

Monitoraggio atmosferico mediante telerilevamento laser nella Provincia di Brindisi: campagna invernale

F. Colao, D. Del Bugaro, L. Fiorani, A. Palucci, A. Scoditti
ENEA FIM-FISLAS, Via Enrico Fermi 45, 00044 Frascati RM, Italy



Monitoraggio atmosferico mediante telerilevamento laser nella Provincia di Brindisi: campagna invernale

Atmospheric monitoring by laser remote sensing in the Province of Brindisi: winter campaign

Riassunto

Questo rapporto riassume i risultati ottenuti con il lidar atmosferico ATLAS durante la campagna di misura svolta a Brindisi nel febbraio 2009. ATLAS è montato nel laboratorio mobile ENVILAB ed è basato su un laser CO₂ impulsato accordabile. Etilene, vapore acqueo, ammoniaca e carico aerosolico sono stati ricostruiti lungo i cammini ottici. Questi risultati sono stati comparati con quelli del luglio 2008 e hanno fornito informazioni sulle variazioni stagionali dell'inquinamento atmosferico nello strato d'aria in cui hanno luogo le attività umane.

Abstract

This report summarizes the results obtained by the atmospheric lidar ATLAS during the measurement campaign carried out in Brindisi on February 2009. ATLAS is mounted on the mobile laboratory ENVILAB and is based on a tunable pulsed CO₂ laser. Ethylene, water vapor, ammonia and aerosol load have been retrieved along the optical paths. These results have been compared with those of July 2008 and provided information on the seasonal variations of atmospheric pollution in the air layer where human activities take place.

Parole chiave: lidar, retrodiffusione elastica, assorbimento differenziale, inquinanti, aerosol, vapore acqueo.

Key words: lidar, elastic backscattering, differential absorption, pollutants, aerosol, water vapor.

Indice

Indice	3
1 Introduzione.....	4
2 Protocollo di misura	5
3 Siti di misura.....	7
4 Misure.....	11
4.1 Misure presso la centrale elettrica	11
4.2 Misure presso lo stabilimento petrolchimico.....	16
4.3 Tabella riepilogativa	21
5 Discussione	22
5.1 Misure presso la centrale elettrica	22
5.1.1 Quadro osservativo.....	22
5.1.2 Inquinanti.....	22
5.1.3 Differenze stagionali	23
5.2 Misure presso lo stabilimento petrolchimico.....	24
5.2.1 Quadro osservativo.....	24
5.2.2 Inquinanti.....	24
5.2.3 Differenze stagionali	26
5.2.4 Test di risoluzione spaziotemporale	27
6 Conclusioni.....	28
Ringraziamenti	30
Bibliografia.....	31

1 Introduzione

In un precedente rapporto tecnico interno [1], sono stati riportati i risultati ottenuti con il lidar atmosferico ATLAS durante la campagna di misura svolta a Brindisi nel luglio 2008. Il lettore troverà in tale documento un'introduzione alla problematica dell'inquinamento atmosferico e una trattazione dei vantaggi del radar laser, o lidar [2], rispetto alle tecniche di monitoraggio convenzionali, vantaggi legati sostanzialmente al fatto che il lidar permette una misura diretta, a distanza e in aria, cioè senza prelievamento di campioni, proponendosi come strumento privilegiato per la validazione di modelli numerici. Inoltre, in quel rapporto sono stati descritti gli strumenti e i metodi, è stato discusso l'errore di misura ed è stata fornita una bibliografia essenziale.

A causa di un guasto nel circuito di alta tensione del laser che costituisce il cuore di ATLAS, è stato necessario lavorare con potenze ottiche inferiori del 30% rispetto a quelle usate durante la campagna del luglio 2008. Tali potenze, in condizioni ottimali, avevano permesso di raggiungere intervalli di misura superiori a 5 km [3]. Per questo motivo, solo nel caso del carico aerosolico è stato possibile ottenere profili risolti in distanza. Negli altri casi, invece, sono state effettuate misure mediate sul cammino ottico del fascio laser. Nondimeno, è stato possibile raggiungere lo scopo principale della campagna, ossia investigare le differenze di qualità dell'aria tra estate e inverno, con particolare riferimento ad ammoniaca ed etilene, compresi nella lista dei composti che i paesi membri dell'Unione Europea si sono impegnati a ridurre entro il 2010 [4]. A tal proposito, osserviamo che non è stato misurato l'ozono, in quanto si tratta di un inquinante secondario che si sviluppa solo in estate a causa dell'elevata radiazione solare (smog fotochimico) [5].

Anche la campagna del febbraio 2009 è stata commissionata dal Servizio Ambiente della Provincia di Brindisi che ha individuato due siti chiave per le misure: la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e lo stabilimento petrolchimico ENI di Brindisi.

2 Protocollo di misura

Il protocollo di misura è sostanzialmente quello usato nel luglio 2008. Ricordiamo che il coefficiente di estinzione può essere calcolato solo a partire dalla distanza in cui l'efficienza del ricevitore è costante (300 m nel nostro caso). Per questo, le misure senza bersaglio topografico si riferiscono a cammini ottici compresi tipicamente tra 300 e 540 m di distanza.

