodo viene così calcolato:

$$SNR_c = \frac{i_s}{[2eB(i_s + i_b + i_d)]} \quad (3.11)$$

All' anodo si deve tener conto dell'amplificazione subita dal segnale in corrente tramite il parametro G che rappresenta il guadagno del fotomoltiplicatore.

A fronte di ciò il rapporto segnale-rumore all'anodo è [2, 28, 30]:

$$SNR_a = \frac{G\xi_e i_s}{\left[2eBG^2\xi_e(i_s + i_b + i_d) + \left(\frac{4kTB}{R_{eq}} \right) \right]} \quad (3.12)$$

dove ξ_e definisce quale frazione degli elettroni creati al catodo arriva effettivamente all'anodo.

L'ultimo termine al denominatore rappresenta la *corrente di rumore di Johnson* associata alla resistenza R_{eq} (resistenza equivalente) del circuito elettrico esterno del fotomoltiplicatore.

Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche dei fotomoltiplicatori impiegati nelle nostre campagne di misure.

Parametro	Notazione	Unità di misura	Valore
Corrente di buio	Id	nA	1
Sensibilità del fotocatodo	Rp	mA/W	60
Efficienza quantica	H	%	20
Tempo di risposta	Td	ns	30
Guadagno	G	-	$2.5 \cdot 10^7$

Tabella 3.5 – Caratteristiche del PMT per $\lambda = 355$ nm

Parametro	Notazione	Unità di misura	Valore
Corrente di buio	Id	nA	800
Sensibilità del fotocatodo	Rp	mA/W	0.6
Efficienza quantica	H	%	0.06
Tempo di risposta	Td	ns	30
Guadagno	G	-	$2 \cdot 10^7$

Tabella 3.6 – Caratteristiche del PMT per $\lambda = 1064$ nm

3.5 Progettazione e realizzazione del SAI

Caratteristica fondamentale del sistema di allerta incendi (SAI) è di essere compatto, mobile ed autonomo. Per far ciò è stato necessario studiare nei minimi dettagli dimensioni di tutta la strumentazione necessaria al funzionamento del sistema in modalità stand-alone. Si è quindi proceduto progettando l'impianto elettrico per l'alimentazione di tutto

l'apparato tenendo sempre presente che la strumentazione dovesse essere installata su un carrello da rimorchio dalle dimensioni limitate così da poter essere trasportato facilmente da una autovettura.

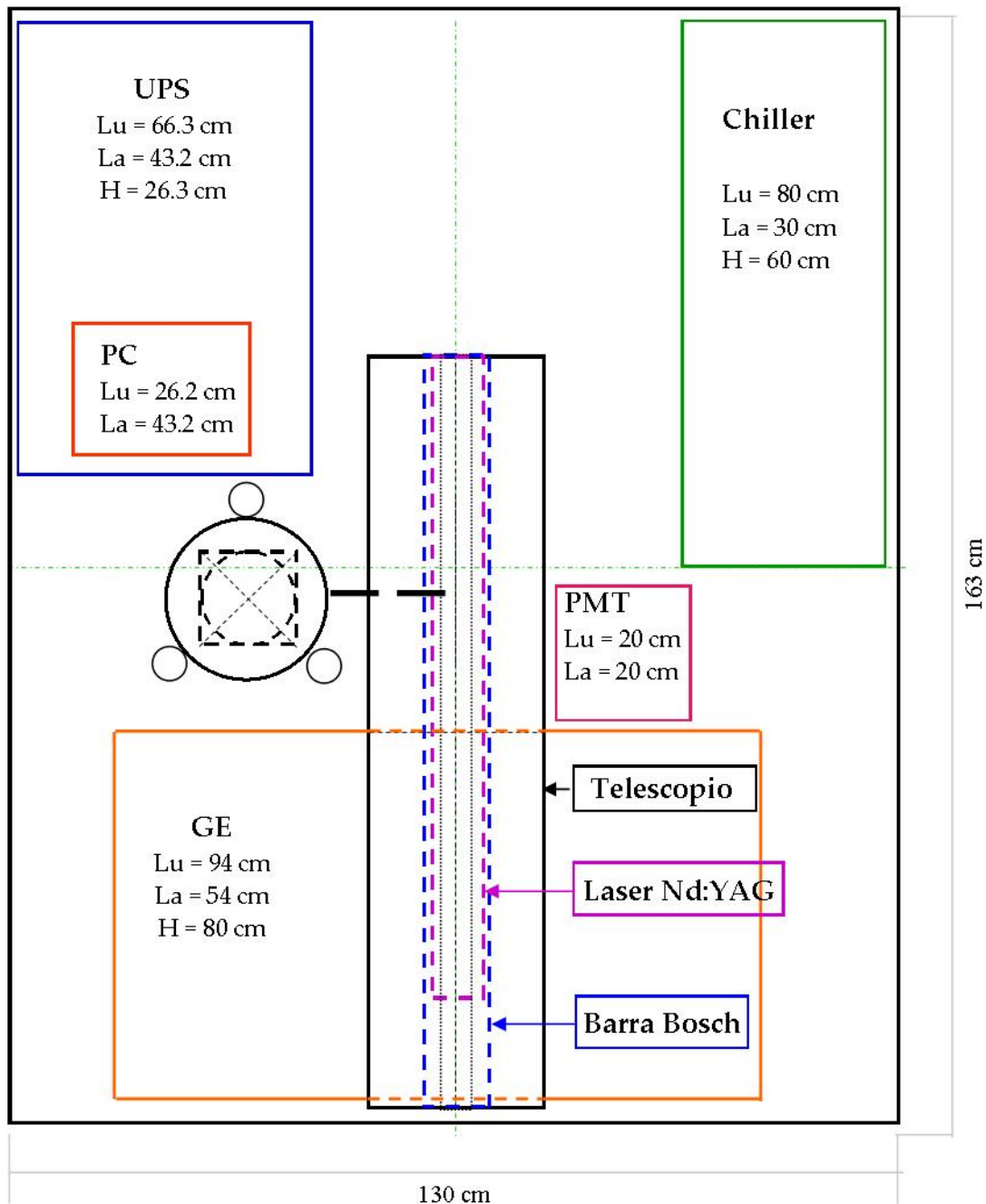


Figura 3.2 – Disposizione strumentazione all'interno del carrello.

In figura 3.2, è mostrato lo schema della disposizione di tutta la strumentazione all'interno del carrello, le cui dimensioni sono di appena 130 cm per 163 cm.

E' stata, quindi, realizzata una struttura di copertura dell'intero carrello al fine di proteggere la strumentazione in esso contenuta. Questa struttura è dotata di quattro serrande: due poste sulle pareti laterali, una su quella frontale e l'ultima sul tetto, in modo tale che il sistema di rivelazione possa lavorare rimanendo però sempre all'interno della ricopertura.

Si capisce facilmente le difficoltà incontrate per alloggiare tutti i componenti in questa struttura lasciando comunque il sistema laser-telescopio libero di ruotare di 180° sul piano orizzontale e 90° su quello verticale.

Il laser ed il telescopio sono, infatti, ancorati ad un profilato di alluminio Bosch, lungo 1500mm e di sezione 50mm x 60mm; il telescopio è posto al di sopra della barra mentre il laser al di sotto come mostrato in figura.

Il laser è agganciato ad un supporto che ne permette la movimentazione in altezza, regolandone quindi l'inclinazione.

Questa struttura compatta, progettata per essere trasportabile e facilmente manovrabile, è agganciata ad una montatura altazimutale, che le consente di eseguire movimenti rotatori orizzontali e verticali, grazie all'utilizzo di due motori brushless con controllore logico programmabile (PLC) integrato, comandati mediante un software fornito dal costruttore.

In figura 3.3 è possibile vedere un'immagine di questo sistema di movimentazione.

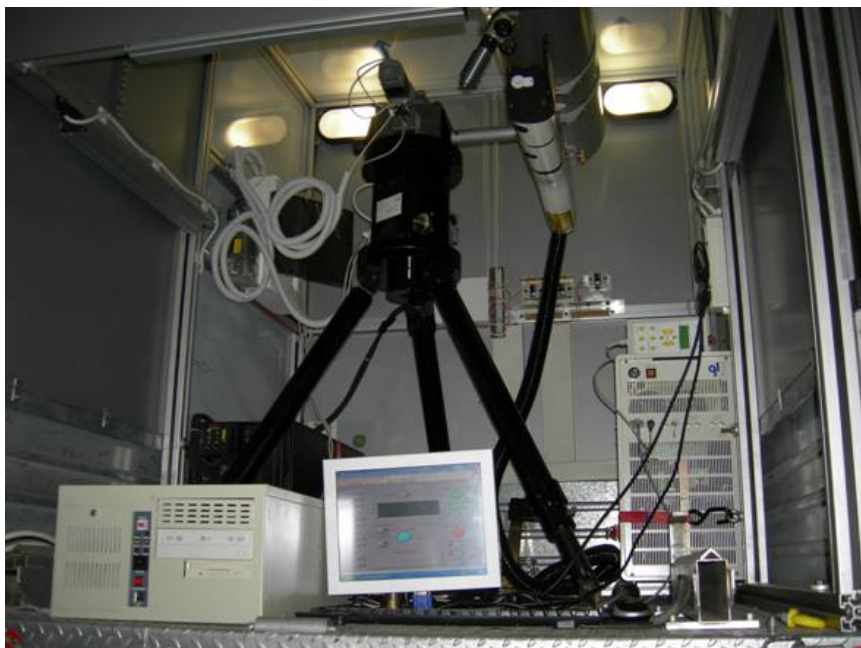


Figura 3.3 – Sistema movimentazione laser-telescopio.

3.6 Sistema di alimentazione

Come detto in precedenza, il sistema di rivelazione SAI è stato progettato affinché possa lavorare in modalità “stand-alone”, avendo così una ridotta necessità della presenza dell’uomo per funzionare.

Questo consentirebbe un suo utilizzo anche nelle zone più impervie e quindi più difficili da sorvegliare.

E’ stato, quindi, necessario progettare e realizzare un sistema che lo rendesse autonomo per quanto riguarda l’alimentazione elettrica. L’idea sviluppata è stata quella di fornire energia elettrica al sistema mediante un gruppo elettrogeno, costituito da un motore benzina 4 tempi con una potenza attiva di 4.8 kW ed un’autonomia di 10 ore, e con la possibilità di controllare e gestire in remoto tutte le sue funzioni. A valle del gruppo elettrogeno, è stato posizionato un gruppo di continuità (UPS) con un carico nominale di 8 kVA ed un’autonomia di 18 minuti se operante a metà carico e di 7 minuti al 100% del carico. Anche questo, come il gruppo elettrogeno, è dotato di una porta di comunicazione RS232 che consente la totale gestione dell’apparato in remoto. L’utilizzo dell’UPS ha il duplice scopo di stabilizzare la corrente prima che arrivi alla strumentazione così da

salvaguardarla da eventuali picchi che potrebbero danneggiarla, ed, in caso di interruzione brusca dell'alimentazione, consentire il salvataggio dati e lo spegnimento di tutta la strumentazione.

A questo punto, tutto la strumentazione del sistema di rivelazione che necessita di alimentazione, vale a dire laser (cooler), fotomoltiplicatori e computer, è connessa al gruppo di continuità.

In figura 3.4 è riportato lo schema di alimentazione del dimostratore mobile.

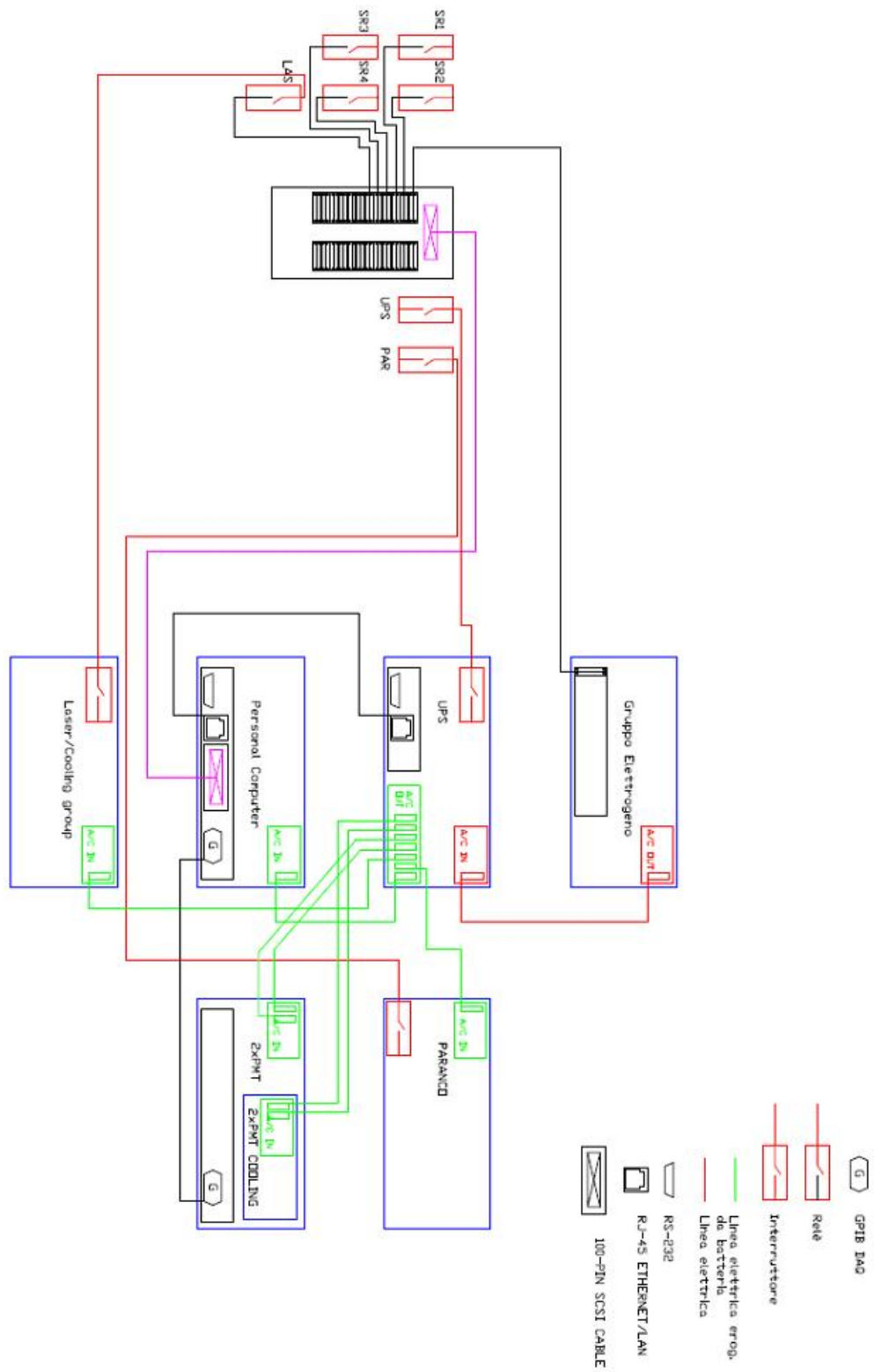


Figura 3.4 – Schema di alimentazione.

3.7 Software di gestione del SAI

Abbiamo più volte sottolineato la caratteristica del nostro sistema di poter essere totalmente gestito via software. Dopo, quindi, aver installato tutti componenti dotati di porte di comunicazioni adeguate a tale scopo, è stato sviluppato un programma, in ambiente Labview, che consentisse il controllo di tutto l'apparato. Il programma si compone di una serie di routine (subVI) ognuna con una propria funzione specifica, richiamate tutte dal front panel principale tramite dei controllori booleani. Questa struttura facilita notevolmente l'utilizzo del software di gestione del sistema anche da coloro non propriamente esperti nel campo della programmazione.

Tramite le subVI è possibile gestire:

- l'apertura e la chiusura delle serrande;
- l'acquisizione automatica dei dati;
- il posizionamento automatico dei motori nella posizione iniziale;
- la gestione manuale dei motori (se necessaria);
- la gestione manuale del funzionamento del laser (se necessaria).

Il front panel di questo programma consente anche di impostare in avvio le coordinate di posizionamento del laser ed il numero di acquisizioni. Inoltre sono riportati degli indicatori visivi introdotti per comprendere meglio l'andamento delle misure effettuate.

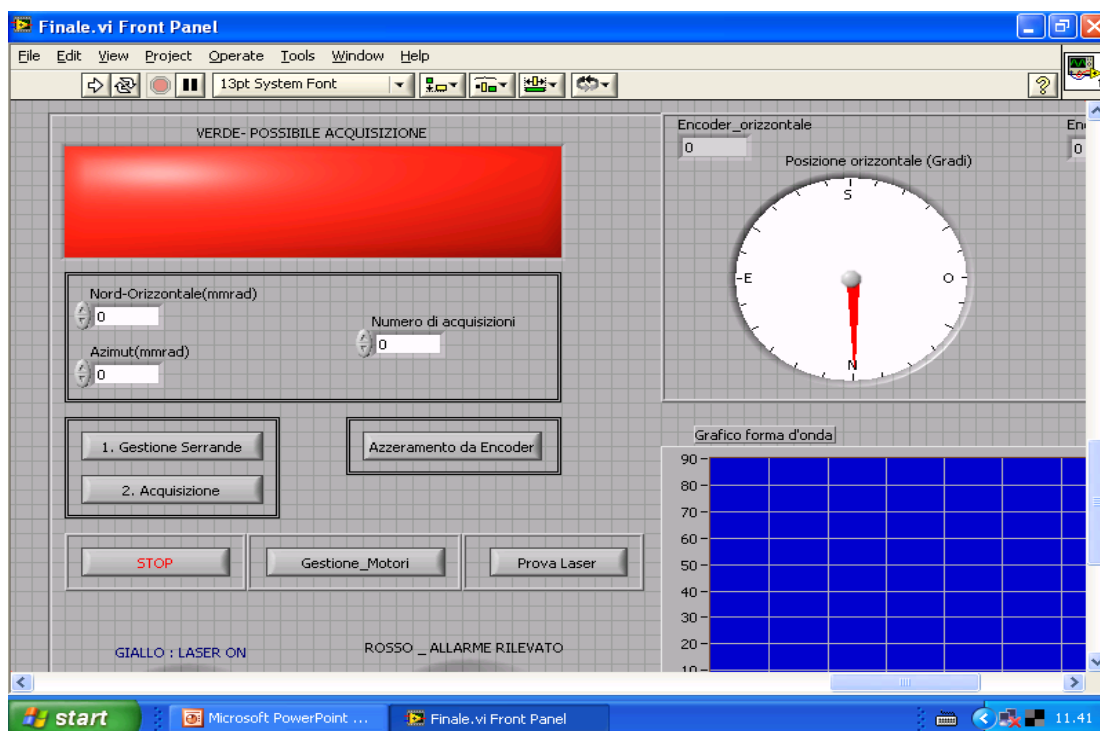


Figura 3.5 – Front panel programma di gestione

Analizziamo, ora, in dettaglio il front panel del programma, facendo riferimento alla figura 3.5:

Come controllori troviamo:

- nord orizzontale (mrad): consente di inserire (in mrad) la posizione del laser rispetto al Nord;
- azimut (mrad): consente di inserire (in mrad) la posizione del laser rispetto al piano orizzontale;
- gestione serrande: permette all'utente di richiamare la subVI che si occupa della gestione delle serrande del carrello;
- acquisizione: consente di avviare in automatico tutte le procedure di:
 1. lettura del file di coordinate;
 2. spostamento automatico dei motori;

3. accensione Q-switch;
 4. acquisizione, visualizzazione e salvataggio automatico dei files dati;
 5. spegnimento del Q-switch;
 6. salvataggio di un file di posizione (calcolato leggendo gli encoder);
 7. controllo del file allarme (se il controllo è positivo vengono ripetute tutte le operazioni fino alla 6);
 8. riparte dal punto 1 fino a che non sono terminate le coordinate presenti nel file;
 9. al termine della scansione i motori si riposizionano automaticamente nelle coordinate di partenza.
- azzeramento da encoder: consente di avviare una subVI tramite la quale è possibile azzerare automaticamente la posizione dei motori in caso che si decida di interrompere la scansione e si voglia ripartire dall'inizio.

Sempre con riferimento alla figura 3.5, tra gli indicatori abbiamo :

- led: quando è verde è possibile iniziare le operazioni di acquisizione; se è rosso è possibile gestire solo l'apertura e la chiusura delle serrande ;
- lettura Encoder: l'encoder orizzontale legge da 1 a 29600; l'encoder verticale da 1 a 20000;
- posizione orizzontale (gradi): viene riportata la posizione dei motori, ottenuta convertendo i valori letti dall'encoder in gradi (lo stesso vale per il motore verticale);

In figura 3.6 è riportato un particolare del front panel, in cui sono visibili:

- grafico forma d'onda: indicatore che mostra il grafico del segnale acquisito ;
- acquisizioni effettuate: contatore che riporta il numero di acquisizioni effettuate ;
- numerazione_file: numerazione assegnata al i-esimo file-dati salvato ;

- allarme rivelato: led che diventa rosso in caso di rivelazione di un allarme incendio.

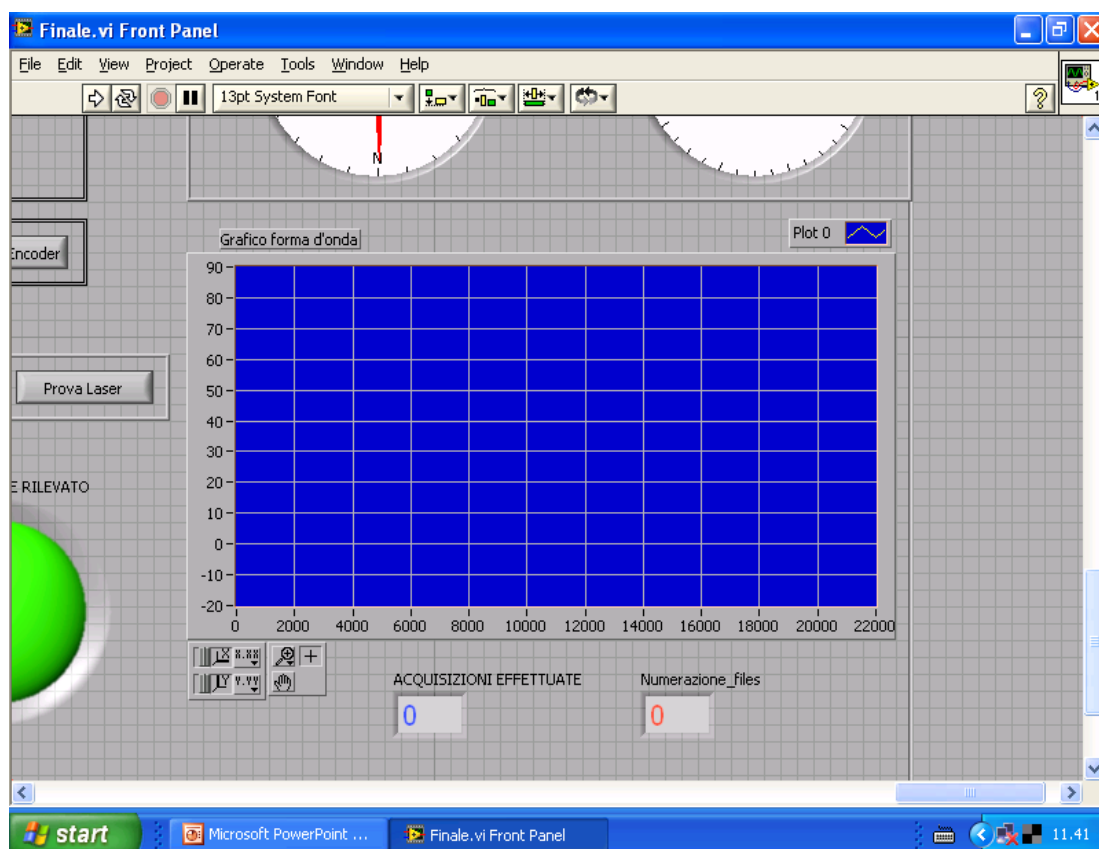


Figura 3.6 – Particolare del front panel

Le routine riguardanti l'elaborazione dei dati acquisiti e la gestione dei falsi allarmi saranno ampiamente discussi nei prossimi capitoli.

A questo punto, dopo aver installato tutta la strumentazione e sviluppato il software di gestione delle periferiche sono state effettuati dei test in campo di verifica al fine di ottimizzare il nostro sistema per la rivelazione precoce degli incendi boschivi.

3.8 Primi test in campo

Come luogo per le campagne di misure è stata scelta la valle circostante il Santuario della Madonna di Canneto sito in località Settefrati a m. 1030 s.l.m., in provincia di Frosinone. La Valle di Canneto rappresenta una propaggine della Valle del Comino incuneata tra i

contrafforti del Massiccio del Meta, e nella sua parte più alta è zona di riserva integrale del Parco nazionale d’Abruzzo, Lazio e Molise.



Figura 3.7 – Facciata del Santuario della Madonna di Canneto

Nelle figure seguenti è possibile vedere l’esatta posizione della zona di misura scelta.

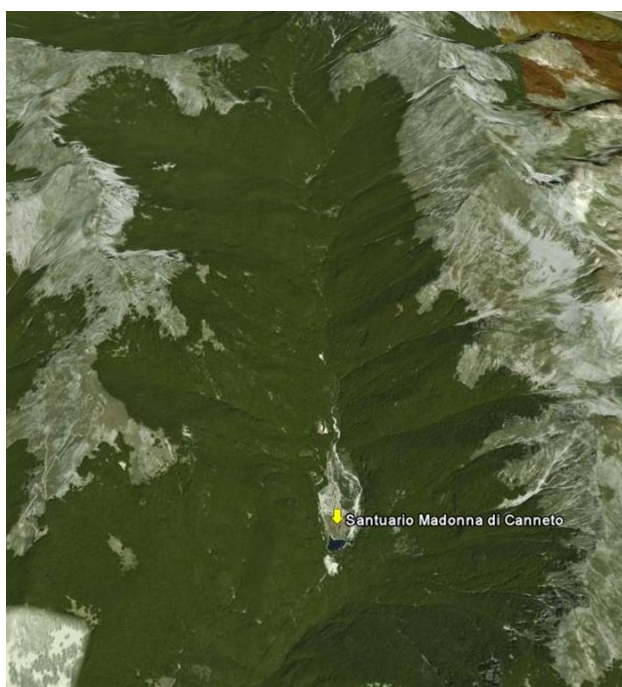


Figura 3.8 – Immagine Google Earth



Figura 3.9 – Mappa della zona di misura



Figura 3.10 – Valle di Canneto 21 Novembre 2007

3.8.1 Campagna di misure

La prima campagna di misure è stata effettuata nei giorni 25, 26 e 27 novembre 2007.

Scopo di questo primo set di misure è stato quello di poter effettuare una analisi dei segnali Lidar retrodiffusi dal particolato, prodotto durante la combustione di materiale vegetale, per evidenziare i limiti della soluzioni ottico-meccaniche fin qui realizzate.

Nella figura 3.11 è possibile vedere il posizionamento del sistema Lidar mobile nel piazzale antistante il Santuario.

Come visto nel precedentemente, il sistema è dotato di un gruppo elettrogeno per la produzione dell' energia elettrica necessaria, questo fa sì che non si abbiano limiti di alcun genere per la sua collocazione.

Sono state effettuate misure alle due lunghezze d'onda 1064 nm e 355 nm, per la rivelazione del particolato emesso durante la combustione di materiale vegetale.



Figura 3.11 – Posizionamento sistema Lidar mobile

Nella figura 3.12 è evidenziato il punto in cui è stato acceso il fuoco nella vallata, la distanza dal sistema laser è di circa 700 m.



Figura 3.12 – Valle Canneto, il cerchietto indica la zona dove è stato acceso il fuoco

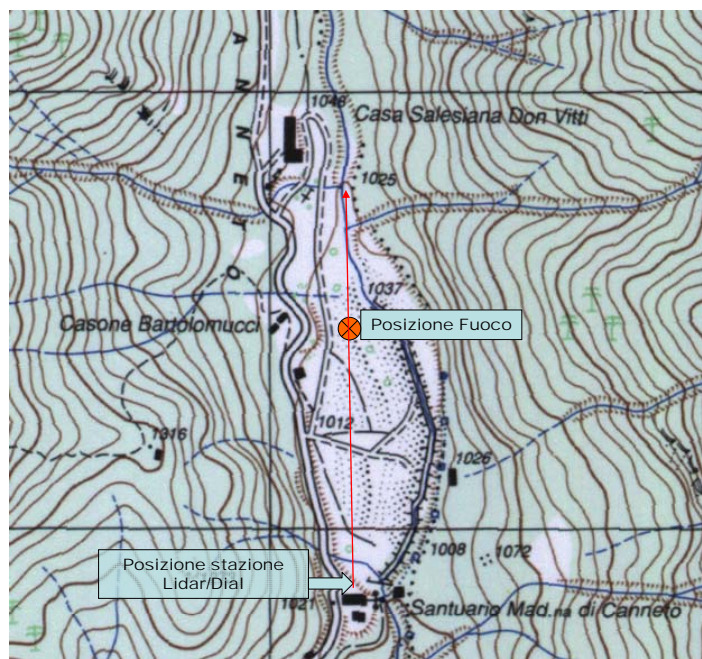


Figura 3.13 – Schema misure

Tutte le misure sono state eseguite con il sistema ottico descritto in precedenza, in cui una guida di luce trasporta il segnale ottico ai fotomoltiplicatori (PMT), alimentati ad una tensione di circa 1.8 kV inferiore del 20% a quella massima sopportabile. Ogni file dati acquisito rappresenta la media su 100 spari laser che corrisponde ad un tempo di integrazione di 10 s.

Nella figura 3.13 è possibile vedere uno schema di come sono state condotte le misure, la distanza tra il sistema Lidar (posizionato sul piazzale del Santuario) ed il punto di accensione del fuoco è di circa 700 m. Purtroppo per problemi riscontrati al sistema di movimentazione è stato possibile acquisire solo lungo una direzione e quindi non si è riusciti a fare una scansione completa della zona.

3.8.2 Risultati segnale elastico

In figura 3.14 è riportato il grafico del segnale retrodiffuso alla lunghezza d'onda 1064 nm. Come si può vedere sono presenti più picchi, il primo e l'ultimo rappresentano dei limiti orografici e questo è stato verificato utilizzando la mappa orografica della zona a nostra disposizione, mentre il picco centrale è quello dovuto all'incremento di particolato in atmosfera a seguito della combustione di materiale vegetale, ovvero è quello che indica la presenza di un incendio in atto.

La stessa analisi è stata effettuata sui segnali acquisiti alla lunghezza d'onda 355 nm (fig.3.15), anche qui è chiaramente visibile il picco dovuto alla presenza di fumo rivelato a circa 600 m dalla stazione di telesorveglianza.

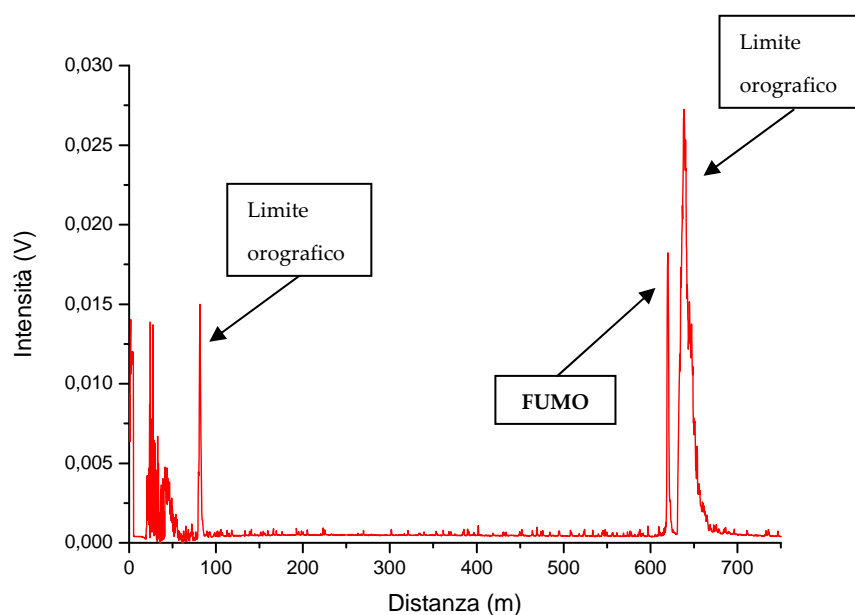


Figura 3.14 – Segnale retrodiffuso a 1064 nm

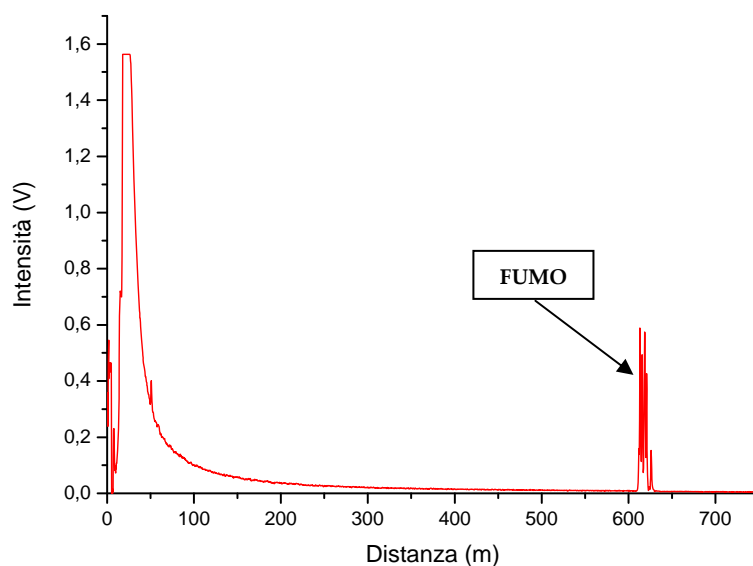


Figura 3.15 – Segnale retrodiffuso a 355 nm

3.8.3 Problemi riscontrati

La prima campagna di misura è stata necessaria per evidenziare eventuali problemi sia sulla parte hardware che sulla parte software sviluppata.

Sono emerse le seguenti problematiche:

1. il sistema di movimentazione laser-telescopio ha un'insufficiente precisione e reperibilità;
2. il software per la movimentazione sviluppato è poco flessibile e si integra male con il programma di gestione dell'intero apparato (apertura e chiusura delle porte, sparo ed acquisizione dei segnali);
3. problemi di foccheggiamento della guida di luce con la superficie del PMT;
4. il montaggio meccanico del Lidar sul carrello non permette di avere un sufficiente campo di vista, limitando la zona da monitorare.

Evidenziati questi problemi nella prima campagna di misure, sono stati affrontati e superati modificando il set-up sperimentale del sistema sia da un punto di vista hardware che software. Ultimate le modifiche è stata eseguita una nuova campagna di misure.

Nel prossimo capitolo saranno descritte le modifiche eseguite per superare i limiti della prima campagna di misure.

Capitolo 4.

Nuova configurazione del sistema SAI

4.1 Introduzione

Per risolvere i problemi riscontrati durante la prima campagna di misure è stato necessario apportare sostanziali modifiche al nostro sistema, soprattutto per quanto riguarda la parte di movimentazione laser-telescopio. A seguito di queste modifiche hardware si è reso indispensabile implementare anche delle nuove routine nel programma di gestione del SAI. Il nuovo sistema è stato, così, testato con una seconda campagna di misure effettuata sempre nella Valle di Canneto.

Grazie alle modifiche apportate, il sistema è ora in grado di effettuare scansioni in automatico della zona da monitorare. Sono state così realizzate mappe orografiche del sito in assenza di fumo, ottenendo tutte le informazioni riguardanti i target fissi presenti nella zona sotto indagine. A questo punto, dopo aver acceso un fuoco controllato, è stata nuovamente avviata la scansione ottenendo una nuova mappa. Dal confronto della prima con la seconda è stato possibile conoscere l'evoluzione del fumo emesso durante l'incendio all'interno dell'area monitorata.

In questa campagna, inoltre, sono state effettuate misure della variazione della concentrazione di vapore acqueo in atmosfera dovuta ad un fenomeno di incendio boschivo. infatti, tutti i combustibili vegetali sono composti da un'elevata percentuale di acqua e, quindi, negli istanti iniziali di un incendio (molto prima che la fiamma sia visibile), questa è la prima ad essere emessa.

Poter individuare un incendio in questa fase significherebbe ridurre drasticamente i danni da esso causati. L'idea del nostro lavoro si basa, infatti, sull'utilizzare la molecola di acqua come tracciante della combustione di materiale vegetale, inviando il segnale elastico a 355nm e raccogliendo il segnale anelastico (Raman).

Scopo di questa doppia misura (variazione di densità del particolato e concentrazione di vapore acqueo in atmosfera) è quello di individuare precocemente un incendio e di ridurre al minimo il numero dei falsi allarmi. L'idea, infatti, è quella di effettuare un controllo della variazione di concentrazione di vapore acqueo laddove il sistema ha rivelato la presenza di un picco dovuto ad incremento di particolato in atmosfera, se la distanza a cui vengono rivelati i due picchi è la stessa allora il sistema genera un allarme, altrimenti procede con la scansione [30].

In questo capitolo vedremo i risultati ottenuti in questa campagna con il sistema operante nella nuova configurazione meccanica.

4.2 Modifiche set-up sperimentale

La prima campagna di misura ha evidenziato una serie di problemi sia sulla parte hardware che sulla parte software sviluppata.

Il primo problema affrontato è stato quello riguardante la movimentazione del sistema laser-telescopio. Sono stati sostituiti i motori brushless, la cui precisione e ripetibilità erano insufficienti ai nostri scopi, con due step-motor in grado di avere una risoluzione angolare di circa 1.6 mrad. E' stato deciso, inoltre, di inserire due encoder solidali con le due movimentazioni così da monitorare in modo dinamico la posizione del sistema Lidar. Gli encoder sono stati scelti con risoluzione superiore a quella dei motori e precisamente pari a 0.8 mrad.

I motori che per loro natura sono facilmente gestibili con treni di impulsi TTL, e, poiché il nostro sistema è già dotato di una scheda digital I/O in grado di produrre treni di impulsi a frequenza variabile, è stato semplice riuscire a comandarli via software. E' stata, infatti, sviluppata una nuova subVI per il loro controllo ed integrata al programma di gestione principale visto nel capitolo precedente.

Altra modifica effettuata riguarda la meccanica di accoppiamento della guida di luce con il fotomoltiplicatore. Questa è stata modificata aumentando la flessibilità della stessa in modo tale da permettere uno spostamento maggiore in fase di allineamento, così da rendere più preciso questo ultimo.

Infine, anche la struttura di copertura del carrello è stato completamente modificata. Come visto nel capitolo precedente, il sistema Lidar era montato sul carrello in modo stabile e, mediante due aperture, frontale e superiore, il sistema era in grado di operare sull'orizzonte e sulla verticale.

Questa disposizione limitava il campo di vista ed i possibili adattamenti del sistema alle diverse orografie delle zone da monitorare. Infatti, il SAI poteva acquisire solamente sulla direzione frontale coprendo un angolo da 0 a 90° sul piano verticale e circa da 0 a 180° sul piano orizzontale. In questa porzione di semisfera, inoltre, alcune direzioni erano oscurate dalla meccanica di supporto del carrello Lidar. A questo punto si è pensato di cambiare completamente la configurazione meccanica di tutto l'apparato. Il sistema telescopio-laser è stato montato su una struttura telescopica in grado, in fase di misura, di portare tutto il sistema al di sopra del tetto del carrello Lidar.

In figura 4.1 sono riportati i disegni in CAD di questa nuova configurazione del sistema Lidar mobile.

Come è possibile vedere, la disposizione all'interno del carrello di tutta la strumentazione (gruppo elettrogeno, ups, chiller, etc) non è cambiata così come non ha subito modifiche l'impianto elettrico.

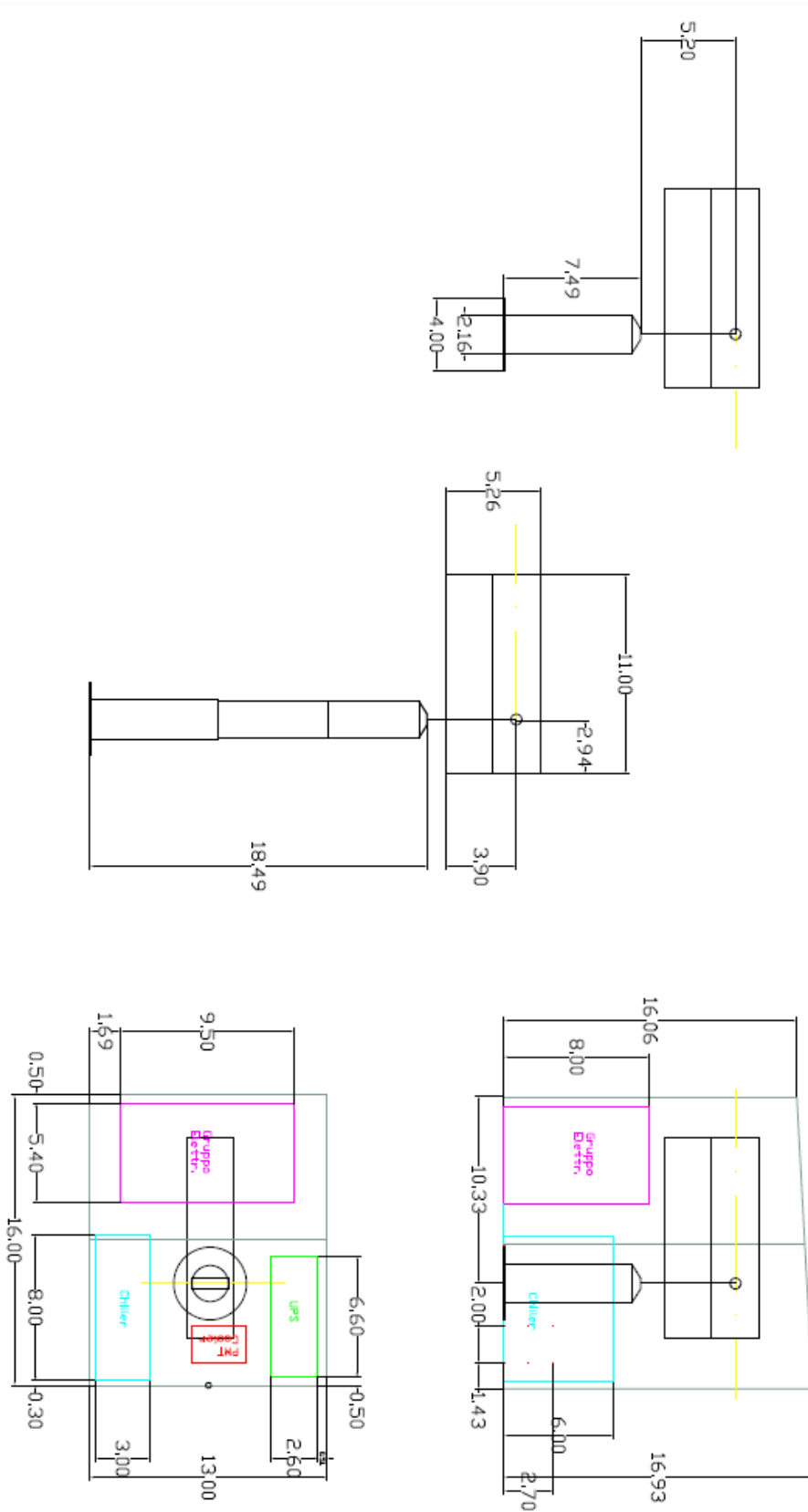


Figura 4.1 – Nuova configurazione del sistema SAI. Le misure riportate sono espresse in dm.

Questa soluzione ha portato notevoli vantaggi quali:

1. non avere zone d'ombra per la misura;
2. il sistema è ora in grado di operare da circa -10° a 90° sul piano verticale e da circa 0° a 280° sul piano orizzontale. La parte rimanente dell'angolo giro è impedita dalla presenza di cavi segnale e di alta tensione che portano l'alimentazione alla sorgente laser;
3. in fase di misura deve rimanere aperta solamente la parte superiore del carrello (tetto);

Di seguito sono riportate alcune foto della nuova configurazione del sistema SAI (figure 4.2, 4.3 e 4.4).



Figura 4.2 – Nuova configurazione del sistema SAI



Figura 4.3 – Nuova disposizione del sistema Lidar all’interno del carrello

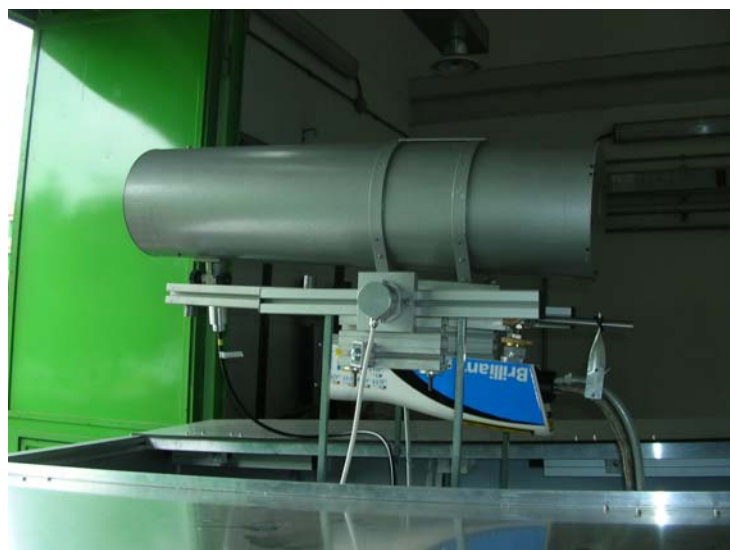


Figura 4.4 – Particolare montatura

A seguito delle modifiche meccaniche effettuate è stato necessario apportare alcuni cambiamenti anche al software di gestione. Infatti sono state riscritte le routine per la movimentazione del sistema laser-telescopio a seguito della sostituzione dei motori brushless con motori passo-passo, così da risolvere i problemi riscontrati durante la prima

campagna di misure per quanto riguarda la scansione in automatico della zona monitorata.

A questo punto, terminate le modifiche hardware e software è stata eseguita una nuova campagna di misure sempre in Valle di Canneto.