Una volta arrivati a Brindisi è stato cambiato il gas del laser, per assicurare l'emissione della massima energia. Ogni giorno è stata controllata la corrispondenza tra la posizione dello specchio di scansione di ATLAS e la lunghezza d'onda emessa. Prima di ogni sessione di misura (Tab. 1) sono stati controllati sia l'allineamento tra trasmettitore e ricevitore, sia il funzionamento del rivelatore che misura il tempo zero dell'esperimento osservando il passaggio del fascio laser pochi centimetri prima che venga emesso in atmosfera. Quindi, sono stati acquisiti segnali con il laser accordato sulle righe:

- 10P32 e 10P30 (misura della concentrazione di ammoniaca),
- 10P20 e 10P14 (misura della concentrazione di etilene e del carico aerosolico),
- 10R20 e 10R18 (misura della concentrazione d'acqua).

Tali cicli di misura sono stati effettuati con il lidar sia verticale, sia quasi orizzontale. Nella maggior parte dei casi, il lidar quasi orizzontale è stato puntato contro un bersaglio topografico (ciminiera), grazie a un apposito specchio. Per le misure in verticale il segnale è stato ottenuto mediando 900 colpi laser (tranne l'ultima del 19 febbraio 2009, per la quale sono stati usati 600 colpi), per quelle quasi orizzontali senza bersaglio (indicate d'ora in poi con l'espressione "orizzontale") mediando 600 colpi (tranne l'ultima del 19 febbraio 2009, per la quale sono stati usati 900 colpi) e, infine, per quelle quasi orizzontali con bersaglio (indicate d'ora in poi con l'espressione "con bersaglio") mediando 300 colpi. Tale differenza è dovuta al fatto che, in generale, il rapporto segnale rumore migliora passando da misure verticali a orizzontali, in particolare se il lidar è puntato su un bersaglio topografico.

A parte il primo giorno, le condizioni meteo sono state piuttosto proibitive con pioggia e vento anche forti (verso le 13 del terzo giorno ci sono state anche precipitazioni a carattere nevoso). Nondimeno, coprendo lo specchio di puntamento con un telone di plastica, è stato possibile continuare le misure orizzontali, eseguendo quelle verticali nei periodi privi di precipitazioni (per le misure verticali il telescopio guarda direttamente il cielo e non è possibile proteggerlo da pioggia e neve). Nonostante le

difficoltà, sono state effettuate 440 misure, risultato ragguardevole, soprattutto se comparato con quello della campagna estiva (152 misure).

Sessione	Inizio	Fine	Sito	N. misure verticali	N. misure orizzontali	N. totale misure
17 mattina	17/02/09 11:20	17/02/09 11:59	Centrale elettrica	0	24	24
17 pomeriggio	17/02/09 12:01	17/02/09 17:15	Centrale elettrica	10	108	118
18 mattina	18/02/09 09:57	18/02/09 12:45	Centrale elettrica	0	50	50
18 pomeriggio	18/02/09 15:09	18/02/09 17:07	Stabilimento petrolchimico	0	60	60
19 mattina	19/02/09 09:37	19/02/09 11:39	Stabilimento petrolchimico	25	30	55
19 pomeriggio	19/02/09 12:46	19/02/09 17:11	Stabilimento petrolchimico	43	90	133
TOTALE				78	362	440

Tab. 1 – Sessioni di misura durante la campagna invernale di Brindisi.

3 Siti di misura

La Provincia di Brindisi ha individuato due siti da monitorare: la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e lo stabilimento petrolchimico ENI di Brindisi (Fig. 1). Per comodità del lettore, in Fig. 1 è stata indicata anche la zona industriale, monitorata durante la campagna estiva.

Più precisamente, ENVILAB è stato installato presso la centrale elettrica il 17 febbraio mattina (Figg. 2 e 3) e presso lo stabilimento petrolchimico il 18 febbraio pomeriggio (Figg. 4 e 5).



Fig. 1 – Siti monitorati durante le campagne di Brindisi. Il simbolo colorato indica la posizione esatta di ENVILAB. (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).



Fig. 2 – Posizionamento di ENVILAB presso la centrale elettrica di Cerano (punto rosso) e cammino ottico nella misura con bersaglio topografico (freccia gialla). (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).



Fig. 3 – ENVILAB presso la centrale elettrica di Cerano. La ciminiera della centrale (a 0.7 km) è stata usata come bersaglio topografico.



Fig. 4 – Posizionamento di ENVILAB presso lo stabilimento petrolchimico di Brindisi (punto blu) e cammini ottici nella misura con bersagli topografici (frecche verdi). I cammini ottici 2 e 3 puntano su due bersagli topografici vicini e non sono distinguibili sull'immagine satellitare. Per comodità del lettore, è stato indicato anche il posizionamento presso la zona industriale, monitorata durante la campagna estiva, (punto rosso) e il relativo cammino ottico nella misura con bersaglio topografico (freccia gialla). (Immagine satellitare ricavata da Google Earth).



Fig. 5 – ENVILAB presso lo stabilimento petrolchimico di Brindisi. La ciminiera sopra l'abitacolo (a 0.55 km) è una di quelle usate come bersaglio topografico. Le ciminiere a sinistra emettono continuamente vapori in quantità variabile.

Presso lo stabilimento petrolchimico, cinque ciminiere sono state usate come bersaglio topografico (Fig. 6), permettendo di estendere le misure in un'area relativamente vasta circostante ENVILAB. Inoltre, i cammini ottici utilizzati in febbraio insistono su regioni molto vicine a quella investigata in luglio, permettendo di comparare le campagne estiva e invernale. Le distanze da ATLAS sono le seguenti:

- ciminiera 1: 0.45 km,
- ciminiera 2: 0.55 km,
- ciminiera 3: 0.6 km,
- ciminiera 4: 1.8 km,
- ciminiera 5: 0.5 km.



Fig. 6 – Ciminiere usate come bersagli topografici.

4 Misure

4.1 Misure presso la centrale elettrica

I profili di carico aerosolico sono presentati in Fig. 7. Nel caso invernale, sono mostrati due grafici: il primo ha la stessa scala di quello estivo, per facilitare il confronto tra i due periodi dell'anno, il secondo si estende a valori superiori sia per l'asse delle ordinate, sia per l'asse delle ascisse perché, mentre nel luglio 2008 l'aria era relativamente limpida e il coefficiente di estinzione si annullava dopo circa 1 km, nel febbraio 2009, a causa di strati nuvolosi più o meno spessi, il coefficiente di estinzione ha raggiunto valori elevati anche oltre 2 km.

I valori medi lungo il cammino ottico di vapore acqueo, etilene e ammoniacca sono mostrati in Fig. 8. Sia per la Fig. 7, sia per la Fig. 8, per comodità del lettore, sono stati riportati anche i risultati della campagna estiva. Per la campagna invernale, i valori medi di vapore acqueo sono stati confrontati con i dati meteo misurati nel centro di Brindisi (40.65 N, 17.95 E) [6] e quelli di carico aerosolico con le quantità di polveri rilevate dalle centraline dell'ENEL nella centrale elettrica [7]. Naturalmente, in quest'ultimo caso, potrà essere comparato solo l'andamento, poiché il carico aerosolico è stato misurato in m^{-1} e la quantità di polveri in μm^{-3} : per disegnare le due variabili nello stesso grafico, è stato sufficiente moltiplicare per un fattore costante la quantità di polveri. In altri due diagrammi (Fig. 9) sono state riportate anche le concentrazioni di NO_2 ed SO_2 rilevate dall'ENEL, in modo da controllare se appaiano correlazioni tra tali concentrazioni, da una parte, e i valori medi di etilene, ammoniacca e carico aerosolico, dall'altra.