4.3 Seconda campagna di misure

Nella seconda campagna sono state effettuate misure utilizzando le due lunghezze d'onda 1064 nm e 355 nm, in questo secondo caso oltre al segnale elastico è stato acquisito anche quello anelastico così da poter valutare (Raman) l'incremento della concentrazione di acqua in atmosfera a seguito della combustione di materiale vegetale. Come già osservato in precedenza, la nostra idea è stata quella di utilizzare la molecola di vapore acqueo come tracciante per l'individuazione di fumo emesso durante un fenomeno di incendio boschivo. Infatti, il combustibile vegetale è composto da un'alta percentuale di acqua, ed è proprio questa che viene emessa nei primi istanti della combustione, ovvero ancor prima che sia visibile la fiamma. Si comprende facilmente come, individuare un incendio in questa fase significherebbe ridurre drasticamente gli innumerevoli danni da esso causati. Sono state, quindi, eseguite diverse scansioni alle due lunghezze d'onda sia in presenza di un incendio che non, così da poter valutare le capacità, in termini di velocità e di sensibilità, del dimostratore SAI.

L'area posta sotto monitoraggio ha un campo di vista di circa 20° intorno alla direzione 12°Nord rispetto alla Valle di Canneto (figura 4.5).

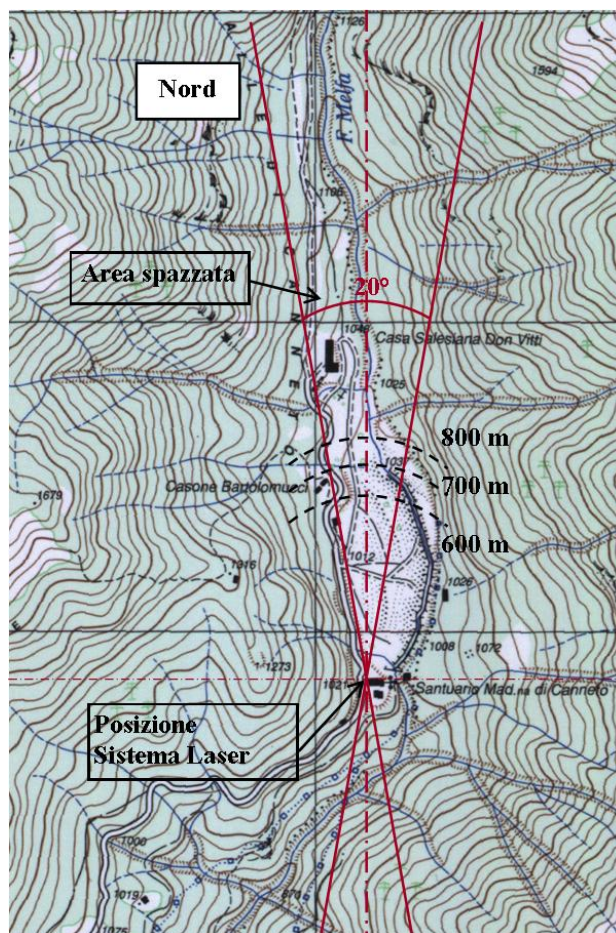


Figura 4.5 – Valle Canneto. E' segnata in rosso la zona monitorata

In questo campo di vista sono state acquisiti segnali su 70 direzioni per la lunghezza d'onda 1064 nm e 35 direzioni per la lunghezza d'onda 355 nm mediando ogni volta su 100 spari. Per ogni scansione sono stati salvati i singoli file, i file media ed i file di set-up del sistema di acquisizione informazioni indispensabili per tradurre i dati acquisiti alle due lunghezze d'onda. L'elaborazione dei segnali ha portato alla ricostruzione della mappa orografica del sito di misura, fornendo così tutte le informazioni riguardo alla posizione dei target fissi presenti nella valle in assenza di fumo.

Nelle figure 4.6 e 4.7 sono riportate le mappe orografiche del sito di misura ottenute rispettivamente a 1064 nm e 355 nm. E' possibile, così, conoscere, per ciascuna direzione di sparo (asse x) se è presente un ostacolo e la sua distanza (espressa in metri) rispetto alla posizione della stazione Lidar.

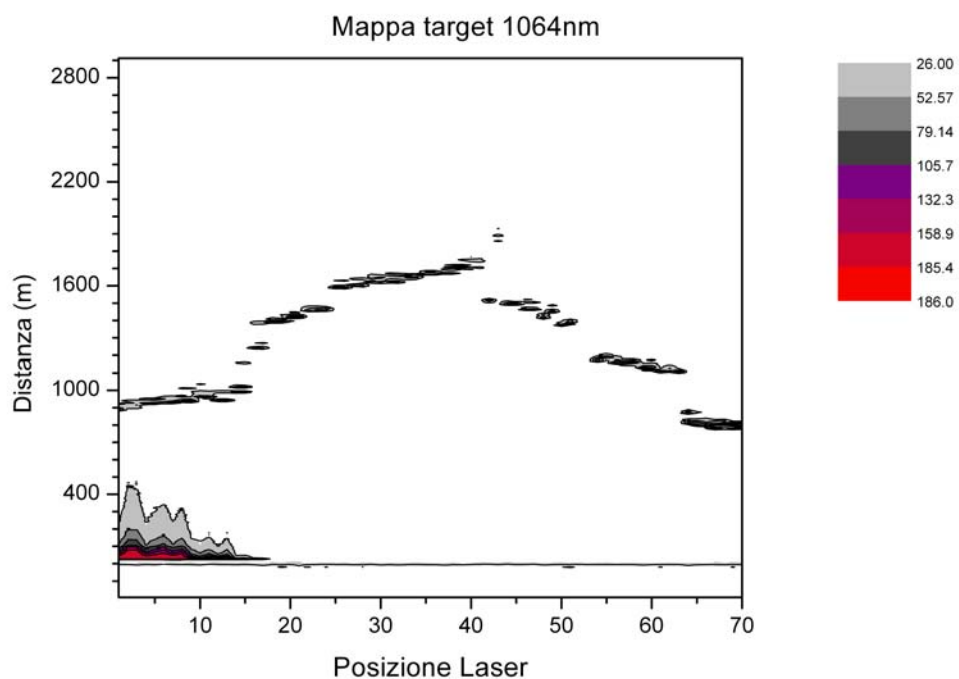


Figura 4.6 – Mappa orografica ottenuta analizzando i picchi dei segnali Lidar a 1064nm.

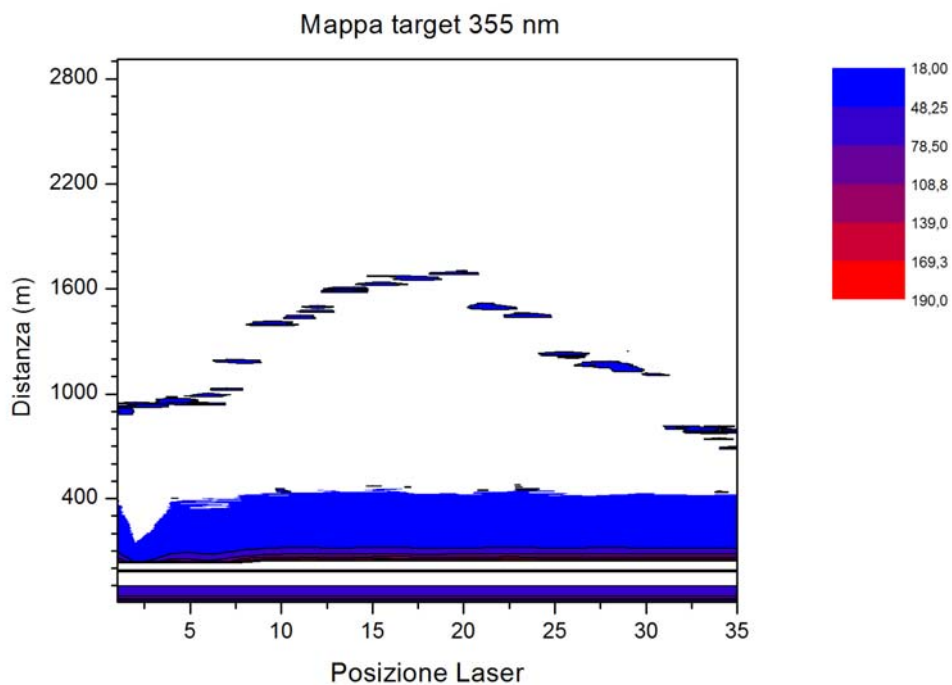


Figura 4.7 – Mappa orografica ottenuta analizzando i picchi dei segnali Lidar a 355 nm.

A questo punto, nota la distribuzione spaziale di tutti i target fissi presenti nella zona sotto monitoraggio, è stato acceso un fuoco controllato e sono state ripetute le scansioni.

In Figura 4.8 è riportata la mappa dei picchi Lidar retrodiffusi alla lunghezza d'onda di 1064 nm. Sull'asse delle ascisse è riportato il numero dell'acquisizione legata alla direzione di sparo del laser, mentre sulle ordinate la distanza a cui è stato rivelato un picco, espressa in metri.

E' possibile osservare a breve distanza le intensità retrodiffuse dall'atmosfera ed a lunghe distanze quelle dei target orografici. Inoltre, lungo le direzioni comprese tra 40 e 50 ed intorno alla direzione 60 si nota la presenza di più picchi; i primi relativi alla presenza del fumo, i secondi relativi alla presenza dell'orografia (montagna fondo valle).

La croce, riportata nella mappa, indica il punto in cui è stato acceso il fuoco.

La Figura 4.9 mostra, invece, la mappe di presenza dei picchi Lidar retrodiffusi per la lunghezza d'onda di 355 nm. Anche qui, si osservano a breve distanze le intensità retrodiffuse dall'atmosfera e a lunghe distanze i picchi orografici. Intorno alla direzione 30 si ha la presenza di più strutture; le prime e le seconde relative alla presenza del fumo, le ultime relative alla presenza dell'orografia (fondo valle).

La croce rappresenta, ancora una volta, il punto in cui è stato acceso il fuoco.

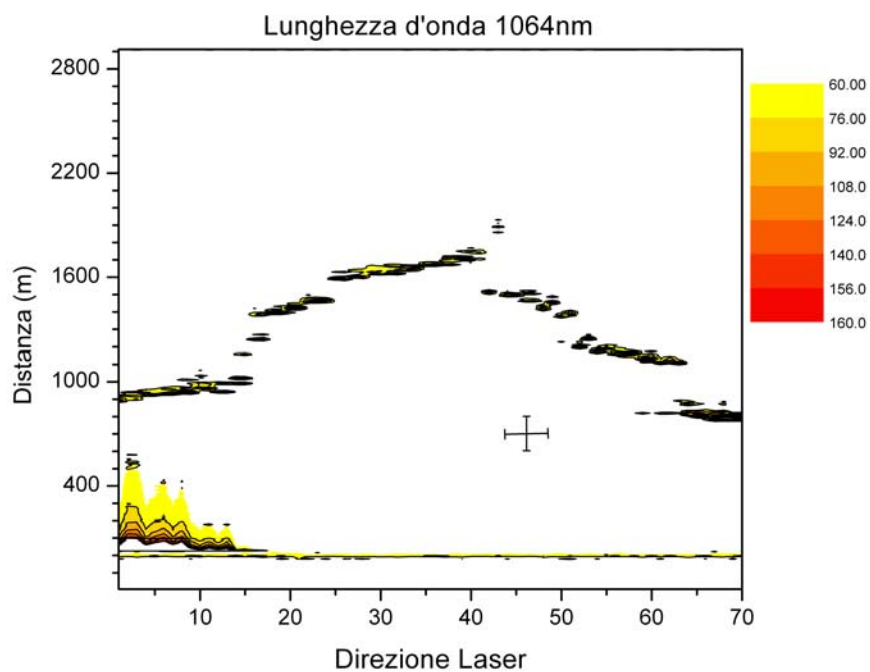


Figura 4.8 – Mappa relativa alla scansione di 20 gradi di campo alla lunghezza d'onda 1064nm.

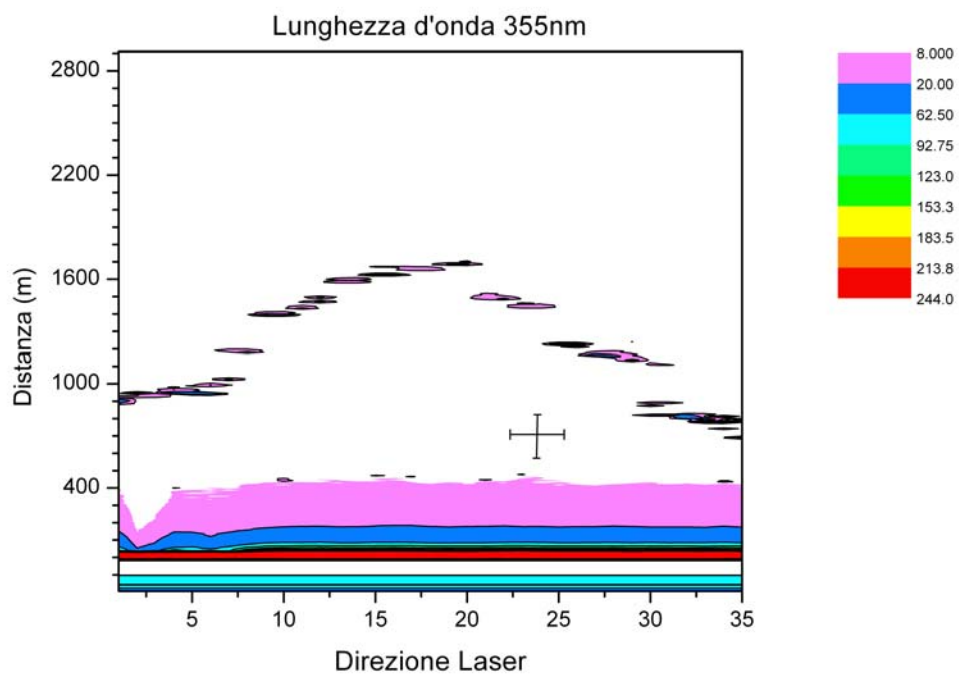


Figura 4.9 – Mappa relativa alla scansione di 20 gradi di campo alla lunghezza d'onda 355nm.

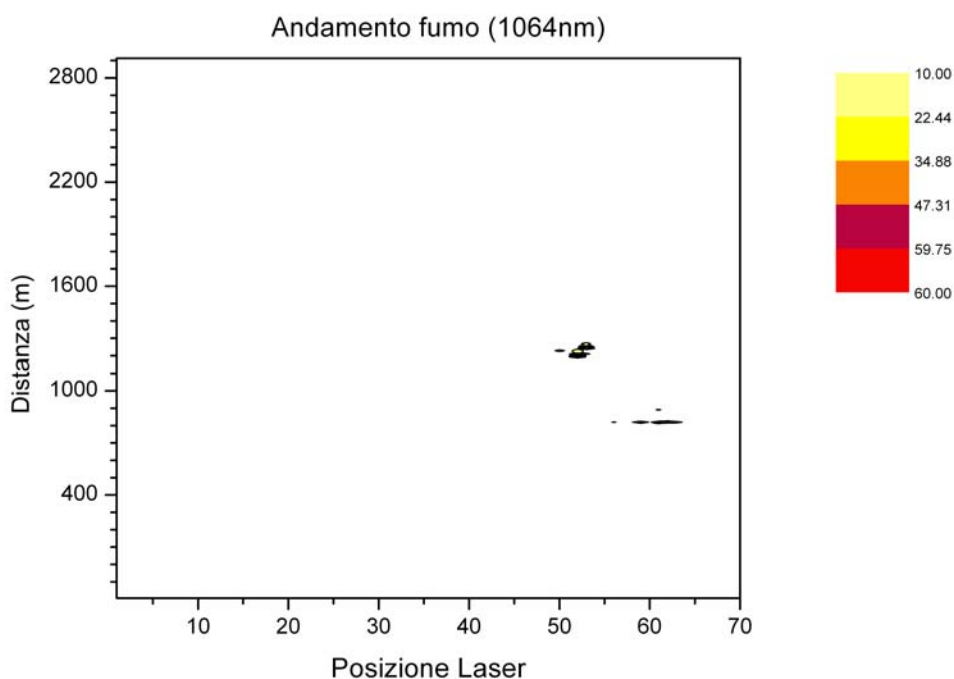


Figura 4.10 – Andamento del fumo nella valle

Sottraendo le due mappe, ottenute con e senza la presenza di un incendio, è possibile individuare i picchi dovuti al fumo e vedere come questo diffonde all'interno della valle (figura 4.10).

Per la determinazione corretta dei dati è risultato estremamente importante conoscere la turbolenza e la direzione del vento locale, che sono stati misurati mediante l'uso di una centralina standard. In alcuni casi, da osservazioni fatte senza strumento, si è osservato che la direzione del vento all'interno della valle è completamente diversa nei due punti in cui sono stati posizionati il sistema Lidar ed il sito in cui è stato indotto l'incendio. Sarebbe opportuno, quindi, in questi casi affiancare un sistema in grado di misurare il profilo di vento da associare all'analisi dei dati sperimentali.

Notiamo come il vento ha modificato le misure eseguite durante la campagna. Come è possibile osservare dalla mappa, in figura 4.10, sono presenti dei picchi di fumo nella direzione a destra della sorgente. Questo si spiega osservando la direzione del vento nella valle nell'intervallo di tempo in cui sono state effettuate le misure, che va dalle 15:00 alle 18:00 (Figura 4.11). La direzione e l'intensità del vento tra le ore 15:00 e le ore 18:00

predomina nella direzione Nord-Est. La Valle di Canneto è a circa -14° Nord. Questo spiega come il fumo prodotto dalla sorgente indotta è evidenziato nella mappa, ripulita dagli ostacoli orografici per le due lunghezze d'onda 1064 nm e 355nm, è localizzato a destra della zona monitorata appunto nella direzione Nord-Est.

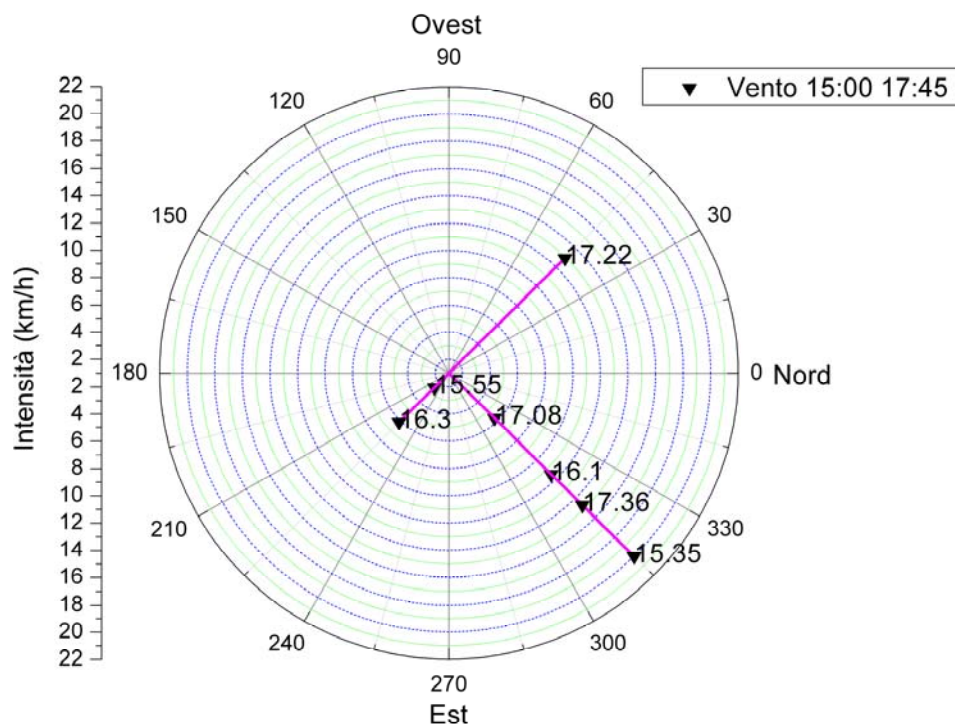


Figura 4.11 – Direzione ed intensità del vento tra le ore 15:00 e le ore 18:00.

Cosa opposta accade nella misura di concentrazione di vapor acqueo eseguita alla lunghezza d'onda anelastica 403nm (figura 4.12) [2, 40]. Si osserva, infatti, un aumento della concentrazione di acqua lungo la direzione di propagazione del fascio relativa all'incirca al centro Valle. Questo è giustificato dal fatto che nell'ora successiva alle misure del segnale elastico e, quindi, durante la misura del segnale Lidar anelastico, la direzione predominante del vento è drasticamente cambiata (figura 4.13).

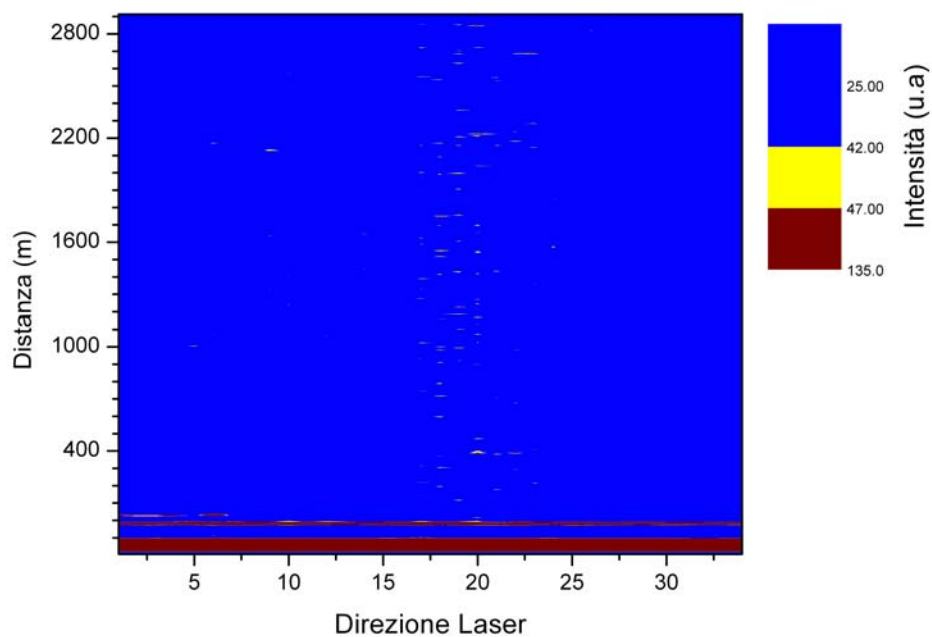


Figura 4.12 – Mappa relativa alle scansioni anelastiche Raman (407.5nm)

La direzione predominante in questo caso è risultata Nord Ovest. Ciò spiegherebbe la presenza e lo spostamento del fumo nella direzione Nord come è possibile notare dalla presenza delle macchie che rappresentano un incremento della concentrazione di acqua lungo la direzione di sparo nella figura 4.12.