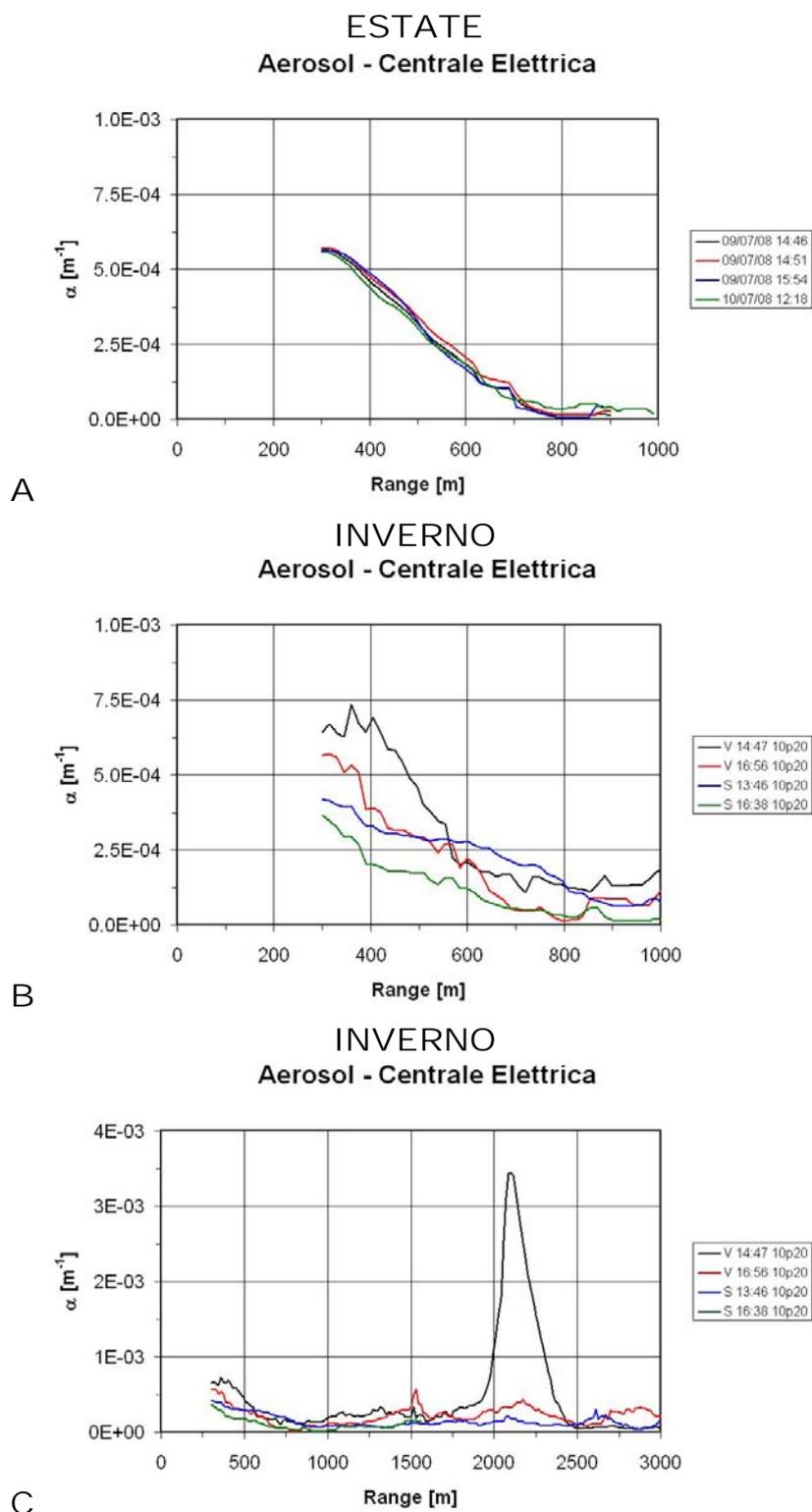


Fig. 7 – Profili di carico aerosolico misurati presso la centrale elettrica di Cerano il 9 e 10 luglio 2008 (A) e il 17 febbraio 2009 (B e C). Le figure A e B hanno la stessa scala, le figure B e C differiscono solo per la scala.