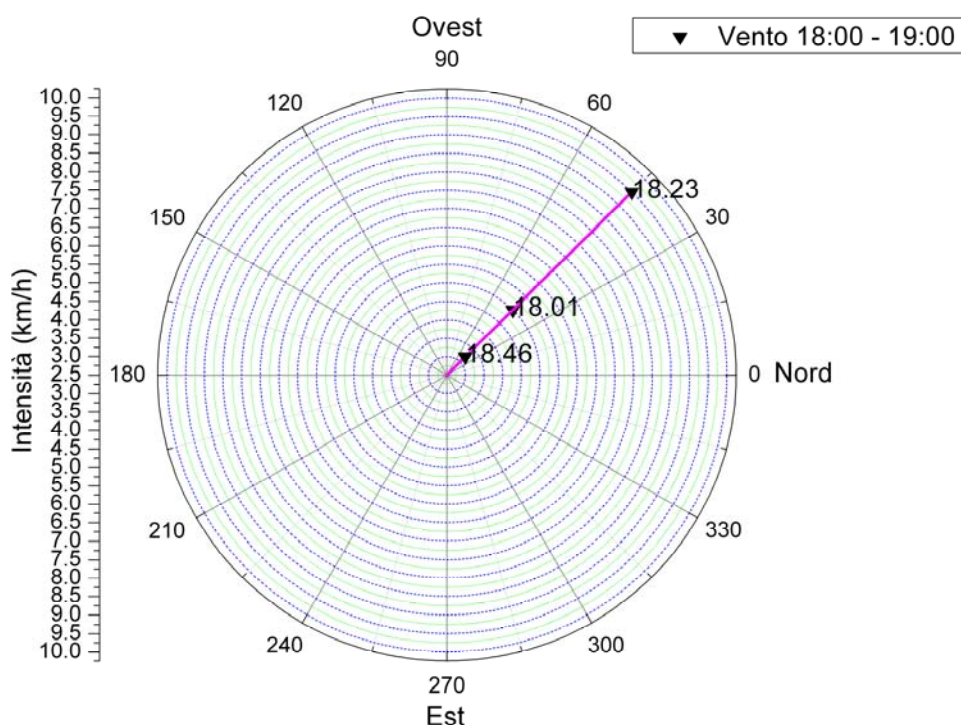


Figura 4.13 – Direzione ed intensità del vento tra le ore 18:00 e le ore 19:00.

Dalle mappe ottenute dalla campagna di misure emerge che il sistema è in grado di discriminare i picchi dovuti alla presenza di ostacoli orografici evidenziando la presenza di fumo nella valle, che nelle giornate di misura presentava una forte turbolenza con una presenza costante di vento. La misura della presenza di fumo è stata positiva sia nel caso di misure con lunghezze d'onda elastiche sia con segnali provenienti dalla misura di variazione di acqua in atmosfera.

Le misure provenienti dalla retrodiffusione Raman e ,quindi, il calcolo della variazione della concentrazione di acqua a seguito di un incendio boschivo, saranno ampiamente discusse nei paragrafi successivi.

Dalle misure sperimentali e dai risultati è evidente che la presenza di fumo non è direttamente legata all'emissione lungo la direzione verticale della sorgente. Nel caso specifico la diffusione del fumo dipende fortemente dalle condizioni di vento. Nella giornata in cui sono stati eseguiti i test in campo, il vento era di intensità molto elevata. Questo ha fatto sì che il fumo emesso dalla sorgente si diffondesse lungo la valle senza disperdersi in quota lungo la direzione predominante. Risulta evidente che, oltre alla

presenza durante le misure, di un sistema in grado di eseguire misure dinamiche della direzione, emerge la necessità di sviluppare un software che sia in grado di prevedere le backtrajectory per definire il reale punto in cui si è sviluppato il fuoco che ha generato il segnale di fumo.

4.4 Analisi dei segnali anelastici: effetto Raman

La spettroscopia Raman fornisce informazioni sulle vibrazioni degli atomi all'interno di un reticolo cristallino ed è basata sull'effetto Raman [2].

Quando un fascio di luce monocromatica incide sulla superficie di un campione, possono verificarsi diversi fenomeni fisici: la radiazione può essere riflessa, trasmessa nel materiale, assorbita o diffusa in tutte le direzioni. Se la lunghezza d'onda della luce diffusa è la stessa di quella incidente si parla di "diffusione elastica o Rayleigh", se la lunghezza d'onda è differente da quella iniziale si parla di "diffusione anelastica o Raman".

L'energia dei fotoni diffusi è aumentata o diminuita, rispetto a quella dei fotoni incidenti, di intervalli quantizzati che corrispondono alle differenze energetiche tra i livelli vibrazionali o rotazionali della molecola.

Quando un fotone incidente di energia $h\nu_0$ interagisce con una molecola e la frequenza della radiazione è tale da provocare un'eccitazione elettronica, la molecola può occupare uno stato reale (quindi si ha assorbimento elettronico) oppure acquistare energia sufficiente per passare ad uno stato virtuale instabile e da cui tende a decadere. Si possono avere tre casi, come schematizzato in figura 4.12:

1. la molecola torna al livello iniziale e riemette un fotone con la stessa energia del fotone incidente (diffusione Rayleigh);
2. la molecola ricade in un livello superiore a quello iniziale ed emette un fotone con frequenza minore $\nu_0 - \nu_1 = \nu_{st}$ (diffusione Raman Stokes);
3. la molecola va ad occupare uno stato inferiore rispetto a quello originario ed emette luce di frequenza maggiore $\nu_0 + \nu_1 = \nu_{ast}$ (diffusione Raman anti-Stokes).

Le vibrazioni Stokes e anti-Stokes si posizionano simmetricamente rispetto a quella eccitatrice e non dipendono dalla lunghezza d'onda della luce inviata, ma solo dalla differenza di energia tra gli stati vibrazionali.

4.4.1 Equazione Raman Lidar

Il segnale Raman $P_R(R)$ in funzione della distanza R alla lunghezza d'onda λ_R è descritto dalla seguente equazione [40, 41]:

$$P_R(R) = \frac{K_R O(R)}{R^2} \beta_R(R) \exp\left\{-\int_0^R [\alpha_0(\zeta) + \alpha_R(\zeta)] \cdot d\zeta\right\} \quad (4.2)$$

dove $O(R)$ è il fattore di sovrapposizione tra fascio laser e campo di vista del telescopio, K_R tiene conto di tutti i parametri indipendenti dalla distanza quali, ad esempio, area del telescopio, efficienza del ricevitore e del rivelatore, β_R rappresenta la sezione d'urto del segnale Raman retrodiffuso, $\alpha_0(R)$ e $\alpha_R(R)$ sono, rispettivamente, i coefficienti di estinzione nel percorso di andata e di ritorno della luce.

Il coefficiente Raman di backscattering è dato dalla seguente equazione:

$$\beta_R = N_R(R) \frac{d\sigma(\pi)}{d\Omega} \quad (4.3)$$

dove $N_R(R)$ è la densità numerica molecolare del gas attivo alla lunghezza d'onda Raman, mentre $\frac{d\sigma(\pi)}{d\Omega}$ rappresenta la sezione d'urto differenziale.

Per quanto riguarda il coefficiente di estinzione, nel percorso di retrodiffusione della luce da parte della molecola investigata, va calcolato alla lunghezza d'onda dello shift Raman.

4.4.2 Calcolo della concentrazione di vapore acqueo

E' stato già più volte sottolineato quanto sia importante conoscere la variazione della concentrazione di acqua in atmosfera a seguito di un incendio, per ridurre drasticamente il numero dei falsi allarmi.

Dalla letteratura, è noto che lo spettro vibrazionale Raman della molecole di acqua è shiftata approssimativamente di 3652 cm^{-1} rispetto alla riga eccitatrice. Così, utilizzando

la terza armonica del Nd:YAG (355 nm) come lunghezza d'onda eccitante si ha che il centro dello spettro Raman del vapore acqueo è pari a 407.5 nm [40, 41, 42]]. Ed è proprio questo segnale che è stato acquisito durante la nostra prima campagna di misure. Sono stati salvati 50 file ognuno rappresentante la media del segnale su 100 spari.

Per il calcolo della concentrazione di vapore acqueo in atmosfera a seguito della combustione di materiale vegetale, è stato realizzato un software in ambiente Matlab, che prendesse in input i segnali acquisiti dal nostro sistema e dopo averli opportunamente convertiti ricavasse il valore del coefficiente di backscattering in funzione della distanza dall'inversione della equazione 4.2. A questo punto sulla base dell'equazione 4.3 è stato possibile ricavare l'andamento della concentrazione di vapore acqueo nota la sezione d'urto [41].

In figura 4.13 è riportato l'andamento del coefficiente di retrodiffusione del vapore acqueo (espresso in m^{-1}) in funzione della distanza R espressa in metri. Come si può chiaramente vedere è presente un picco ad una distanza di circa 700 m dalla sistema Lidar, che come visto precedentemente corrisponde alla zona di accensione del fuoco.

L'errore commesso nella stima del coefficiente di backscattering, calcolata la propagazione degli errori [44] risulta essere pari al 20%.

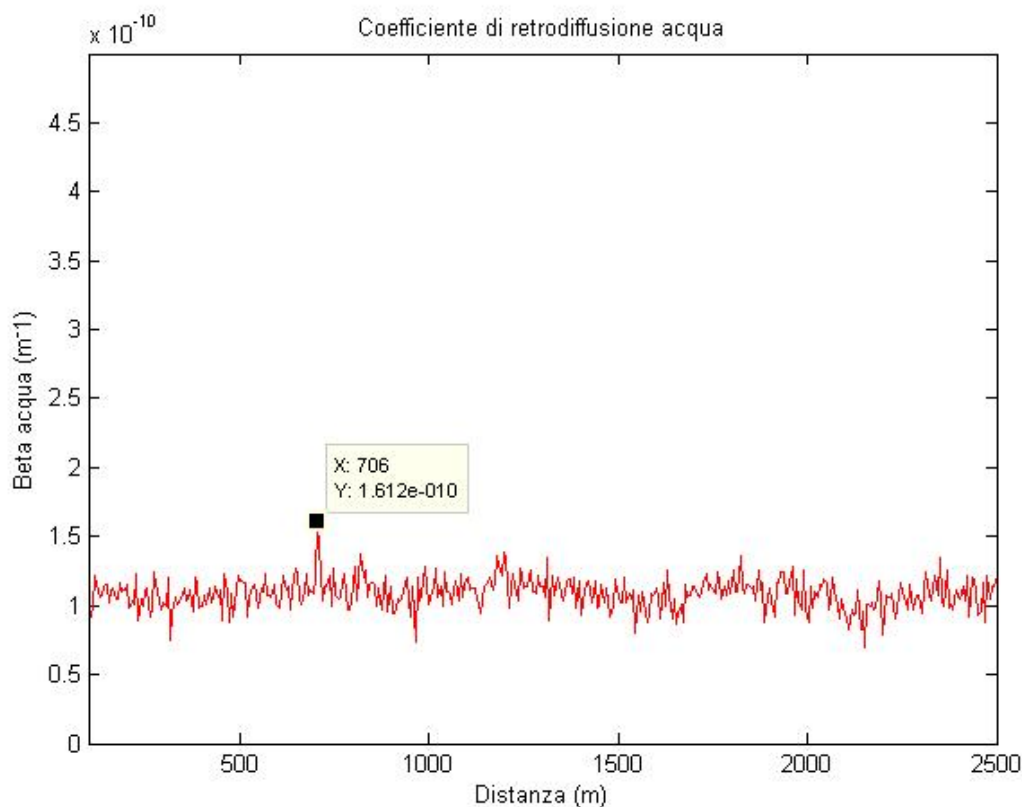


Figura 4.14 – Andamento del coefficiente di backscattering

A questo punto, è stato possibile calcolare il valore della concentrazione di acqua in atmosfera dovuta alla combustione di materiale vegetale, sfruttando l'equazione 4.3. È stata prima calcolata la concentrazione di vapore acqueo presente di default (ovvero in assenza di incendio), prendendo come coefficiente di retrodiffusione la media dei valori ottenuti (figura 4.14), ed il risultato è stato di 5985 ppm. Questo valore risulta essere in linea con i dati ottenuti dalla centralina meteo (temperature 9°C ed umidità relativa 60%) che riportati sul digramma psicrometrico, e considerando una quota di 1020 m, stimano la concentrazione di acqua pari a 5624 ppm.

Poiché in corrispondenza del picco la concentrazione di acqua risulta essere pari a 8106 ppm, è semplice ricavare che l'incremento di vapore acqueo in atmosfera a seguito di un processo di combustione è pari a 2121 ppm.

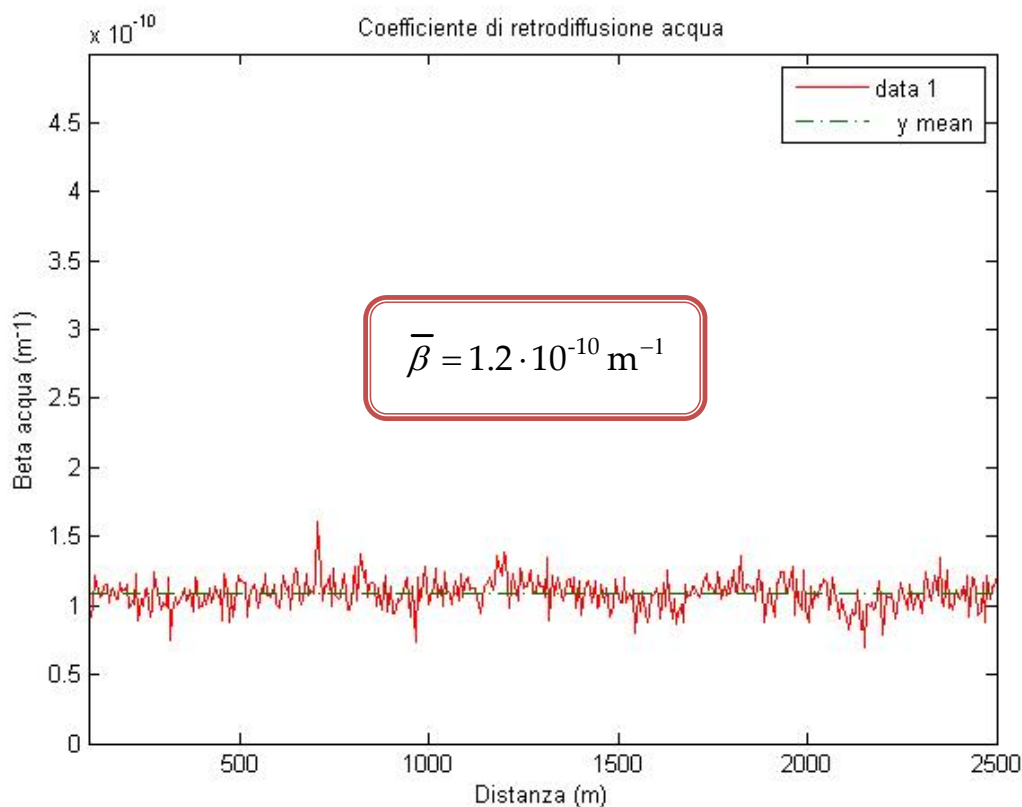


Figura 4.15 – Valore medio del coefficiente di backscattering per il vapore acqueo

Di importanza fondamentale in un'analisi degli echi lidar risulta essere il rapporto segnale rumore. Nel nostro caso specifico, il rumore raccolto dal sistema di acquisizione potrebbe non solo limitare la precisione delle misure, ma può essere interpretato come un falso segnale che può ridurre il segnale stesso fino ad oscurarlo, inducendo falsi allarmi nell'algoritmo di classificazione del sistema finale. Come mostra la figura 4.15, SNR è molto maggiore di uno assicurando così da validare i risultati ottenuti durante la campagna di misure.

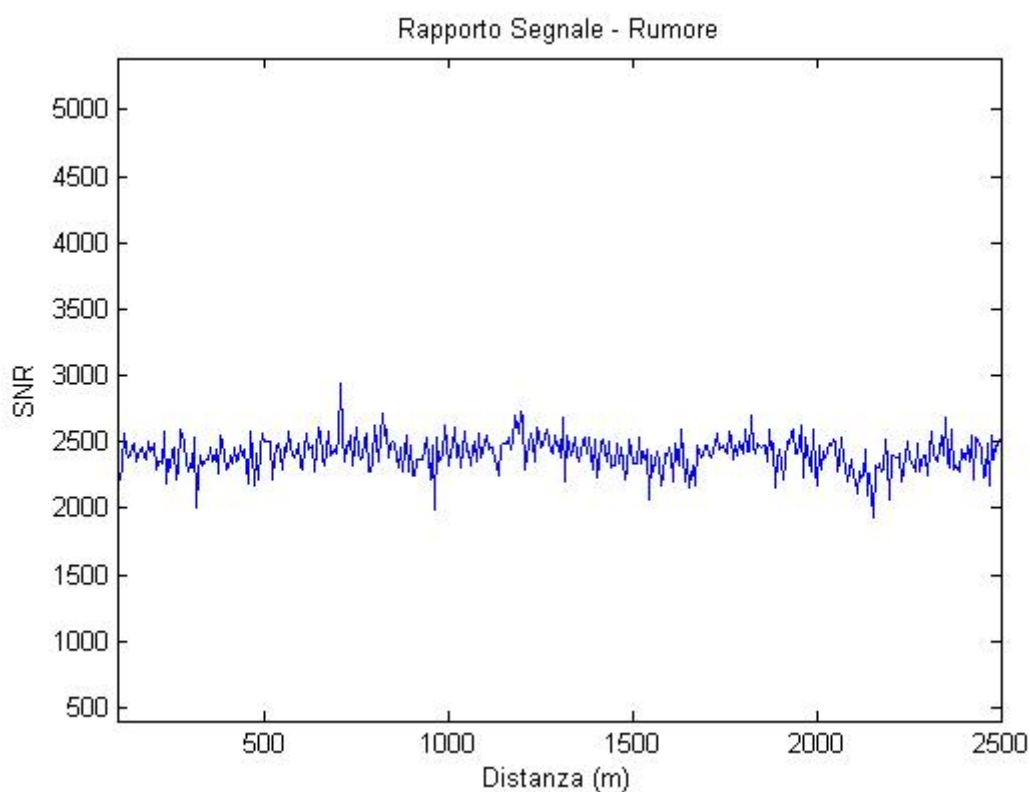


Figura 4.16 – Andamento del rapporto segnale-rumore

4.5 Conclusioni

Al termine di questa seconda campagna di misure, il sistema SAI è stato in grado di effettuare scansioni automatiche della zona posta sotto monitoraggio in modo ripetitivo ed estremamente efficiente. Con la nuova configurazione sono stati, quindi, risolti tutti i problemi occorsi durante i primi test effettuati a novembre 2007. Il sistema ora è in grado di produrre una mappa di diffusione del fumo all'interno della valle, una volta nota la mappa orografica della zona.

Per la Valle di Canneto, poiché non è disponibile, presso Istituto Geografico Militare (IGM) una mappa 3D della zona con la risoluzione necessaria alle nostre applicazioni, la mappa orografica è stata ottenuta effettuando una scansione in "bianco" dell'area sorvegliata prima di accendere il fuoco.

Dal confronto della mappa ottenuta con e senza la presenza di un incendio, è stato possibile individuare il fumo e stabilire come esso diffonde nella valle. I risultati messi in relazione ai parametri meteorologici, misurati da una centralina locale, sembrano concordare.

Alla luce dei risultati ottenuti, possiamo ritenere definitiva questa seconda configurazione meccanica del sistema, in quanto possiede tutte le caratteristiche necessarie per il monitoraggio automatizzato di aree per il rilevamento di incendi boschivi.

La fase successiva del nostro lavoro, è stata la gestione in remoto di tutte le funzioni del SAI.

Capitolo 5.

Gestione in remoto del sistema SAI

5.1 Introduzione

Il “Controllo Remoto” di un sistema consiste nella possibilità di prendere il suo totale controllo da una postazione centrale. Il servizio consente di eseguire comandi grazie alla possibilità di controllare tastiera, mouse e di conseguenza il video, anche se fisicamente non si è davanti a quel computer. E' facile capire come dotare il nostro sistema di questa caratteristica sia fondamentale. Essa, infatti, consentirebbe, tramite una sola sala controllo, di gestire tutte unità SAI installate nei diversi siti posti sotto monitoraggio, riducendo, così, i costi legati soprattutto al personale.

Terminata, quindi, la messa a punto del dimostratore, la nostra attività è proseguita nel rendere il nostro sistema di rivelazione incendi totalmente gestibile in remoto.

Il controllo da remoto del sistema SAI, oltre ad informarci su l'eventuale presenza di un incendio boschivo, ci consente anche di potere intervenire sul sistema stesso, verificando ad esempio l'impianto di alimentazione (gruppo elettrogeno ed ups), o di spegnere completamente il sistema in caso di necessità.

Il sistema è stato, così dotato di tutta la strumentazione necessaria a tale scopo ed è stato sviluppato il software necessario.

Prima di organizzare una nuova compagna di misure nel Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise si è pensato di testare il nuovo sistema effettuando misure dell'andamento giornaliero del *Planetary Boundary Layer* (PBL) presso la nostra Università. I vantaggi di questa scelta sono facilmente comprensibili.

5.2 Controllo remoto

La gestione in remoto del sistema è stata realizzata tramite la configurazione di una rete locale wireless tra due computer posti a circa 200 m di stanza l'uno dall'altro. Questa

decisione è stata presa in virtù del fatto che durante le campagne precedentemente svolte si è visto che la zona di misure scelta (Valle di Canneto) non è coperta da nessun gestore di telefonia e quindi un controllo in remoto del sistema sfruttando le reti GPRS, EDGE, UMTS sarebbe stato impossibile. E' stato, però, studiato il sistema per realizzare questo tipo di connessione da utilizzare laddove le condizioni lo consentano.

L'utilizzo proprio per il controllo remoto del sistema Lidar ha richiesto lo sviluppo di un programma di collegamento a distanza mediante il quale dalla postazione locale ci si potesse connettere al computer in remoto e governare, quindi, il sistema.

Prima di effettuare una nuova campagna di misure presso il Parco Nazionale d' Abruzzo, Lazio e Molise, si è deciso di testare il sistema, o meglio il software sviluppato per il controllo remoto, presso i laboratori della nostra Università. Come è facilmente intuibile, non si poteva testare il sistema sulla rivelazione di sorgenti di fumo, in quanto non era possibile accendere fuochi (pur se controllati!) negli intorni della nostra facoltà!

Si è deciso, quindi, di procedere con misure dello Strato Limite Planetario (PBL) nell'arco delle 24 ore. E' stato, così, posizionato il sistema Lidar nello spazio antistante i nostri laboratori e gestito in remoto da una sala controllo allestita all'interno di essi.

5.3 Misure del segnale elastico e ricostruzione del PBL

Il PBL costituisce l'interfaccia tra la superficie e l'atmosfera libera ed è sotto l'influenza diretta dei processi al suolo. E' noto che lo Strato Limite Planetario si evolve secondo una periodicità giornaliera e possiede una sua stratificazione a carattere fortemente dinamico. Di particolare interesse è l'altezza media ovvero l'estensione media in quota del PBL, utile non solo a capire le dimensioni spaziali dei fenomeni che si stanno studiando ma anche come parametro d'ingresso per i modelli di simulazione e previsione della dinamica atmosferica.

I cambiamenti che si osservano nel PBL sono riconducibili alla concomitanza di una serie di fattori legati all'interazione tra superficie terrestre e lo strato di atmosfera sovrastante [49]. Tali fattori, indicati con il termine di forzanti superficiali, hanno un carattere sia naturale che antropico ed includono la resistenza aerodinamica causata dalla forza

d'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) [50, 51, 52, 53]. 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 2.5km.

5.3.1Ciclo diurno del PBL

E' noto che l'atmosfera terrestre è parzialmente trasparente alla radiazione solare: la parte che di questa arriva al suolo viene assorbita e poi trasferita allo strato d'aria adiacente, cioè al PBL, sotto forma di calore sensibile (conduzione) oppure di calore latente sviluppato nei cambiamenti di stato acqua liquida -vapore acqueo e viceversa. Di giorno predominano gli scambi energetici dovuti alla turbolenza convettiva e ai venti: al sorgere del sole, il suolo, inizialmente freddo, è riscaldato dalla radiazione solare provocando la formazione dei flussi verticali di calore sensibile e latente. Si sviluppa così uno strato convettivo turbolento al suolo, dovuto al moto ascensionale di sottili pennacchi di aria calda, soggetti ad una forza di galleggiamento positiva (correnti termiche ascendenti). Quando il sole tramonta, l'azione radiativa in prossimità della superficie non si arresta immediatamente: si ha una riduzione graduale delle correnti termiche risalenti dalla superficie terrestre.