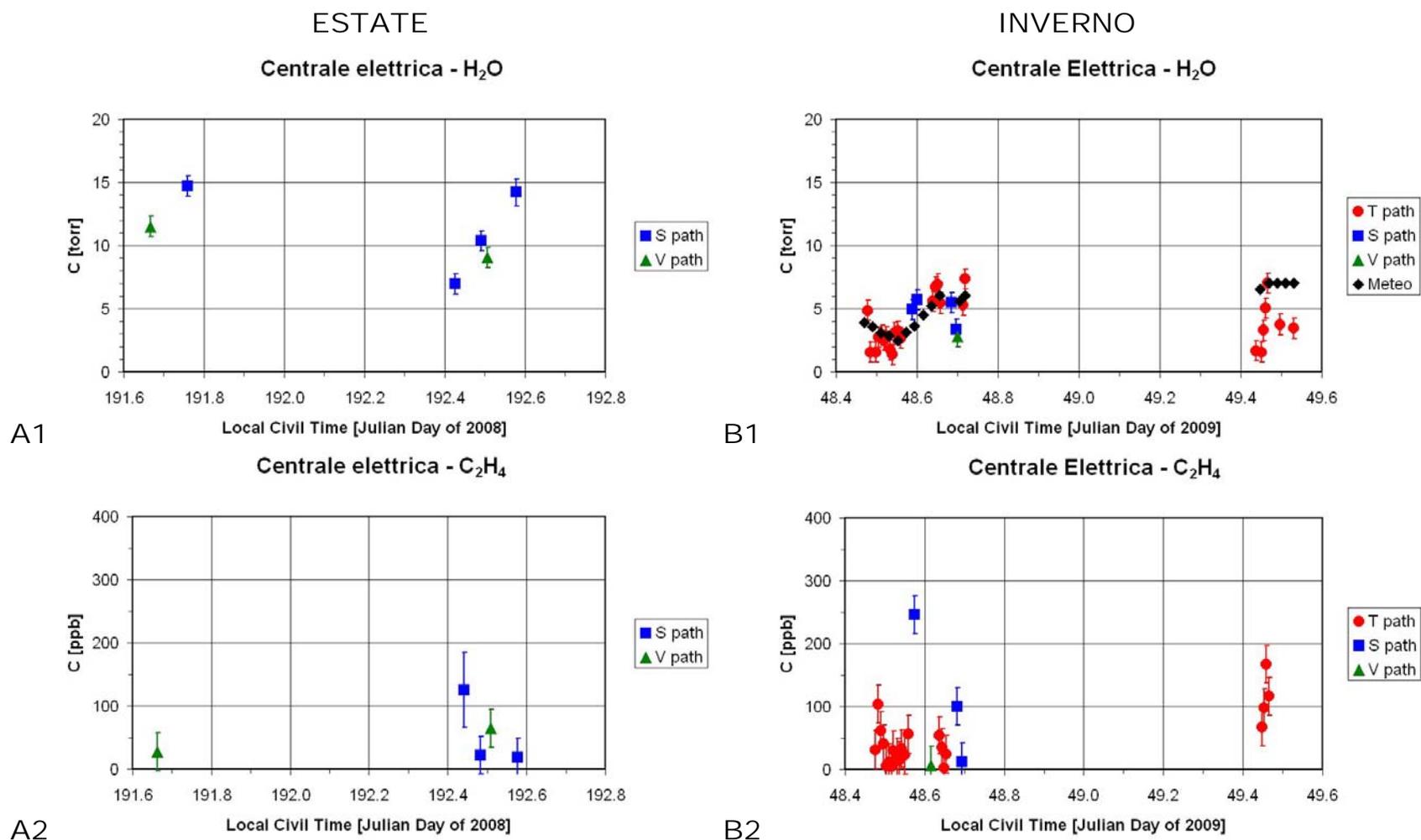


Fig. 8 – Misure di vapore acqueo, etilene, ammoniaca e carico aerosolico effettuate presso la centrale elettrica di Cerano il 9 e 10 luglio 2008 (A1, A2, A3 e A4, nell'ordine) e il 17 e 18 febbraio 2009 (B1, B2, B3 e B4, nell'ordine). I cammini ottici "S" sono orizzontali, quelli "V" verticali, quelli "T" orizzontali con bersaglio topografico (in estate non sono stati distinti i cammini orizzontali con e senza bersaglio). Le barre verticali rappresentano l'errore.

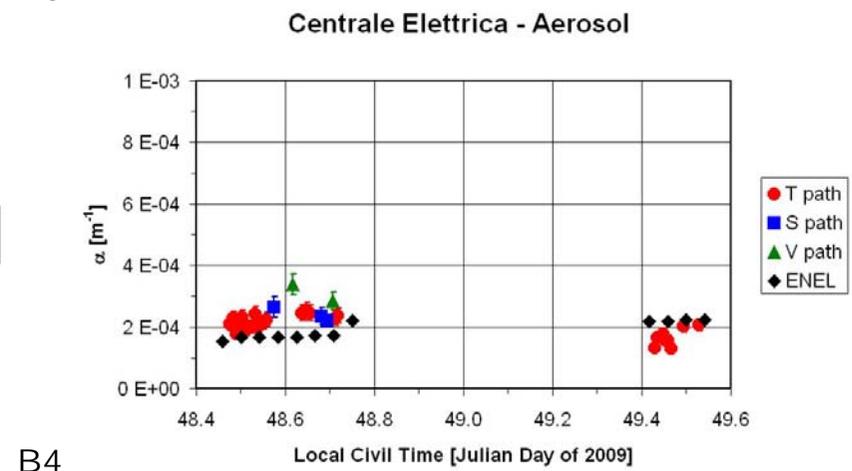
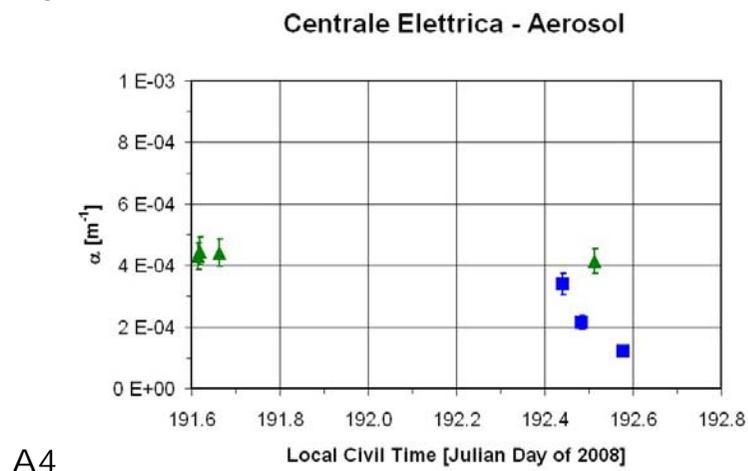
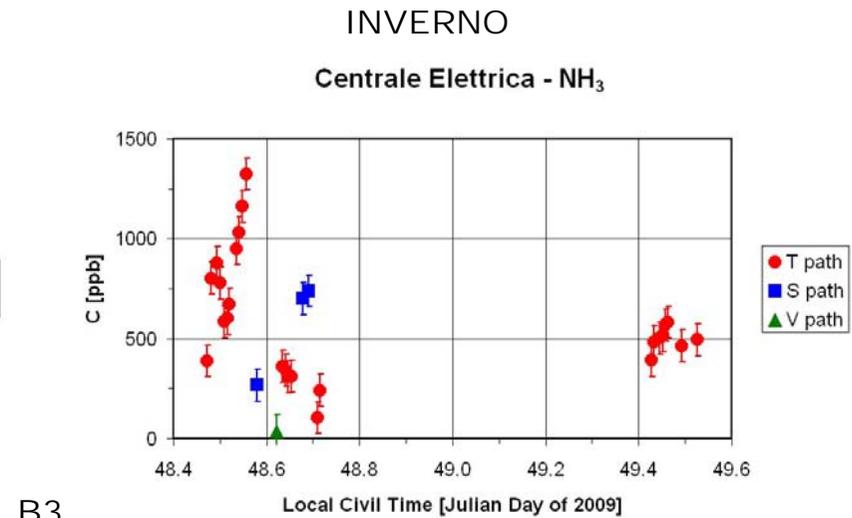
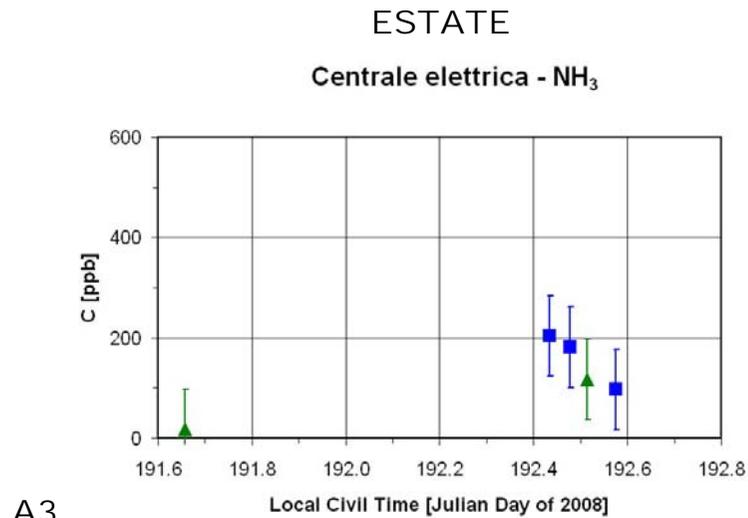


Fig. 8 – (continua)

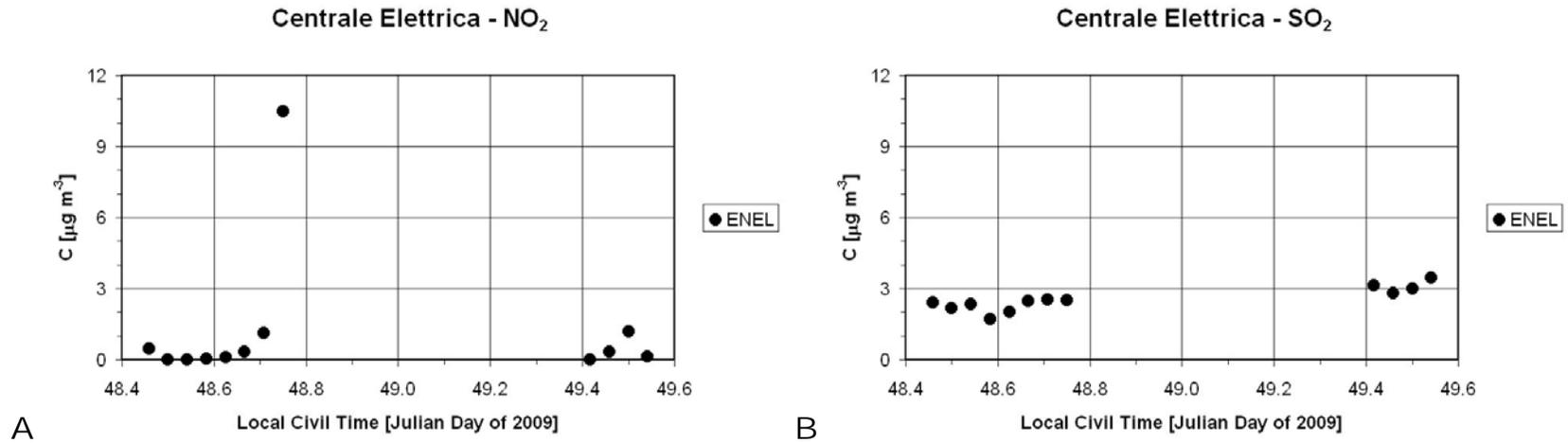


Fig. 9 – Concentrazioni di NO₂ (A) ed SO₂ (B) rilevate dalle centraline dell'ENEL nella centrale elettrica.

4.2 Misure presso lo stabilimento petrolchimico

I grafici dello stabilimento petrolchimico (Figg. 10-12) sono presentati nella stessa forma di quelli della centrale elettrica: l'unica differenza è che le concentrazioni di polveri, NO₂ ed SO₂ sono state rilevate dalle centraline dell'Edipower e dell'ENEL più vicine allo stabilimento petrolchimico (circa 5 km a Ovest e a Sud, rispettivamente).