Di notte, il suolo si raffredda e l'aria a contatto con esso pure, divenendo più densa e arrestando ogni processo convettivo. Per lo stesso motivo, anche i venti diminuiscono. Pertanto di notte, predomina nel BL un meccanismo di raffreddamento radiativo IR con scambi energetici ristretti a poche centinaia di metri a causa dell'opacità dell'aria (forte assorbimento nell'IR) [54, 55, 56, 57].

Il bilancio energetico appena descritto conferisce al PBL un tipico andamento giorno-notte, schematizzato in figura 5.1. Le condizioni convettive cominciano ad interessare l'atmosfera circa mezz'ora dopo il sorgere del sole, e l'altezza del PBL continua poi ad aumentare sino a raggiungere il suo valore massimo nel tardo pomeriggio, quando la temperatura superficiale del suolo presenta il suo valore più alto.

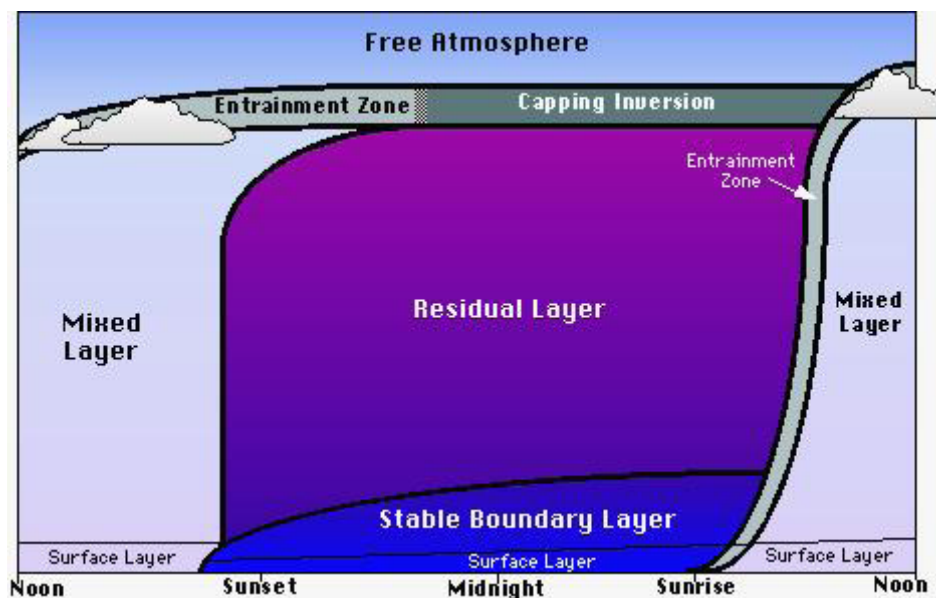


Figura 5.1 – Struttura schematica dello strato limite planetario che si sviluppa sopra la superficie terrestre, in un ciclo giornaliero

Si distinguono tre principali strutture, lo strato rimescolato (Mixed Layer o ML), lo strato residuale (Residual Layer o RL) e lo strato limite stabile (Stable Boundary Layer o SBL) che saranno descritte nel dettaglio di seguito. In particolare, quando la turbolenza convettiva domina il mixing layer, esso prende il nome di strato limite convettivo (Convective Boundary Layer o CBL). In presenza di nuvole, al di sopra del ML, si trova un ulteriore strato detto cloud layer. Alla sommità del PBL si trova uno strato atmosferico, detto Entrainment Zone (EZ), che cattura l'aria della libera atmosfera trasferendola nel ML. In esso si sviluppa una condizione di inversione termica, vale a dire un incremento della temperatura con la quota, che conferisce una grande stabilità e blocca la propagazione delle correnti termiche ascendenti al di fuori del PBL, confinando la turbolenza nello strato limite.

A contatto con la superficie terrestre è possibile individuare (vedi figura 5.1) un ulteriore strato, detto strato superficiale (Surface Layer o SL), che costituisce il fondo del BL: in esso i flussi turbolenti e le sollecitazioni dalla superficie sono relativamente costanti, con variazioni della loro intensità di meno del 10%. Pertanto l'altezza totale dello strato superficiale costituisce il 10% dell'altezza totale del PBL. Sopra questo strato si sviluppa il Mixed Layer o lo Stable Boundary Layer in base alla temperatura [58].

5.3.2 Misure Lidar dello Strato Limite Planetario

Nel mese di luglio sono state eseguite misure con il nostro sistema Lidar, operante alla lunghezza d'onda di 355 nm, per osservare l'andamento dello Strato Limite Planetario nell'arco delle 24 ore. Come detto in precedenza, la zona scelta per il monitoraggio è stata quella dell'Università di Roma " Tor Vergata" [52, 56].

Le misure serali hanno avuto inizio alle 20:15 e sono terminate alle 23:15 del giorno 7 luglio 2008 e sono state riprese il giorno seguente alle 7.00 e concluse alle 15.00.

Il software, appositamente sviluppato, legge in ingresso tutti i file media ed i rispettivi file di set-up contenuti nella cartella nominata come il giorno delle misure, e per ogni file media elabora i dati sperimentali, li normalizza al profilo molecolare teorico e calcola il coefficiente di retrodiffusione aerosolica (β_{aer}) al variare della quota.

La figura 5.2 mostra un segnale acquisito, mentre la figura 5.3 riporta un esempio del profilo in quota del coefficiente di retrodiffusione dovuto agli aerosol (β_{aer}) relativo alle ore 23:00.

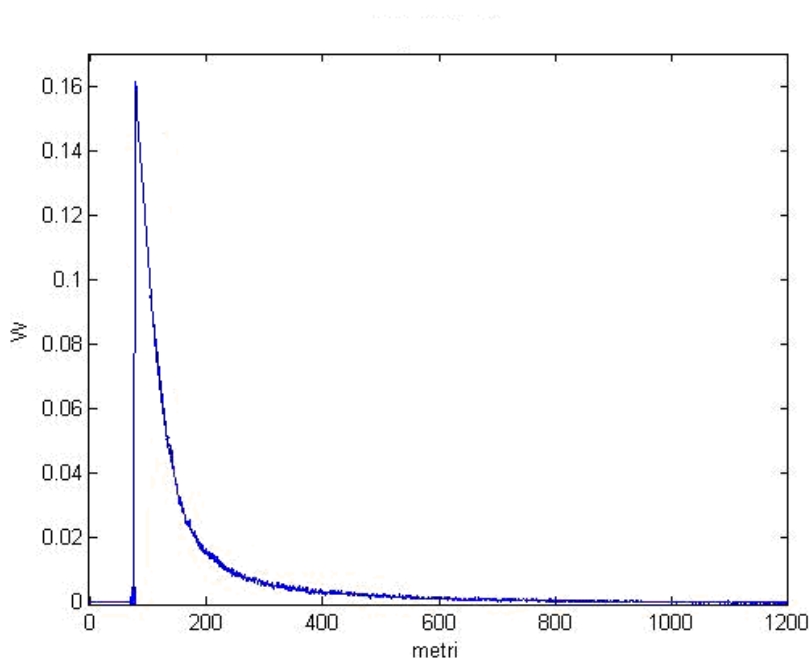


Figura 5.2 – Segnale sperimentale elaborato relativo alle misure del 07/07/2008

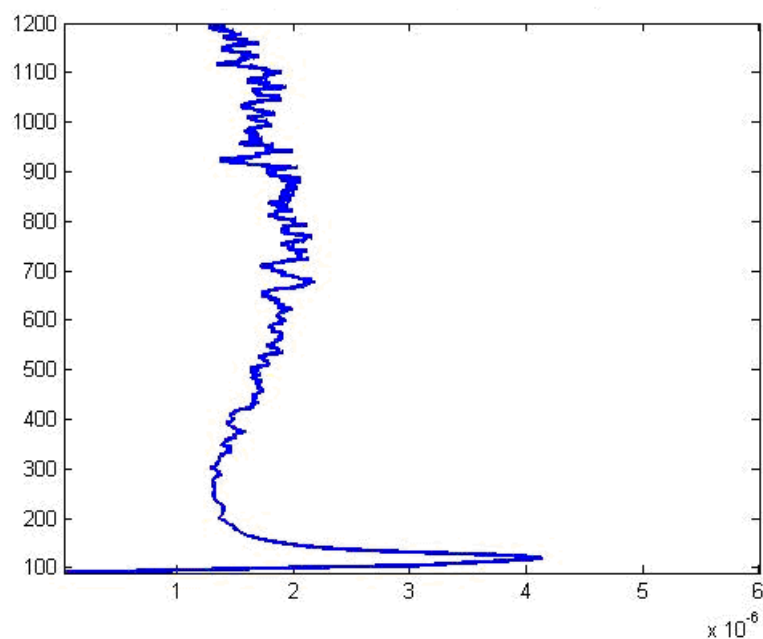


Figura 5.3 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione degli aerosol ($m^{-1}\cdot sr^{-1}$) con la quota relativo alle misure del 07/07/2008

Quest'ultimo fornisce indicazioni in quota sulla distribuzione di aerosol ad un dato intervallo temporale. Si denota la presenza di una struttura aerosolica all'interno del PBL che si concentra principalmente nei primi 50 metri [51].

Il software rende possibile la costruzione di mappe di concentrazione degli aerosol, in un fissato intervallo temporale, che descrivono l'evoluzione del particolato atmosferico in funzione dell'altezza. In questo caso particolare, è stata presa in considerazione una parte dell'atmosfera fino a 1200 metri in modo da riuscire ad ottenere indicazioni sulla presenza di aerosol urbani.

In figura 5.4 è stata raffigurata la mappa dei segnali acquisiti nel giorno 7 luglio 2008.

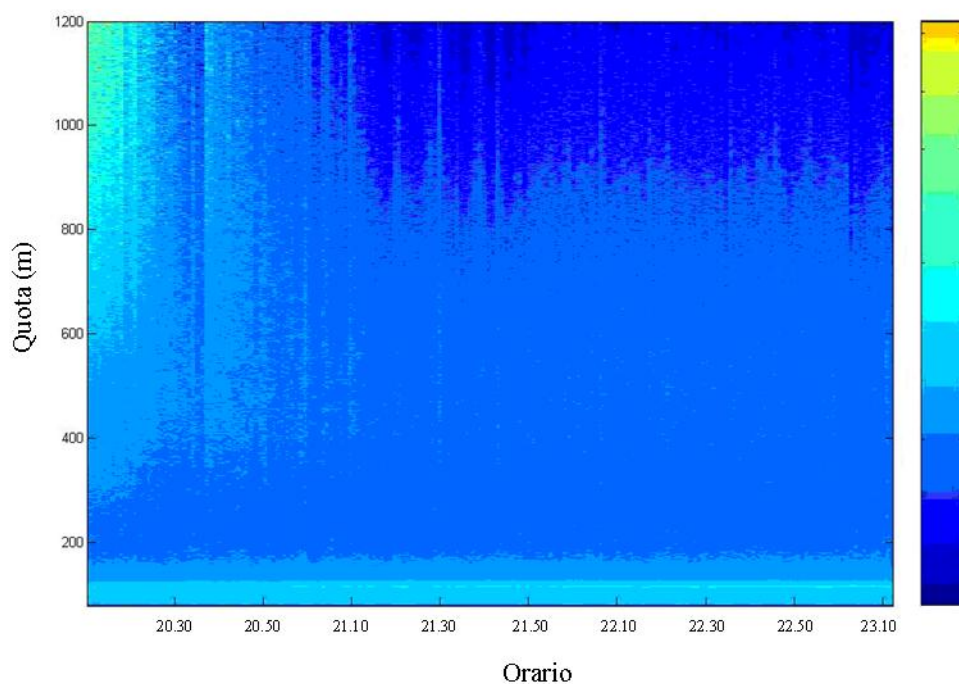


Figura 5.4 – Andamento del PBL dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08

Sull'asse delle ascisse è riportato il numero progressivo delle acquisizioni salvate all'interno dei file media, e sulle ordinate le quote dell'atmosfera. Ogni ora sono stati salvati 120 file.

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 poco inquinata) al rosso (atmosfera molto inquinata). A causa di problemi verificatisi con l'allineamento del sistema è stato necessario interrompere le misure dalle ore 20:10 alle 21:10, i risultati quindi non contengono informazioni concernenti questa fascia oraria che, come detto prima, corrisponde ad un numero di file salvati pari a circa 120.

Nella mappa sono distinguibili due scenari atmosferici: i primi 20 file si riferiscono ad un orario serale in cui è evidente la discesa progressiva del CBL (strato limite convettivo), il suo completo decadimento si osserva dopo la ripresa delle acquisizioni, ossia dalle ore 21:10, quando si origina lo strato limite stabile, nel quale si deposita la concentrazione maggiore di inquinanti, in conseguenza del raffreddamento della superficie 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.

Durante le acquisizioni le condizioni meteorologiche si sono mantenute pressoché stabili. Nelle figure seguenti (figure. 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8) vengono mostrati i profili delle medie orarie di alcune variabili atmosferiche, i cui valori risultano correlati all' andamento del PBL.

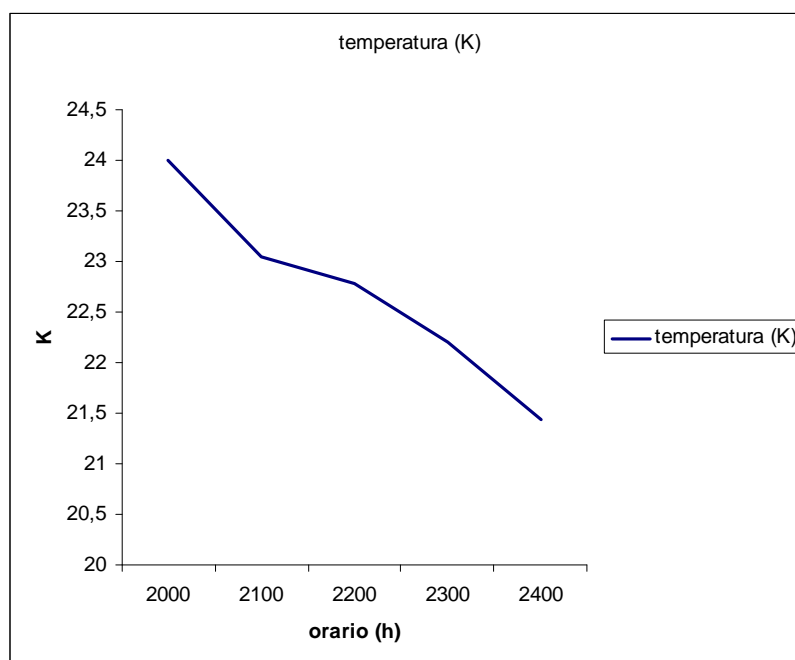


Figura 5.5 – Andamento della temperatura a livello del suolo dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08

L'andamento della temperatura in figura 5.6 mostra un raffreddamento dell'atmosfera al suolo che implica scarsa convezione e turbolenza.

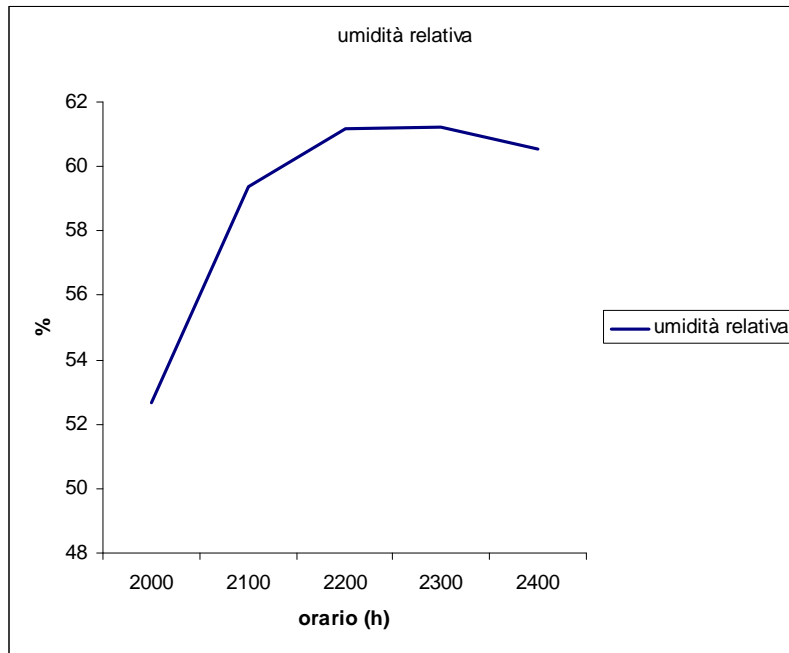


Figura 5.6 – Andamento dell'umidità relativa (%) dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08

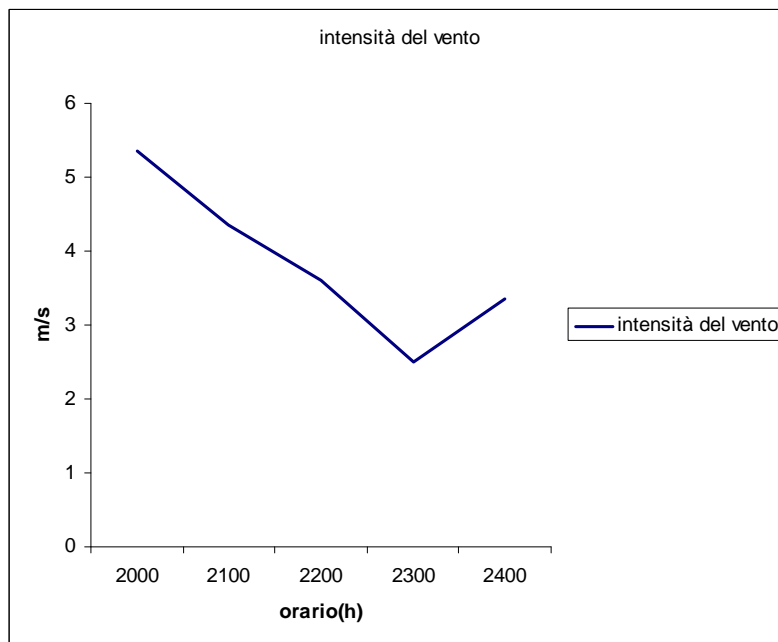


Figura 5.7 – Andamento della velocità del vento (m/s) a livello dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08

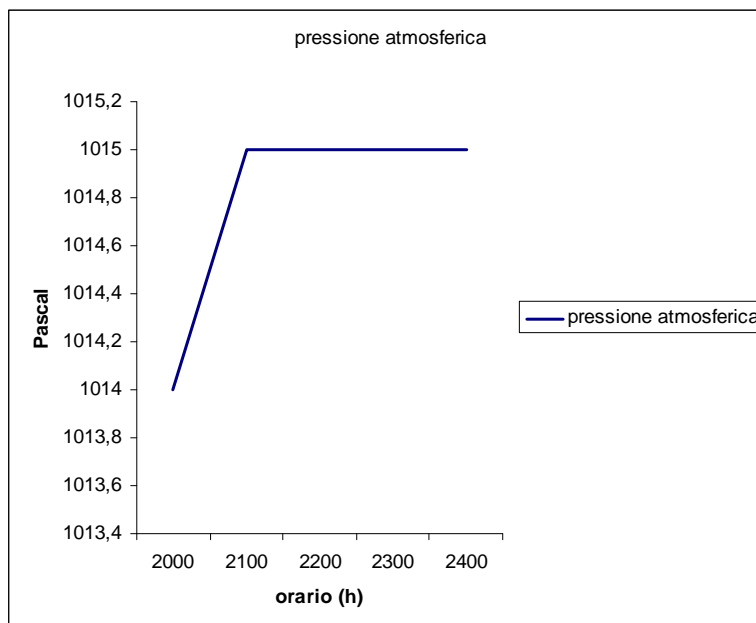


Figura 5.8 – Andamento della pressione atmosferica (Pascal) a livello del suolo dalle 20.00 alle 23.00 del giorno 07/07/08

L'origine dello strato limite stabile si manifesta nella stessa fascia oraria in cui si riscontra un'evidente diminuzione della temperatura a livello del suolo. All'aumentare della pressione atmosferica la struttura del PBL diventa sempre più compatta e si addensa maggiormente in prossimità della superficie. L'intensità del vento diminuisce con il passare delle ore fino a mezzanotte, contribuendo di fatto al mantenimento delle condizioni atmosferiche stabili ed al diminuire della turbolenza.

E' interessante, per seguire l'andamento giornaliero del PBL, acquisire dati nell'arco di tempo a cavallo del tramonto e dell'alba. A questo proposito sono state riprese le acquisizioni l'8 luglio alle ore 7:00 fino alle 15:00. Sono stati elaborati i dati sperimentali relativi alle medie effettuate ogni 300 spari contenuti nei 658 file-media. Ad ogni ora corrispondono 82 file salvati.

La figura 5.9 mostra un esempio del profilo in quota del coefficiente di backscattering aerosolitico relativo alle ore 10:00 calcolato tramite il software.

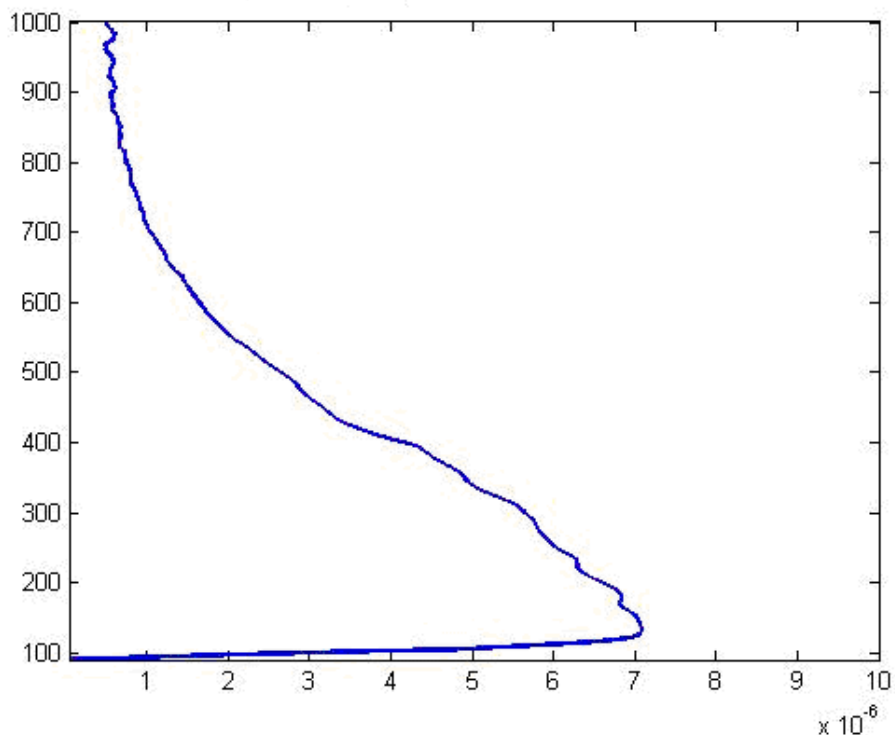


Figura 5.9 – Andamento del coefficiente di retrodiffusione degli aerosol ($m^{-1}\cdot sr^{-1}$) con la quota relativo alle misure del 07/07/2008.