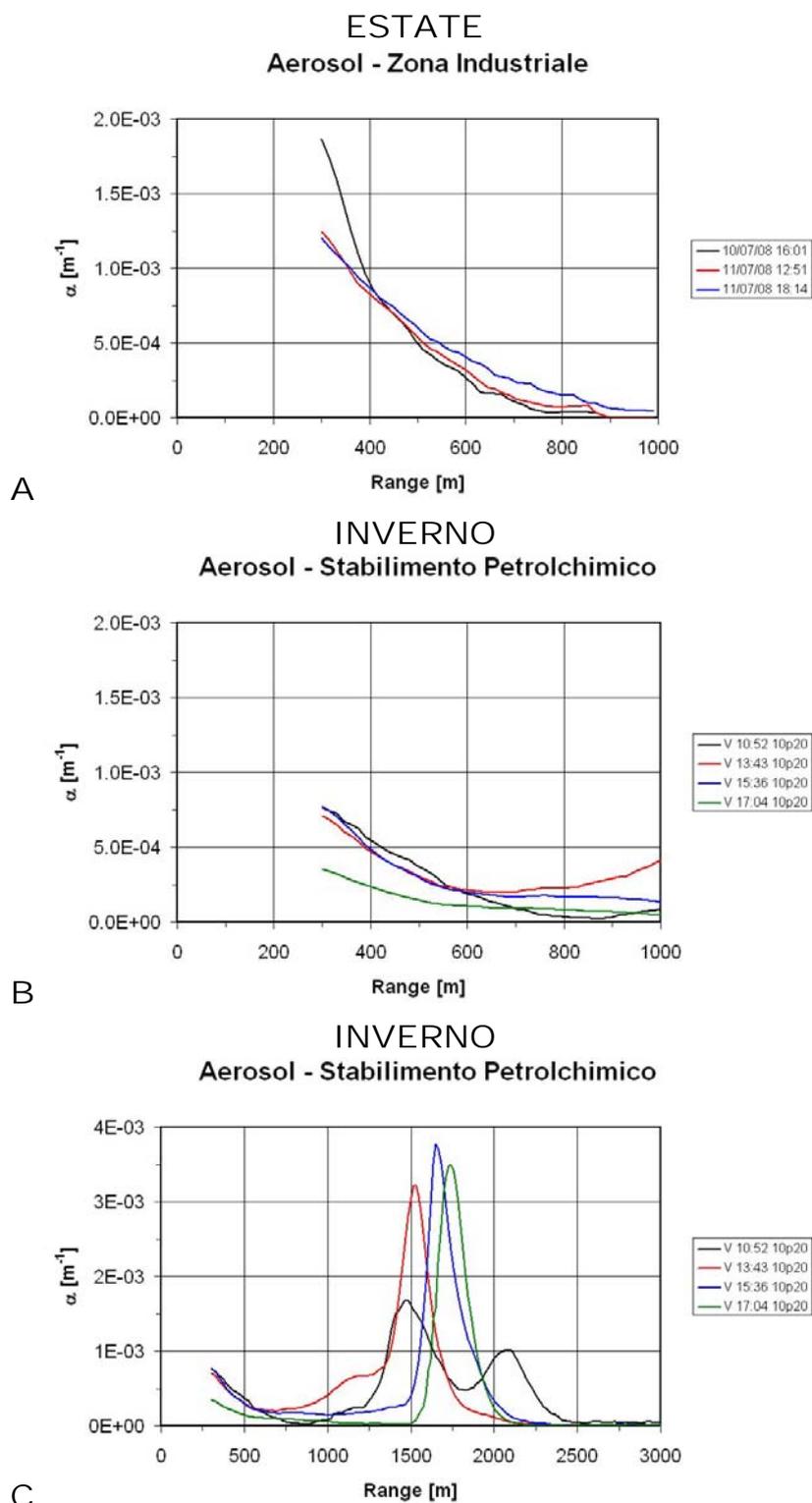


Fig. 10 – Profili di carico aerosolico misurati presso la zona industriale di Brindisi il 10 e 11 luglio 2008 (A) e lo stabilimento petrolchimico di Brindisi il 19 febbraio 2009 (B e C). Le figure A e B hanno la stessa scala, le figure B e C differiscono solo per la scala.