A differenza di quanto mostrato in figura 5.5 riguardo alle misure notturne, il profilo di cui sopra presenta una distribuzione diurna degli aerosol più uniforme e protratta verso l'alto per via dei moti convettivi che la allontanano dalla terra spingendola verso l'alta troposfera [54, 55].

La presenza e l'evoluzione del particolato atmosferico in funzione dell'altezza sino ai primi 1000 metri è rappresentato dalla mappa sottostante.

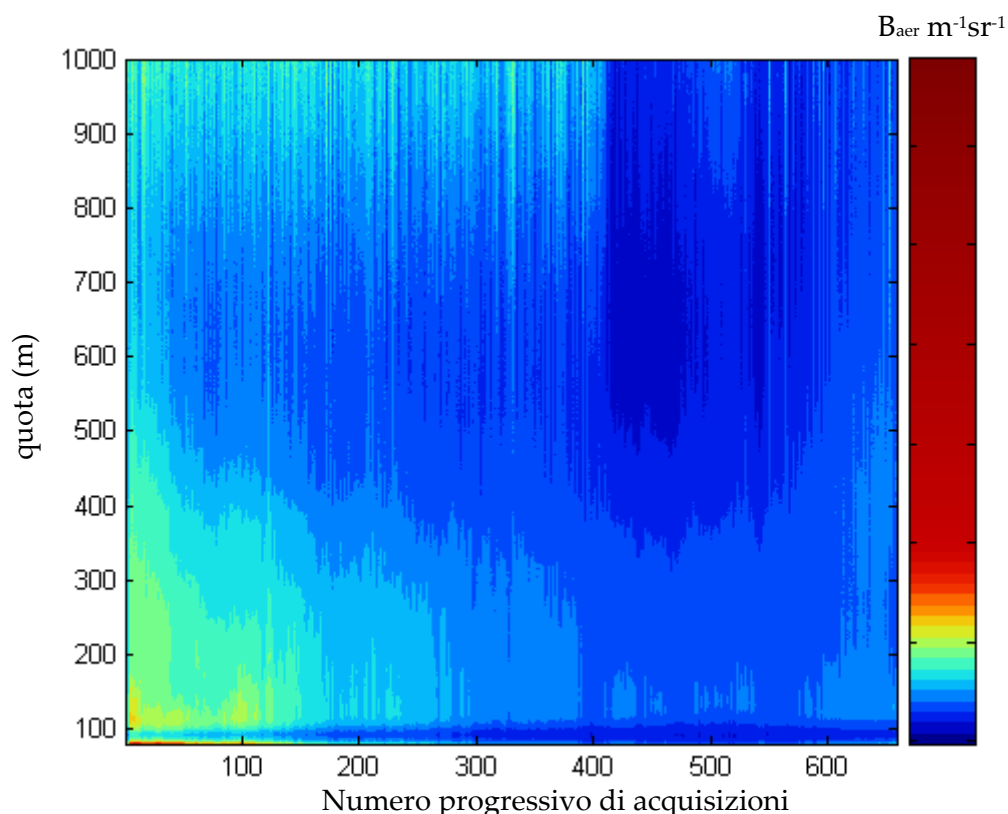


Figura 5.10 – Andamento del PBL dalle 7.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08

La mappa tematica mostra che, a partire dal sorgere del sole, l'aumento della temperatura ambientale ed il conseguente riscaldamento del suolo sviluppa lo strato limite convettivo dove si generano correnti d'aria calda ascendenti con un alto contenuto di particolato e correnti d'aria fredda discendenti che, in continuo rimescolamento, conferiscono uniformità verticale e una diluizione degli aerosol sino alla minimizzazione della loro concentrazione locale favorita da un aumento della velocità del vento a partire dalle ore 11.00 come evidente dalla figura 5.10. L'alto valore degli aerosol a bassa quota è, molto probabilmente legato alla presenza di un intenso traffico veicolare nelle prime ore della mattinata, che danno un forte incremento locale.

Di seguito è mostrato l'andamento della temperatura (figura 5.11), dell'umidità relativa (figura 5.12), della velocità del vento (figura 5.13) e della pressione atmosferica (figura 5.14) nella fascia oraria in cui sono state effettuate le misure.

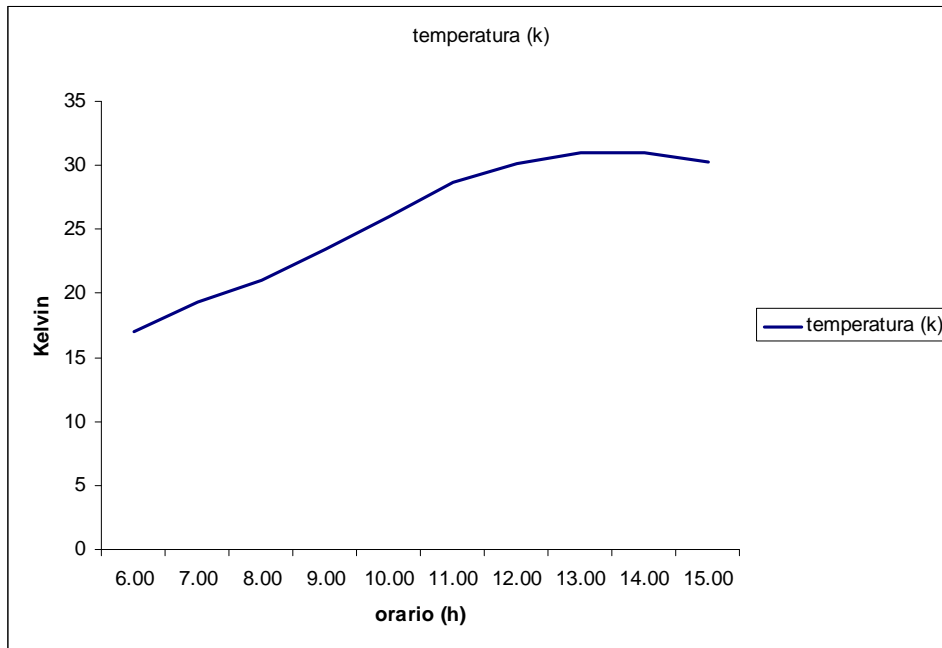


Figura 5.11 – Andamento della temperatura(K) a livello del suolo dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08

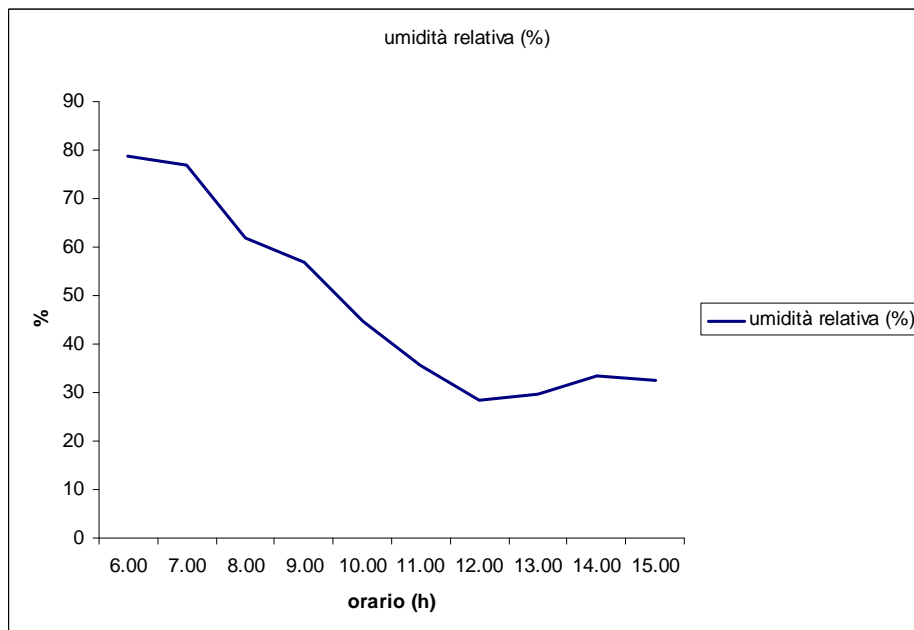


Figura 5.12 – Andamento dell'umidità relativa(%) dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08

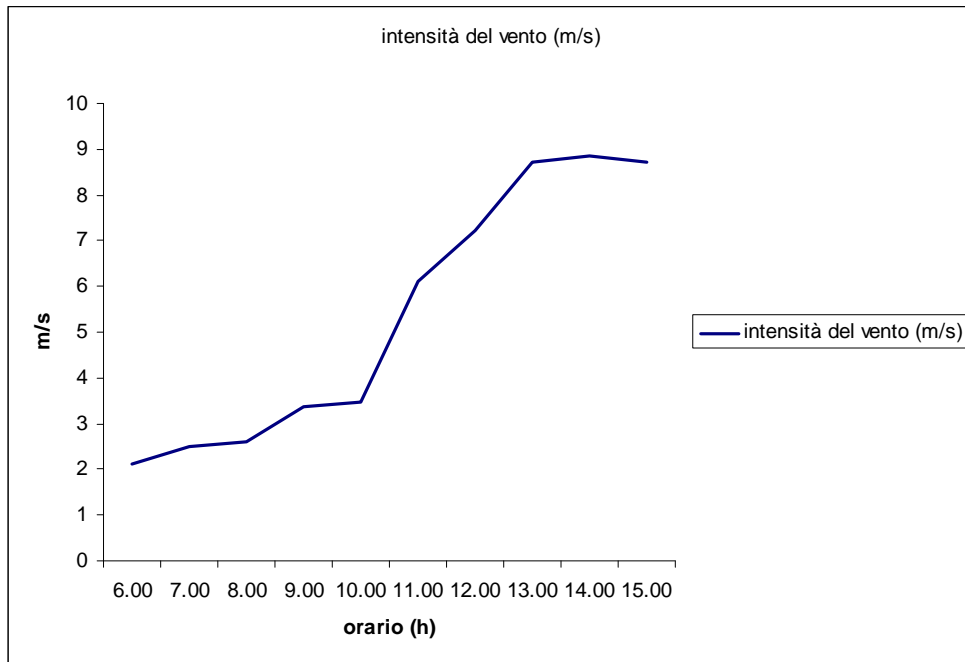


Figura 5.13 – Andamento della velocità del vento (m/s) a livello dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08

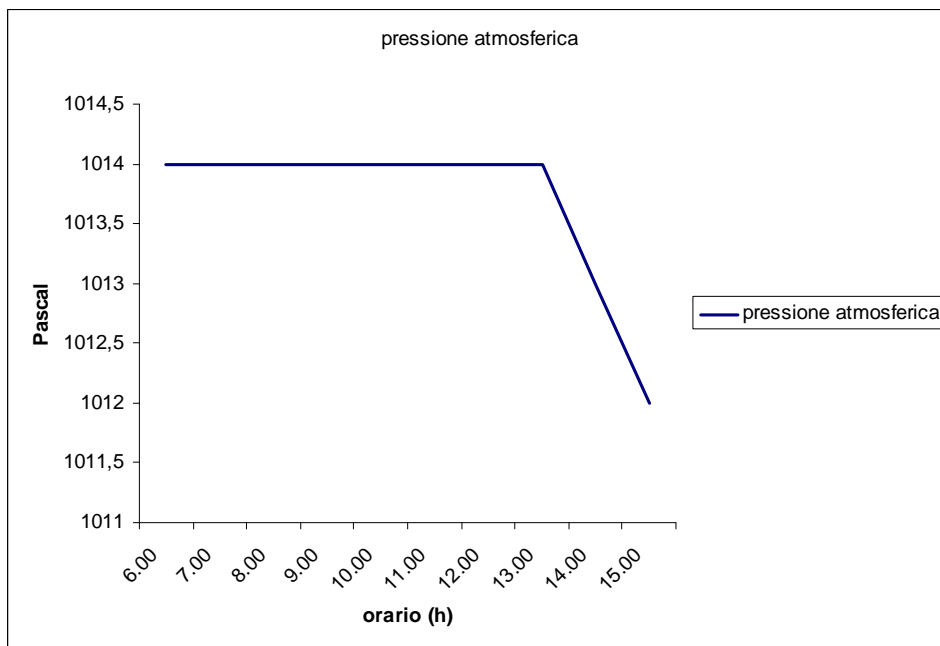


Figura 5.14 – Andamento della pressione atmosferica (Pascal) a livello del suolo dalle 6.00 alle 15.00 del giorno 08/07/08

5.4 Conclusioni

Durante le giornate del 7 ed 8 luglio 2008 sono state eseguite misure dell'andamento giornaliero del PBL direzionando la sorgente Laser in verticale ed utilizzando la lunghezza d'onda 355 nm. L'analisi delle mappe tematiche costruite riporta un' evidente correlazione con i dati meteorologici relativi agli orari di misura. I dati serali del 7 luglio mostrano dalle ore 21:10 l'origine dello strato limite stabile, nel quale si deposita la concentrazione maggiore di inquinanti. Questo fenomeno è legato ad una diminuzione della temperatura a livello del suolo, ad un aumento della pressione atmosferica e ad una diminuzione della velocità del vento. Lo sviluppo dello strato limite convettivo, favorito da un riscaldamento del suolo e da una diminuzione della pressione atmosferica, è evidente nella mappa relativa alle misure diurne effettuate il giorno successivo dalle ore 7:00 alle ore 15:00.

Queste misure sono state pensate come test di verifica per il controllo remoto del SAI. Infatti, il sistema, posizionato nel piazzale dell'Università, è stato totalmente gestito tramite una sala controllo allestita all'interno dei nostri laboratori. Da questa postazione è stato possibile inoltre, controllare sia la sequenza delle misure effettuate che il buon funzionamento di tutta la strumentazione di cui si compone il SAI.

Il sistema ha mostrato, quindi, di essere totalmente gestibile in remoto.

Capitolo 6.

Software per la riduzione dei falsi allarmi

6.1 Introduzione

Il segnale Lidar è sensibile alle variazioni di densità atmosferica che si ripercuotono sulla radiazione diffusa alla diverse distanza da cui il segnale è diffuso. L'elevata efficienza di scattering delle particelle del fumo sviluppate in un incendio boschivo, sono, come si è dimostrato, facilmente rivelabili con stazioni sistemi di tipo Lidar/Dial [23, 25, 26].

Un problema che merita un'attenzione particolare è sicuramente la riduzione dei falsi allarmi che si possono presentare durante il funzionamento del sistema per la rivelazione precoce degli incendi boschivi [59, 60, 61, 62, 63, 64].

I falsi allarmi possono essere indotti da fenomeni di vario tipo quali ad esempio:

- presenza di fenomeni atmosferici
- mancanza di conoscenza della distribuzione aerosolica nell'atmosfera
- dipendenza dalle condizioni atmosferiche
- cambiamenti repentini dell'indice di rifrazione atmosferico
- altri fattori di origine strumentale

Usare modelli parametrici per processare il segnale lidar risulta molto difficoltoso poiché si possono avere variazioni notevoli di alcune variabili fondamentali durante la fase di acquisizione dei segnali [65, 66].

La strada intrapresa è stata, quindi, quella di sviluppare un programma in grado di discriminare i picchi dovuti alla presenza di un incendio da quelli causati da altri fattori, così da minimizzare il numero dei falsi allarmi [66, 67, 68].

In questo capitolo, sarà presentato il programma ed illustrato il suo funzionamento durante la terza campagna di misure realizzata a luglio 2008 sempre nel Parco Nazionale d' Abruzzo.

6.2 Software riconoscimento picchi

Il software per il riconoscimento dei picchi dovuti alla presenza di fumo emesso dalla combustione di materiale vegetale è stato sviluppato in MATLAB.

Analizziamo le parti fondamentali di cui si compone il programma. La prima consiste nel ricavare le posizioni dei target fissi, presenti lungo una determinata direzione di sparo, attraverso il caricamento della mappa orografica tridimensionale della zona posta sotto monitoraggio. Nel caso questa non sia disponibile, come per la Valle di Canneto, può essere ottenuta tramite una scansione "bianca" (ovvero in assenza di fumo) dell'area di interesse.

In figura 6.1 è riportato il diagramma di flusso del programma realizzato a tale scopo. Il software, inizia con l'elaborazione del segnale Lidar di ritorno, lo converte in base al file di set-up salvato, a questo punto ricerca i picchi dovuti ai target fissi e salva le posizioni a cui li ha individuati. Il programma termina quando il sistema ha effettuato l'intera scansione della zona posta sotto monitoraggio, creando un matrice dove le colonne rappresentano il numero di direzioni investigate dal laser e le righe la posizione degli ostacoli trovati.

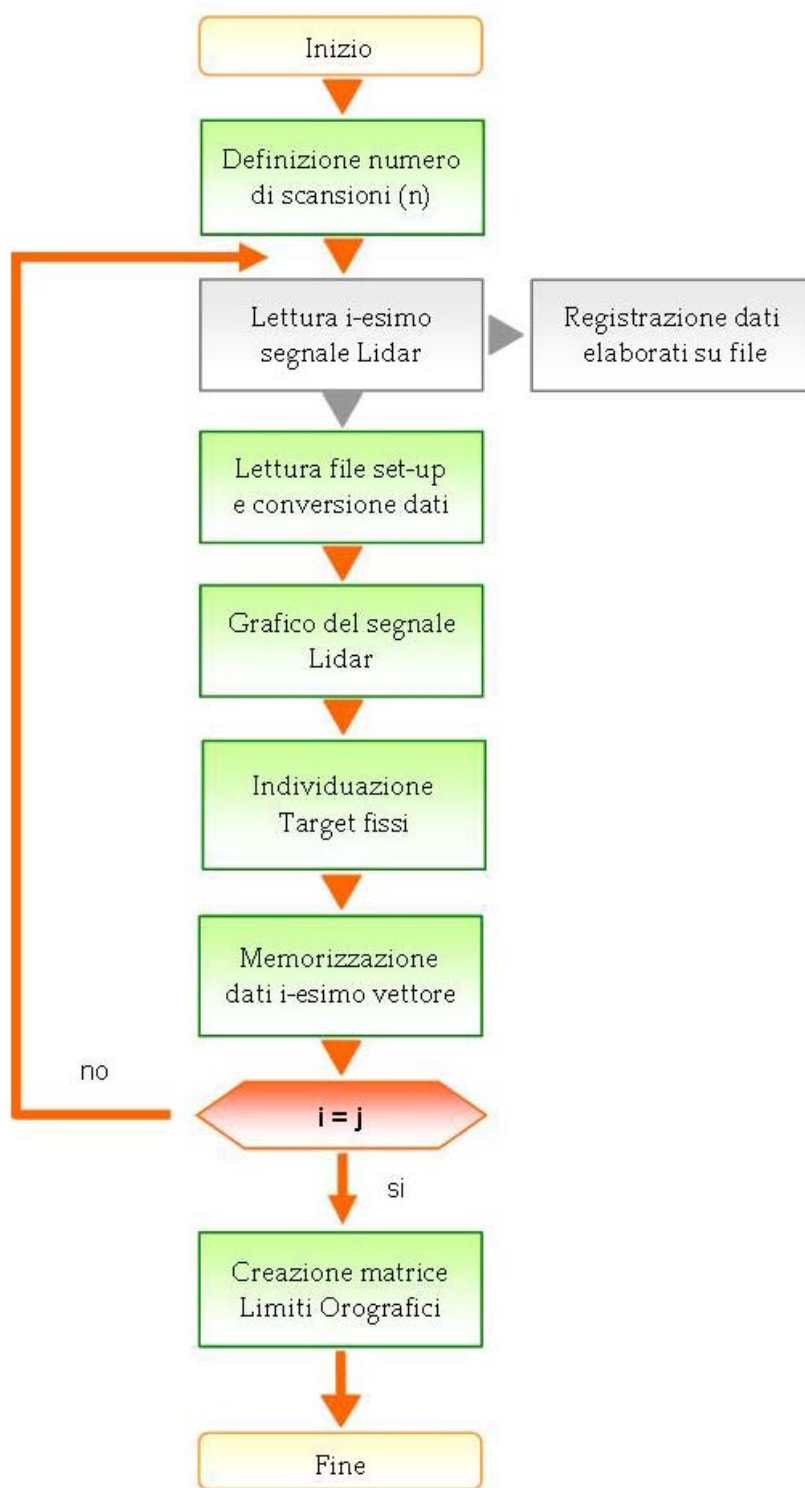


Figura 6.1 – Flow-chart programma creazione mappa orografica

Ottenute, quindi, tutte le informazioni riguardanti le posizioni dei target fissi, queste saranno richiamate nel programma principale per stabilire se si è in presenza di un picco da fumo o meno (allarme o non allarme).

In figura 6.2 è riportato il diagramma di flusso del programma di riconoscimento dei picchi da fumo, mentre nella figura seguente (fig. 6.3) è mostrato il flow chart della routine principale in esso presente.

Per ogni direzione vengono effettuati 100 spari e creato un segnale-media corrispondente. Quest'ultimo viene elaborato, così, da individuare i picchi in esso presenti. Questi sono selezionati sulla base di alcuni parametri [68, 69, 70, 71], quali numero di punti a metà altezza, soglia, ampiezza dello smooth ed ampiezza di fit, stabili dopo un'accurata analisi delle caratteristiche dei picchi dovuti alla presenza di un incendio boschivo ottenuti durante le campagne precedenti.

La definizione di questi parametri è fondamentale per escludere dall'analisi tutti quei picchi che sicuramente non sono riconducibili ad un fumo, diminuendo così il tempo di elaborazione del software necessario per generare un allarme.

I picchi selezionati sono, quindi, confrontati con quelli che indicano la presenza di un target fisso lungo la direzione di sparo che si sta analizzando, che potrebbero creare un falso allarme.

L'allarme viene dato solo se il software individua un picco "anomalo" ovvero non riconducibile a nessuno di quelli ricavati dalla mappa orografica lungo quella data direzione di sparo.

In questo caso, sulla mappa orografica visualizzata, oltre ad essere indicata la direzione in cui il sistema di rivelazione sta operando, nonché le coordinate GPS del punto in cui il sistema SAI è stato installato, viene riportata la distanza rispetto alla sorgente laser, a cui è stato individuato il fumo e fornite le esatte coordinate per la sua localizzazione, facilitando così l'intervento delle squadre di soccorso.

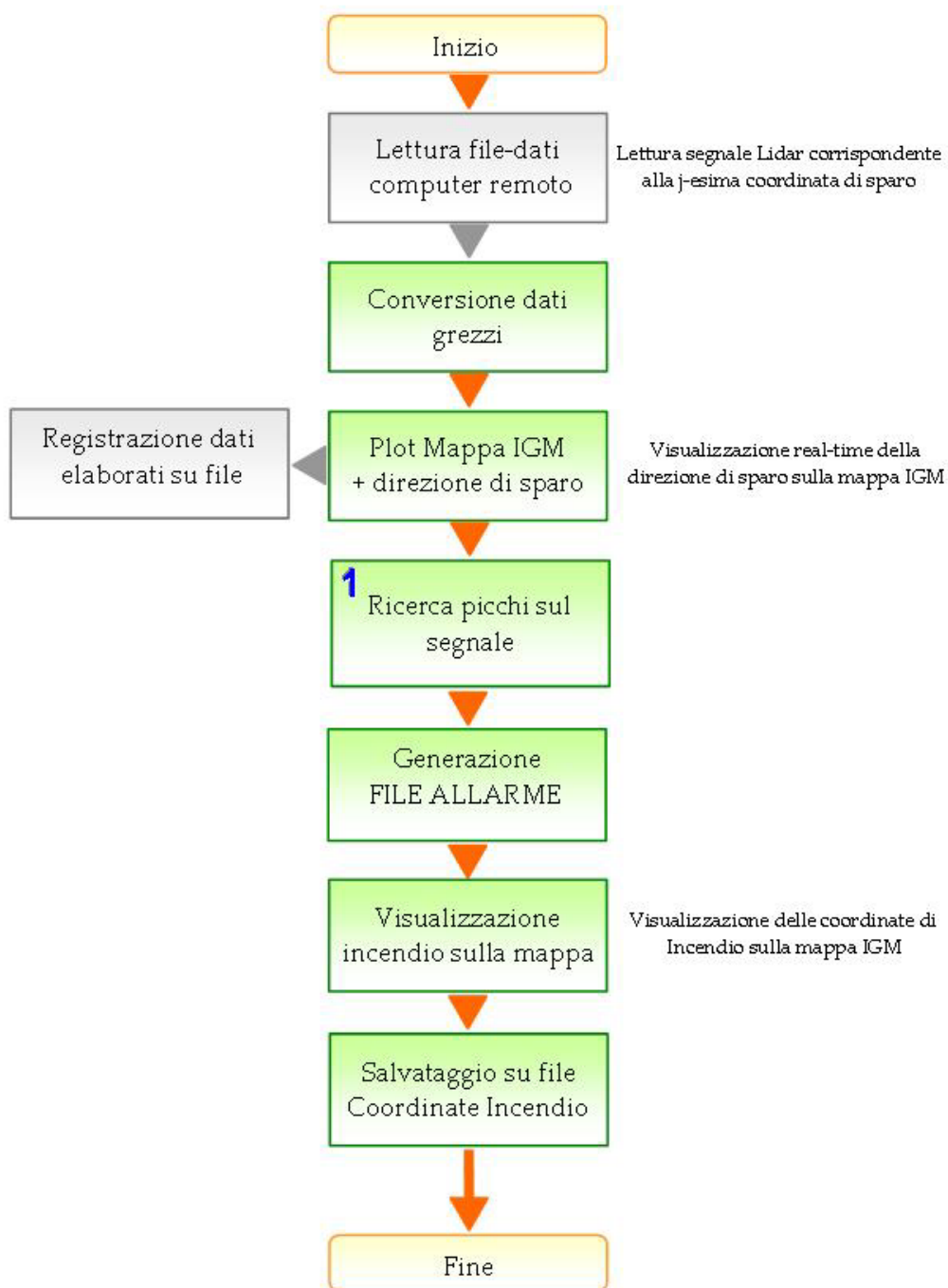


Figura 6.2 – Flow-chart programma principale

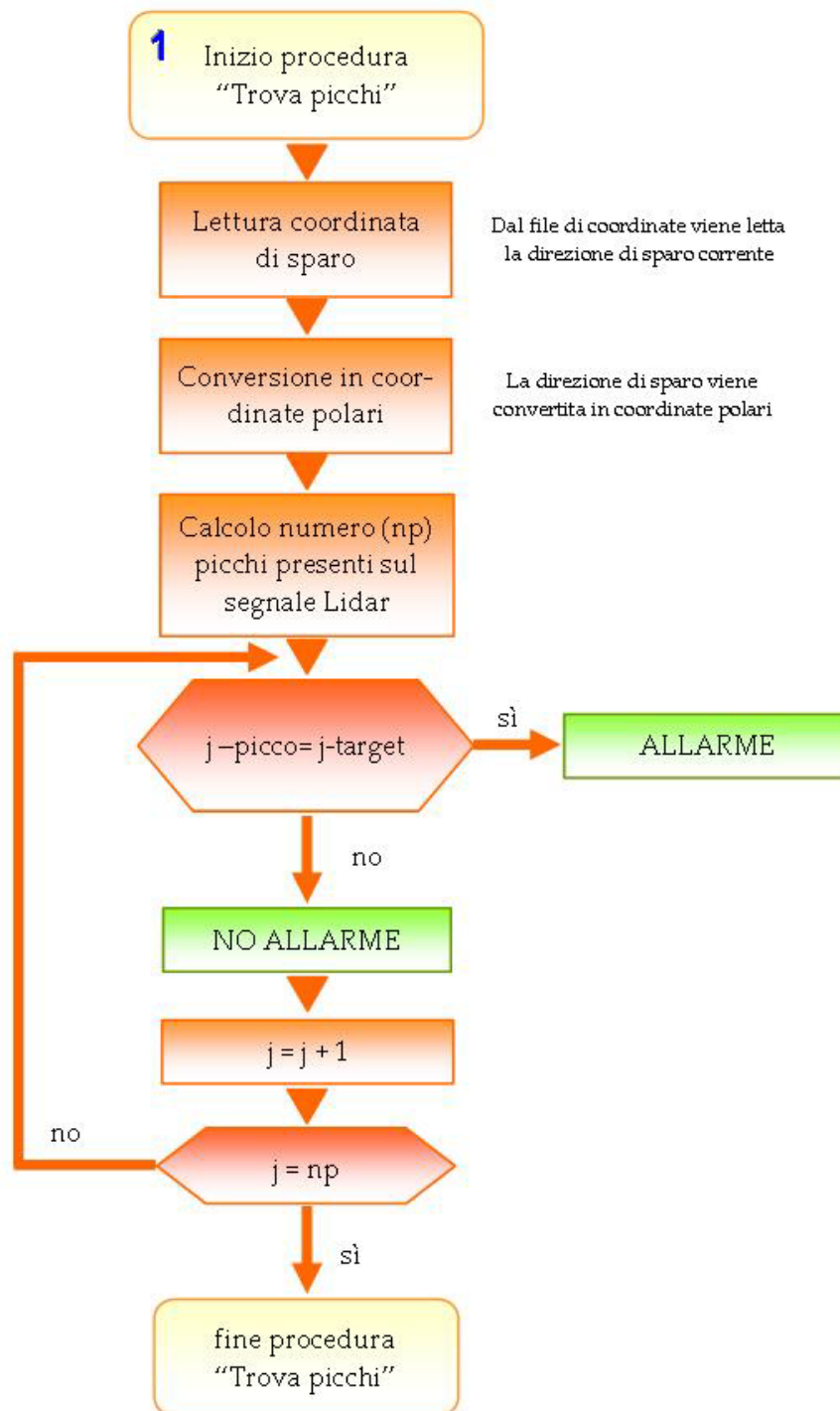


Figura 6.3 – Flow-chart routine "Trova-picchi"

6.3 Gestione acquisizione e controllo dei falsi allarmi.

Come visto nel capitolo precedente, il sistema SAI è stato dotato di tutta la strumentazione necessaria per il suo controllo remoto, ovvero il computer che gestisce localmente la strumentazione può essere controllato tramite un computer presente in una sala controllo

Purtroppo nel sito di misura scelto, non c'è nessuna copertura da parte di nessun gestore telefonico, così il controllo in remoto del sistema è stato simulato collegando due computer, quello locale installato sul carrello (PCSAI) ed il computer che gestisce il software di riconoscimento dei picchi dovuti al fumo (PCElab), mediante un dispositivo wireless.

Analizziamo, ora, le attività svolte da ciascun sistema per gestire la misura ed il controllo dei falsi allarmi.

Il PCElab, una volta addestrato sul sito di misura mediante scansioni bianche o tramite l'acquisizione di carte orografiche tridimensionali del luogo da monitorare, definisce il file di coordinate di sparo *coord.dat*. Tale file contiene al suo interno una matrice Nx3 colonne di dati, dove:

- la prima colonna indica il numero di acquisizione;
- la seconda contiene la posizione rispetto all'orizzontale;
- la terza rappresenta la posizione rispetto alla quota;

Il file dati è salvato nella directory C:\lidar\ggmmaa\ relativa al giorno in cui vengono eseguite le misure. Il PCElab genera, inoltre, un secondo file dal nome *allarme.dat* in cui sono salvate le condizioni di allarme *di vero o falso* a secondo dei risultati in output del software di riconoscimento. Il PCSAI appena inizia le misure legge il file *coord.dat*, salvato nel hard-disk di PCElab eseguendo per *ogni* coordinata di sparo un numero fissato di acquisizioni pari a 100 (Il numero di spari per scansione è stato scelto in base all'esperienza delle precedenti campagne di misura).

Per ogni coppia di coordinate il PCSAI esegue le seguenti istruzioni:

1. posiziona lo strumento nella direzione indicata dalla coppia di coordinate;
2. esegue il numero di spari fissati dall'utente;
3. salva i dati acquisiti sull'hard-disk di PCElab nella directory C:\lidar\ggmmaa\
con il nome misura#.dat;
4. legge il file *allarme.dat*

Nel caso in cui nel file *allarme.dat* vi è una condizione di vero il sistema legge le coordinate salvate nel file *allarme* eseguendo un set di misure di controllo lungo la direzione definita dal software. Salva il set di dati sempre nella stessa directory sull'hard-disk di PCElab. A questo punto il sistema ritorna ad eseguire nuovamente la scansione ripartendo dalla posizione successiva all'ultimo set di dati acquisiti.

Nel caso in cui la condizione nel file *allarme.dat* è falsa il PCSAI continua nella scansione. In caso di allarme vengono inviati lo stato di allarme e le coordinate del punto topografico in cui con buona probabilità è in corso un incendio. In caso negativo continua con l'elaborazione dei dati successivi.

6.4 Terza campagna di misure

La terza campagna di misure ha avuto luogo nel mese di luglio 2008 sempre presso il Santuario della Madonna di Canneto, località Settefrati.

Come detto all'inizio di questo capitolo, scopo principale di queste misure è stata la verifica e l'ottimizzazione del software di riconoscimento delle piume di fumo per la minimizzazione dei falsi allarmi.

Il sistema di monitoraggio è stato posizionato nel piazzale antistante il Santuario e precisamente alle coordinate: 41°40'44.9" N e 13°54'30.3" E.

Il fuoco controllato è stato acceso, nella valle, ad una distanza di circa 800 m dalla sorgente laser lungo la direzione Nord.

Come combustibile vegetale sono stati utilizzati rami e foglie di faggio, specie vegetale predominante in questa zona. Una volta acceso, il fuoco è stato alimentato aggiungendo di volta in volta piccole quantità di materiale, così da ottenere l'emissione di un fumo "costante" in atmosfera fino al termine delle nostre misure.

Prima di accendere il fuoco, è stata effettuata una scansione in "bianco" della valle per la ricostruzione della mappa orografica, perché, come detto in precedenza, questa attualmente non è disponibile commercialmente.

L'area posta sotto monitoraggio ha un campo di vista di circa 20° intorno alla direzione 12°Nord rispetto alla Valle di Canneto (figura 4.5 capitolo 4). In questo campo di vista sono state acquisiti segnali su 31 direzioni per la lunghezza d'onda 1064 nm mediando ogni volta su 100 spari.

Definita quindi l'area d'interesse, dal computer PCElab, pc dal quale è possibile gestire in remoto tutta la strumentazione SAI, viene dato inizio alla scansione della zona, in base al file di coordinate generato precedentemente.

In figura 6.4 è mostrato l'output del programma in caso non sia stato rivelato nessun incendio lungo la direzione in cui il laser sta sparando (freccia blu). Sull'asse delle ascisse

e su quello delle ordinate sono riportati il numero di pixel, che possono essere facilmente convertiti in metri sapendo che 1 pixel corrisponde a 2.48 metri.

Ricordiamo che il software lavora in real-time, quindi per ogni sparo mostra sulla mappa la direzione corrente del fascio laser e genera un file di allarme VERO/FALSO.

Nella condizione di VERO, il programma è in grado di fornire l'esatta posizione topografica del punto in cui è stata rivelata la presenza di fumo da incendio fornendone le coordinate topografiche e stimando la distanza rispetto al sistema di monitoraggio.

Questa informazione è estremamente utile per rendere tempestivo l'intervento delle squadre di soccorso.

SAI: Elev. 1009 m 41° 40' 44.9" N

13° 54' 30.3" E

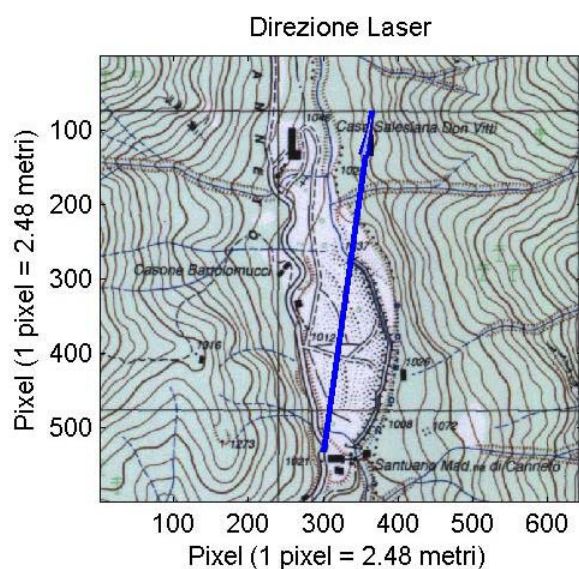


Figura 6.4 – In assenza di fumo il sistema procede nella sua scansione

Un esempio dell'uscita del programma in caso di rivalzione di incendio è mostrata nella figura 6.5.

Vediamo come il sistema SAI ha rivelato la presenza di fumo ad una distanza di 811 metri, rispetto alla sua posizione di installazione, fornito la direzione espressa in gradi, primi e secondi che sta monitorando, ed evidenziato sulla mappa tramite una flag (stella

rossa) il punto in cui c'è stata l'interazione tra laser e particolato emesso dalla combustione di materiale vegetale (picco sul segnale Lidar di ritorno). Tutte queste informazioni sono importanti per facilitare, e rendere quindi tempistico, l'intervento delle squadre anti-incendio.

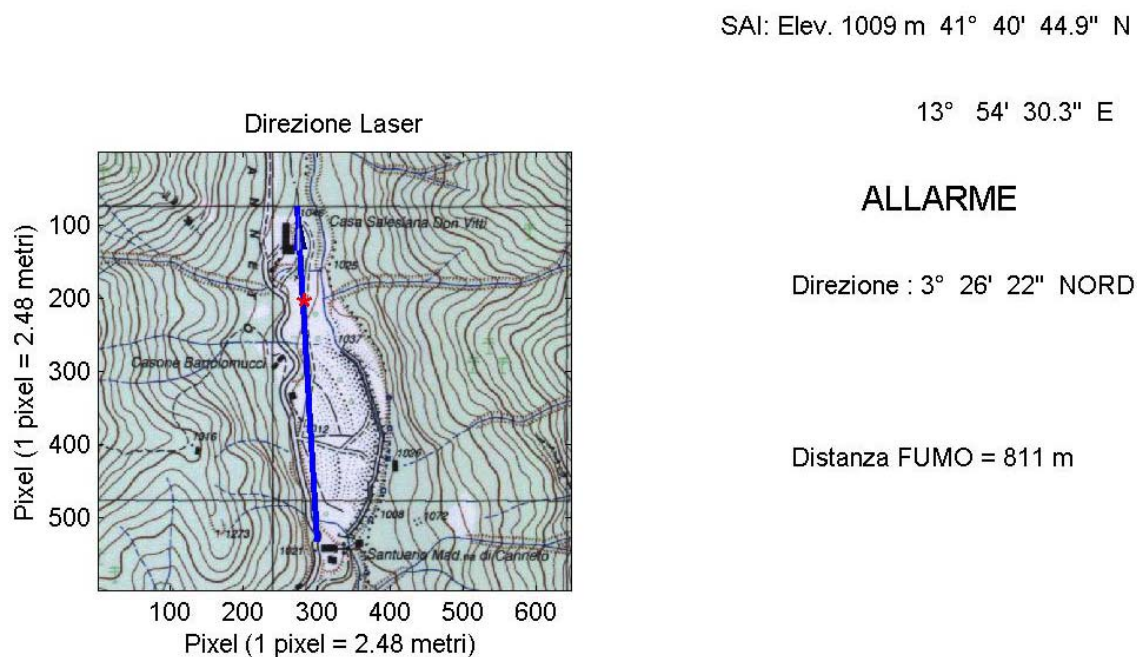


Figura 6.5 – Generazione file allarme per rivelazione fumo

In figura 6.6 è riportato il segnale Lidar corrispondente a questa direzione di sparo. Come è possibile vedere esso mostra un picco di notevole intensità, ad una distanza di 811 metri.

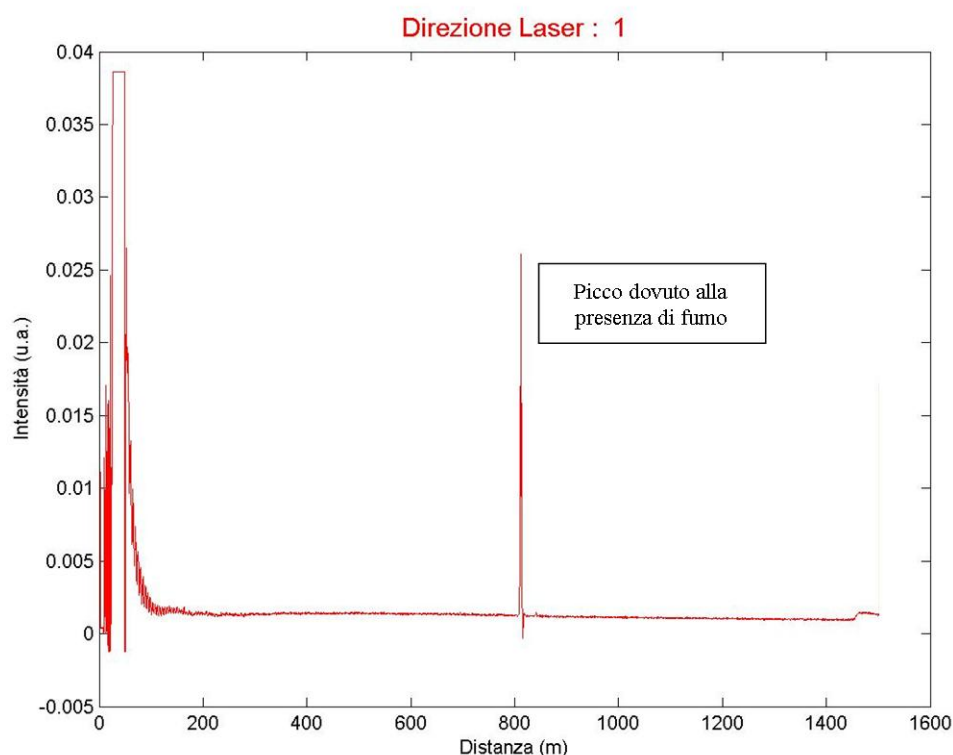


Figura 6.6 – Segnale Lidar acquisito lungo la direzione 1

Nella figura 6.7, è riportato un'altra situazione che si è verificata, ovvero che il sistema ha rivelato la presenza di fumo in due punti, uno ad una distanza di 854 metri e l'altro a 1142 metri, lungo la medesima direzione di sparo.

Questo è dovuto sicuramente alle condizioni meteo dei giorni di misura, ed in particolare alla direzione del vento che soffiava in direzione Nord, spostando il fumo rispetto al luogo in cui era stato acceso il fuoco.

In figura 6.8 è mostrato il corrispondente segnale di ritorno acquisito.

A questo punto, per conoscere il reale punto in cui il fuoco si è sviluppato è necessario sviluppare un software che sia in grado di prevedere, o meglio di ricostruire, le back-trajectory.

SAI: Elev. 1009 m 41° 40' 44.9" N

13° 54' 30.3" E

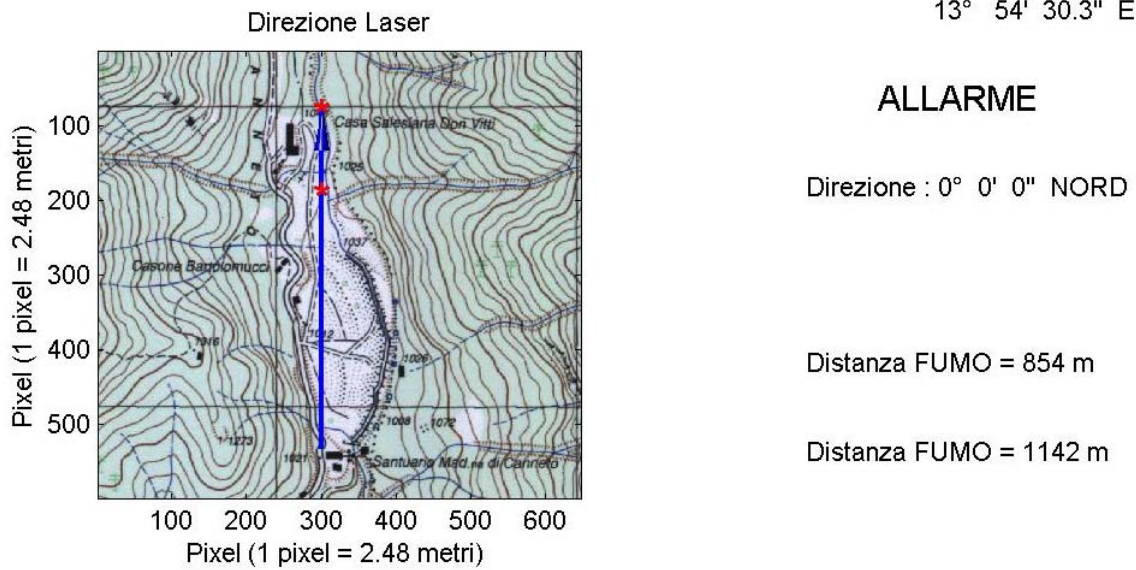


Figura 6.7 – Individuazione di due focolai e conseguente generazione file allarme

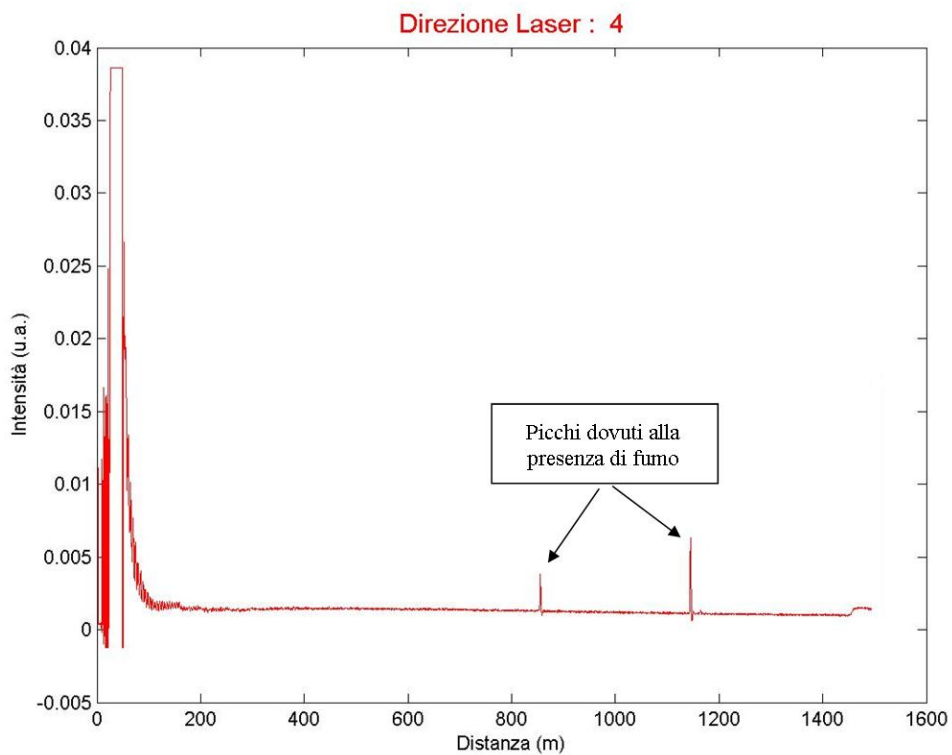


Figura 6.8 – Segnale Lidar acquisito lungo la direzione 4

6.5 Conclusioni

In questa campagna di misure è stato testato il software sviluppato per il riconoscimento delle piume di fumo, minimizzando il numero dei falsi allarmi. I risultati ottenuti sono molto soddisfacenti, infatti il sistema è stato in grado di discriminare i picchi dovuti alla presenza di fumo nella valle da quelli rappresentanti i target fissi in essa presenti. Per ogni allarme generato sono state fornite tutte le indicazioni fondamentali per la localizzazione dello smoke-plume da parte delle squadre di soccorso. Per conoscere il reale punto in cui il fuoco ha avuto origine, è necessario, però, inserire nel programma di riconoscimento dei picchi, una routine che consenta di ricostruire le back-trajectory del fumo.

Al termine di questa campagna, è stato realizzato un evento per la presentazione ufficiale del sistema. Questa si è tenuta l'11 luglio 2008 nella Valle di Canneto alla presenza di diverse autorità e di esperti nel settore.

In appendice A è riportata la locandina dell'evento ed alcune foto.

Conclusioni

Il problema degli incendi boschivi in Italia (e non solo) suscita ormai da qualche anno un interesse non più limitato ai soli addetti ai lavori. La crescita della sensibilità collettiva ai problemi della tutela dell'ambiente, l'attenzione dei mezzi di informazione, la portata dei danni economici arrecati dal fenomeno, hanno contribuito ad aumentare le forze impegnate, soprattutto nella stagione estiva, a ridurre la frequenza e l'estensione degli incendi boschivi.

Gli incendi dei boschi, pur seguendo l'andamento climatico, non si manifestano uniformemente sul territorio: ci sono delle zone dove questo pericolo è maggiore che in altre, come l'esperienza ed i fatti confermano di anno in anno.

Le condizioni che influenzano sia l'inizio che la prima propagazione dell'incendio, sono principalmente rappresentate da:

1. quantità d'acqua che si trova nei tessuti delle piante;
2. vento, che oltre a favorire l'afflusso dell'ossigeno, quale comburente, determina l'avanzamento della linea del fuoco e, quindi, nuovi punti d'inizio e di continuazione del fuoco;
3. quantità, dimensioni e disposizione dei materiali combustibili.

Per cercare di contrastare questo fenomeno si è reso, quindi, necessario adottare una serie di provvedimenti specifici per la tutela degli ambienti naturali dal fuoco; questi ultimi costituiscono un potenziamento di tutte quelle strutture già presenti sul territorio.

In questo processo di potenziamento si colloca, quindi, il nostro lavoro che ha portato alla realizzazione di un sistema Lidar per la rivelazione precoce di incendi boschivi.

In questa tesi, è stato mostrato come il dimostratore progettato abbia tutti i requisiti necessari per un suo utilizzo nel campo della lotta agli incendi boschivi.

Il sistema mobile, completamente automatizzato e gestibile in remoto è in grado di individuare un fumo emesso da un incendio boschivo effettuando sia misure della variazione della densità di particolato in atmosfera a seguito di un processo combustivo, sia misure della variazione della concentrazione di acqua. Infatti, l'acqua, tra i prodotti di combustione, è la sostanza rilasciata in maggiore quantità nella fase che precede la comparsa della fiamma e la produzione di particolato. Essendo questa rilevabile dalla strumentazione proposta consente la generazione di allarmi prima che l'incendio sia segnalato da altri sistemi. La prontezza del nostro sistema consente un altrettanto rapido intervento delle squadre di soccorso con conseguente riduzione dei danni.

Il sistema di rivelazione SAI è, inoltre, dotato di un software per la minimizzazione dei falsi allarmi, in grado di classificare i segnali Lidar quando siamo in presenza di fumo, dovuto ad incendi boschivi (caso allarme incendio) e, nel caso di assenza di fumo (non allarme). I parametri adibiti alla classificazione dei segnali sono stati ricavati dai dati sperimentali acquisiti durante le diverse campagne di misura effettuate. Quest'ultime ci hanno consentito di ottimizzare il funzionamento della strumentazione sia da un punto di vista hardware che software.

Resta, ancora, da sviluppare la parte che riguarda lo studio delle backtrajectory al fine di stabilire, una volta individuato il fumo in atmosfera, il punto di innesco dell'incendio.

Il lavoro svolto ed i risultati ottenuti consentono, quindi, di affermare che il dimostratore realizzato possiede tutte quelle caratteristiche fondamentali per la tutela e la salvaguardia del nostro patrimonio ambientale, quali prontezza, affidabilità e localizzazione topografica del fumo presente in atmosfera.

Ringraziamenti

Durante il percorso del mio dottorato di ricerca, ho vissuto esperienze formative interessanti ed impegnative delle quali ho potuto far tesoro anche grazie all'aiuto di alcune persone che desidero ringraziare per il loro fondamentale contributo.

Primo fra tutti il dott. Pasquale Gaudio, che ha investito la sua conoscenza e il suo tempo in interessanti confronti e decisivi contributi sull'intero lavoro svolto, consigliandomi e guidandomi costantemente.

Un doveroso ringraziamento va al prof. Carlo Bellecci, coordinatore di questo dottorato, per la possibilità offertami e per la sua disponibilità in ogni momento; un sentito ringraziamento va anche alla dott.ssa Maria Richetta, alla quale ho fatto spesso riferimento durante questi anni di lavoro.

Non posso esimermi dal ringraziare Eugenio Penco e Renato Marchetti per il loro fondamentale supporto nella mia attività di laboratorio. Grazie alla loro grandissima conoscenza delle tecnologie applicative ed alla loro professionalità, ho risolto moltissimi problemi di natura pratica e realizzativa.

Un grazie speciale va alla mia amica e collega Teresa, con quale ho condiviso le gioie e i dolori del tanto affascinante quanto difficile mondo della ricerca scientifica.

E' mio grande desiderio ringraziare anche tutti i colleghi dottorandi: Federica, Lucia, Andrea, Piergiorgio ed Ivan, con i quali ho condiviso questa esperienza e scambiato opinioni, sensazioni e idee in un clima sereno e vivace.

Grazie ad Alessia, la mia amica con "A" maiuscola, che mi è stata vicino in questi mesi con una pazienza infinita incoraggiandomi e sostenendomi nei momenti difficili.

Infine, un ringraziamento particolare va alla mia famiglia per essermi sempre stata vicino e avermi incoraggiata nelle mie scelte, e a mio marito per avermi consigliato e supportato in alcuni importanti momenti di questo percorso che ora si conclude.

Appendice

Locandina dell'evento ed alcune foto, della presentazione del SAI avvenuta l' 11 luglio 2008 presso la Valle di Canneto, località Settefrati.



Presentazione del sistema di rilevamento SAI* Sistema per l'Allerta precoce di Incendi boschivi

Venerdì 11 luglio 2008 alle ore 11.00
Settefrati (FR)

presso la sala conferenze del Santuario della Madonna di Canneto

Programma

- Ore 11.00 Saluto del Sindaco di Settefrati Ing. Lorenzo Malizia
- Ore 11.30 Presentazione del sistema - Prof. Carlo Bellecci
- Ore 12.00 Dimostrazione operativa di funzionalità tramite simulazione incendio (presso il piazzale antistante il Santuario) - Dr. Pasquale Gaudio
- Ore 13.00 Buffet presso i locali del Santuario

Come raggiungerci: autostrada Roma - Napoli, uscita Cassino, S.S. 630 fino a Cassino, S.S. 509 sino ad Atina, uscita su via Forca d'Acero/S.S. 509, indicazioni per Settefrati a destra (S.P. 103) proseguire oltre il paese seguendo le indicazioni per il Santuario *Madonna di Canneto*.



CRATI s.c.r.l.
c/o Università degli Studi della Calabria
Via Pietro Bucci, Cubo 30 C
87036 Rende (CS)
Casella postale 38
Sito internet: www.crati.it
E-mail: crati@crati.it

* Progetto cofinanziato dal MIUR, pratica II
7879/DSP-R/2002



Università degli Studi di Roma
TOR VERGATA

Università di Roma "Tor Vergata"
Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa
Via del Politecnico 1
00133 Roma
Tel +39 06 7259 7201
E-mail: Bellecci@uniroma2.it



Bibliografia

- [1] P.F. Ambrico et al "A multiparametric lidar system spanning from uv to the mid IR" laser und optoelektronik , vol.29(5), pp 62-69 (1997).
- [2] Raymond M. Measures, "Laser remote sensing, fundamentals and applications" J. Wiley and Sons inc. (1984).
- [3] Ens Bösenberg "Ground-based differential adsorption lidar for water -vapor and temperature profiling: methodology" Applied Optics vol.37, n.18, pp 3845-3860 (1998).
- [4] kuo-Nan Liou "An introduction to atmospheric radiation" International Geophysics Series, vol. 26, pp 285-289 (1996).
- [5] L. Byer "Remote air pollution measurement", Optical and Quantum Electronics Vol.7, pp 147-177 (1975).
- [6] H. Kildar and L. Byer "Comparison of laser method for the remote detection of atmospheric pollutants", proceeding of IEEE, Vol.59, pp 1644-1663 (1971).
- [7] J. L. Stith, L. F. Radke, P. V. Hobbs, "Particle emissions and the production of ozone and nitrogen from the burning of forest slash" Atmos. Environ. (1984).
- [8] C. Hueglin, C. Gaegauf, S. Kunzel, H. Burtscher: Environ. Sci. Technol. 31, 3439 (1997)
- [9] J. S. de Vries, den Breejen: In Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, ed. by A. Kohnle, W.B. Miller, 1968, 716 (Proc. SPIE,1993)
- [10] B. Benech, P. Van Dinh, A. Ezcurra, J. L. Lesne, Investigation of a 100 MW smoke plume by means of a 1.064 μm – Determination of diffusion characteristics of the plume particles, Atmos. Environ. (1988).
- [11] E. M. Patterson, C. K. Mc Mahon, Absorption characteristics of forest fires particulate matter, Atmos. Environ. (1984).
- [12] Sito internet www.ambientediritto.it - F. Conti Guglia, Manuale Antincendio Boschivo (2004).
- [13] F. Andreucci, M. V. Arbolino, A study on forest fire automatic detection systems, I -Smoke plume model, Il Nuovo cemento C, 16, 1, 31 (1993).

-
- [14] G. Ballard Treemer, *Emission of rural wood-burning Cooking devices*, University of the Witwatersrand, Joannesburg (1997).
- [15] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, New Rochelle N.Y. (1986).
- [16] A. W. M. van Schijndel, *Modelling and solving building physics problems with Femlab*, *Building and Environment*, **38**, 319 (2003).
- [17] M. J. Spearpoint, J. G. Quintere, *Predicting the burning of wood using an integral model*, *Combustion and Flame*, **123**, 308-324 (2000).
- [18] N. Menyuk, D.K.Killinger and W. E. De Feo, *Laser remote sensing of hydrazine, mmh, and udmh using a differential absorption CO2 lidar*, *Applied Optics* vol.21, n°12, pp.2275-2286, (1982).
- [19] Quagliano et al, *Quantitative chemical identification of four gases in remote infrared (9-11 μ m) differential absorption lidar experiments*, *Applied Optics*, Vol.36, n° 9, pp.1915-1927, (1997).
- [20] Operator's manual Lecroy Digital Oscilloscopes 9300 C series, (1998).
- [21] F. Andreucci ed M. V. Arbolino, *A Study on Forest Fire Automatic Detection Systems. II. Smoke Plume Detection Performance*, *Il Nuovo Cimento*, Volume **16 C**, Numero 1, Gennaio-Febbraio, Pagine 51-65, (1993).
- [22] Sito internet Corpo Forestale, <http://www3.corpoforestale.it>.
- [23] C. Bellecci, L. Casella, P. Gaudio, T. Lo Feudo, S. Martellucci, M. Richetta and P.Vetrò, *Evolution study of a water vapor plume using a mobile CO2 dial system*, *Proceeding of SPIE* , vol. **4539**, 180-190 , (2001).
- [24] C. Bellecci, M. Colacino, P. Gaudio, P. Aversa, L. Casella, T. Lo Feudo, *The influence of orography on watre vapour profiles over complex terrain in souther Italy*, *SPIE Proceeding*, Vol. **4167**, 64-74, (2000).
- [25] C. Bellecci, M. Francucci, P. Gaudio, M. Gelfusa, S. Martellucci, M. Richetta, *Early detection of small forest fire by Dial technique*, *SPIE Europe International Symposium on Remote Sensing*, Bruges, Belgium, vol. **5976-14**, (2005).

-
- [26] C. Bellecci, M. Francucci, P. Gaudio, M. Gelfusa, S. Martellucci, M. Richetta, T. Lo Feudo, *Application of a CO₂ dial system for infrared detection of forest fire and reduction of false alarm*, Appl. Phys. B **87**, 373 (2007).
- [27] C. Bellecci, G.E.M.L. Caputi, P. Gaudio, F. De Donato, And M. Valentini, *Co₂ Dial for monitoring atmospheric pollutants at the University of Calabria*, Il Nuovo Cimento, Vol. **18**, n° 5, (1995).
- [28] E. Zanzoterra, *Critical reviews*, Analytical chemistry, vol. **21**, n° 4, pp 278-317, (1990).
- [29] A. Lavrov, A. B. Utikin, R. Vilar, A Fernandes, *Application of Lidar in ultraviolet, visible and infrared ranger for early forest fire detection*, Appl. Phys. B, **76**, 87, (2003).
- [30] C. Bellecci, L. De Leo, P. Gaudio, M. Gelfusa, T. Lo Feudo, S. Martellucci, M. Richetta, *Reduction of false alarms in forest fire surveillance using watervapour concentration measurements*, Opt. Laser Technol. doi:10.1016/j.optlastec.2008.09.005 (2008)
- [31] C. Bellecci, L. De Leo, P. Gaudio, M. Gelfusa, S. Martellucci, , T. Lo Feudo, M. Richetta, *Water vapour emission in vegetable fuel: absorption cell measurements and detection limits of our CO₂ Dial system*, Proceedings of SPIE, vol. **6367**, (2006).
- [32] C. Bellecci, L. De Leo, P. Gaudio, M. Gelfusa, S. Martellucci, , T. Lo Feudo, M. Richetta, *Evolution study of smoke backscattering coefficients in a cell by means of a compact mobile Nd:Yag lidar system*, Proceedings of SPIE, vol. **6745**, (2007).
- [33] C. Bellecci, L. De Leo, P. Gaudio, M. Gelfusa, T. Lo Feudo, S. Martellucci, M. Richetta *Misure di assorbimento in cella di vapore acqueo prodotto dalla combustione di materiale vegetale utilizzando un sistema Dial a CO₂*, XCII Convegno Nazionale SIF, Torino, 18-23 settembre (2006).
- [34] A. Ben David, *Backscattering measurements of atmospheric aerosols at CO₂ laser wavelengths: implications of aerosol spectral structure on differential-absorption lidar retrievals of molecular species*, Appl.Opt.**38**, n°12, 2616-2624, (1999).
- [35] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer, 1999, Quinta Edizione Rivista ed Aggiornata, volume 1 Springer Series in Optical Sciences.
- [36] F.T.M Nieuwstadt, P.G Duynkerke, *Turbolence in the atmospheric boundary Layer*, Laboratory of Aero and Hydrodynamics, Deft University of technology Rotterdamseweg

145-2628 AL Delft, the Netherlands, University of Utrecht, Institute of Marine and Atmospheric Research. (1995).

[37] Vladimir A. Kovalev e William E. Eichinger, *Elastic Lidar Theory Practice, and Analysis Methods*, Wiley, (2004).

[38] Graeme L. Stephens, *Remote Sensing of the Lower Atmosphere. An Introduction*, Oxford University Press, (1994).

[39] A. Lavrov, A.B. Utikin, R. Vilar, A. Fernandes, *Applications of Lidar in ultraviolet, visible and infrared range for early forest fire detection*, Appl. Phys. B, **76**, 1, 87, (2003).

[40] V. Rizi, M. Iarlori, G. Rocci and G. Visconti, *Raman lidar observation of cloud liquid water*, Applied Optics, vol. **43**, No. 35, 6440-6453 (2004).

[41] V. Rizi, M. Iarlori, P. Di Carlo, G. Visconti and G. Cinque, *A combined Rayleigh-Raman lidar for measurements of tropospheric water vapour and aerosol profiles*, Il Nuovo Cimento, vol. **23 C**, No. 1, 53-63 (2000).

[42] D. N. Whiteman, S. H. Melfi and R. A. Ferrare, *Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere*, Applied Optics, vol. **31**, No 16, 3068-3082 (1992).

[43] D.K. Killinger and N. Menyuk, *Remote probing of the atmosphere using a CO₂ dial system*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. **17**, n°9, (1981).

[44] J. R. Taylor, *Introduzione all'analisi degli errori*, Editore Zanichelli (1990).

[45] Guido Visconti, *Fondamenti di fisica e chimica dell'atmosfera*, Cuen editore.

[46] T.G Kyle, *Atmospheric Transmission Emission and Scattering*, Pergamon Press.

[47] R. Monti, G. Zuppari, *Elementi di Aerodinamica Ipersonica*, Liguore Editore.

[48] John T. Houghton, *The physics of Atmosphere*, Cambridge University press seconda edizione (1986).

[49] R. Stull, *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer academic Publisher (1991).

[50] J. F.T.M Nieuwstadt, P.G Duijnkerke, *Turbulence in the atmospheric boundary Layer*, Laboratory of Aero and Hydrodynamics, Delft University of Technology Rotterdamseweg 145-2628 AL Delft, the Netherlands, University of Utrecht, Institute of Marine and Atmospheric Research (1995).

-
- [51] L.Mahrt, Dean Vickers, *Contrasting structures of nocturnal boundary Layers*, College of Oceanic and Atmospheric- Science, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA Received. (2002).
- [52] Massimo Del Guasta, *Daily cycles in urban aerosols observed in Florence (Italy) by means of an automatic 532–1064nm LIDAR*, IROE CNR; (2002).
- [53] NofelLagrosas a*, Yotsumi Yoshiia, Hiroaki Kuzea, Nobuo Takeuchia, Suekazu Naitob, Akihiro Sonec, Hirofumi Kanc, *Observation of boundary layer aerosols using a continuously operated, portable lidar system*, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan Chiba Prefectural Environmental Research Center, 1-88 Iwasaki-nishi, Ichihara 290-0046, Japan cHamamatsu Photonics K.K., 5000 Hirauchi, Hamakita 434-8601, (2004).
- [54] K.B. Strawbridgea, B.J. Snyderb, *Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument*, Centre For Atmospheric Research Experiments, Meteorological Service of Canada, Air Quality Processes Research Division, 6248 Eighth Line, R.R. #1, Egbert, Ontario, Canada L0L 1N0 Atmospheric Science Section, Environmental Conservation Branch, Pacific and Yukon Region, 201-401 Burrard St, Vancouver, BC, Canada V6C 3S5, (2003).
- [55] D. Pinoa,b*, J. Vila`-Guerau de Arellanoc, A. Comero`nd, F. Rocadenboschd, *The boundary layer growth in an urban area*, Institute for Space Studies of Catalonia (IEEC/CSIC), E-08034 Barcelona, Spain; Department of Applied Physics, Technical University of Catalonia, E-08034 Barcelona, Spain Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, 6701 AP Wageningen, The Netherlands Department of Signal Theory and Communications, Technical University of Catalonia, E-08034 Barcelona, Spain Accepted 1 (April 2004).
- [56] V. Matthias *, J. Bo`senberg, *Aerosol climatology for the planetary boundary layer derived from regular lidar measurements*, Max-Planck-Institut fu`r Meteorologie, Bundesstra`e 55, D-20146 Hamburg, Germany, (2002).
- [57] T.M. Moka, C.Z. Rudowiczb, *A lidar study of the atmospheric entrainment zone and mixed layer over Hong Kong*, Department of Science, Hong Kong Institute of Education, Tai Po, Hong Kong SAR; Department of Physics and Materials Science, City University of

Hong Kong, 83 Tat Chee Avenue, Kowloon, Tong, Hong Kong SAR Received 15 October 2002; accepted 21 September (2003).

- [58] Pratt, W.K., *Laser communication systems*, New York: Wiley, (1969).
- [59] Utkin, A.B., Lavrov, A.V., Costa, L., Simões, F. & Vilar, R., *Detection of Small Forest Fires by Lidar*, Appl. Phys. B, Vol. 74, (No. 1): 77-83, (2002).
- [60] Vilar, R., Lavrov, A., *Estimation of Required Parameters for Detection of Small Smoke Plumes by Lidar at 1.54 μm* , Appl. Phys. B Vol. 71: 225-228, (2000).
- [61] Arrue, B. C., Ollero, A. and Martinez de Dios, J. R., *An intelligent system for false alarm reduction in infrared forest-fire detection*, IEEE Intell. Syst. May/June, 64-72, (2000).
- [62] Benediktsson, J. A., Swain, P. H. and Ersoy, O. K., *Neural network approaches versus statistical methods in classification of multi source remote sensing data*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 28(4), 540-552, (1990).
- [63] Rauste, Y., Herland, E., Frelander, H., Soini, K., Kuoremaki, T. and Ruokari, A *Satellite-based forest fire detection for fire control in boreal forests*, Int. J. Remote Sensing, 18(12), 2641-2656, (1997).
- [64] Ugarte, M. F., de Castro, A. J., Briz, S., Aranda, *Optimized geometry in infrared arrays for remote sensing of forest fires*, Infrared Phys. Technol., 41, 35-39, (2000).
- [65] E. Durieux, L. Fiorani, : Data processing. Bosenberg, J., Brassington, D. and Simon, P. C. (eds.), *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring*, pp. 89-93, Springer, Berlin, (1997).
- [66] Armando M. Fernandes, Andrei B. Utkin, Alexander V. Lavrov, Rui M. Vilar, *Design of committee machines for classification of single-wavelength lidar signals applied to early forest fire detection*, Pattern Recognition Letters, 26, 625-632, (2005).
- [67] A. B. Utkin, A. Fernandes, F. Vilar, R. Lavrov, *Forest-fire detection by means of lidar*, ICFRR2002-IV Internat. Conf. on Forest Fire Research, Luso, Portugal. Millpress, Rotterdam, p.58, (2002).
- [68] F A. Fernandes, A. Utkin, A. Lavrov, R.Vilar, *Classification of lidar signals by committee machines applied to automatic forest fire detection*, JCIS2003-Seventh Joint, Conf. on Information Sciences, Cary, NC, USA, pp. 1585- 1588, (2003).

-
- [69] D. Bhattacharya, S. Pillai, A. Antoniou, *Waveform classification and information extraction from LIDAR data by neural networks*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 35(3), 699–707, (1997).
- [70] A. Cordoba, R. Vilar, A. Lavrov, A. B. Utkin, A. Fernandes, *Multi objective optimisation of lidar parameters for forest-fire detection on the basis of a genetic algorithm*, Op. and Laser Tech., **36**, 393, (2004).
- [71] A. M. Fernandes, A. B. Utkin, A. V. Lavrov, R. M. Vilar, *Development of neural network committee machines for automatic forest fire detection using lidar*, Pattern Recognition, **37**, 2039, (2004).