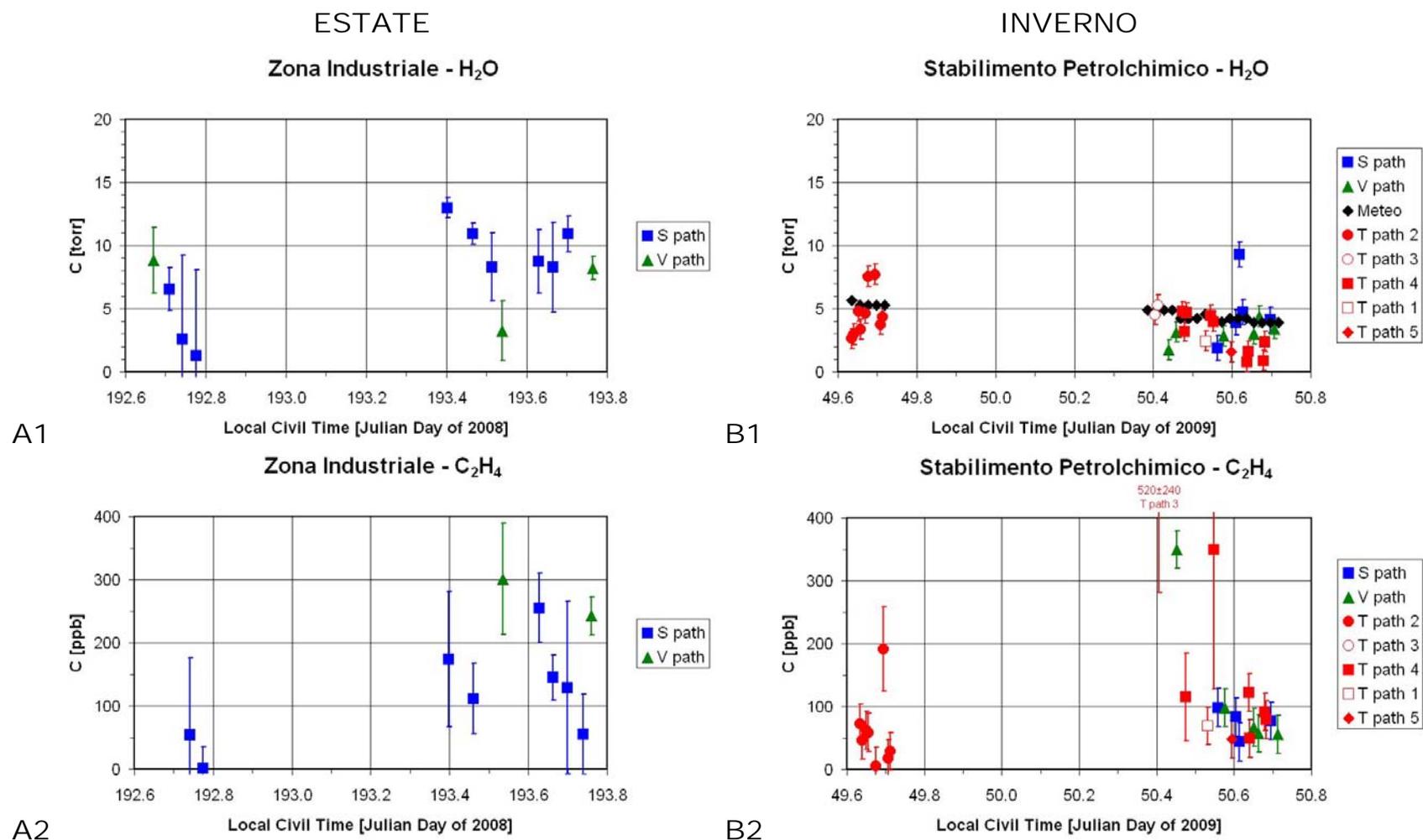
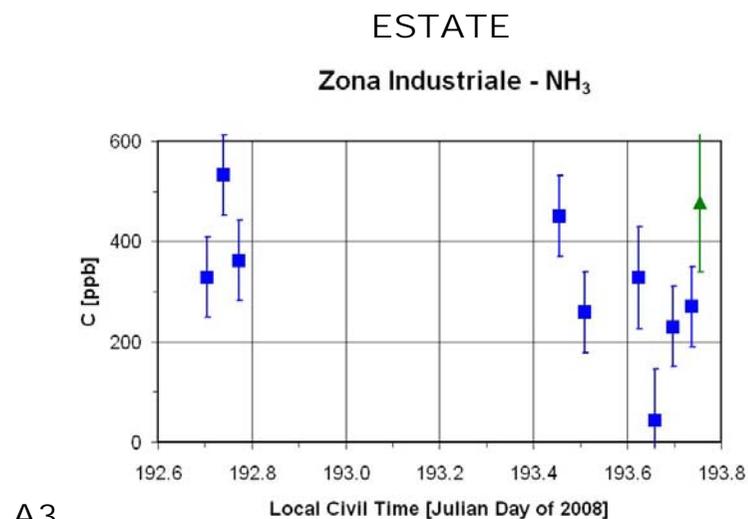
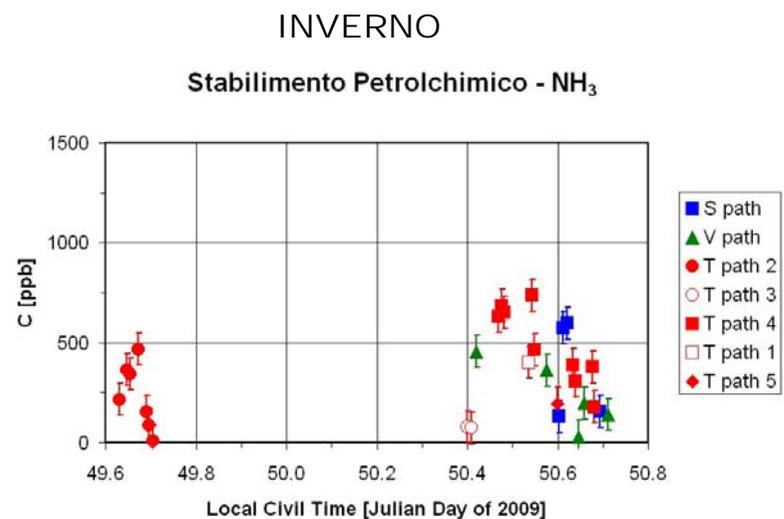


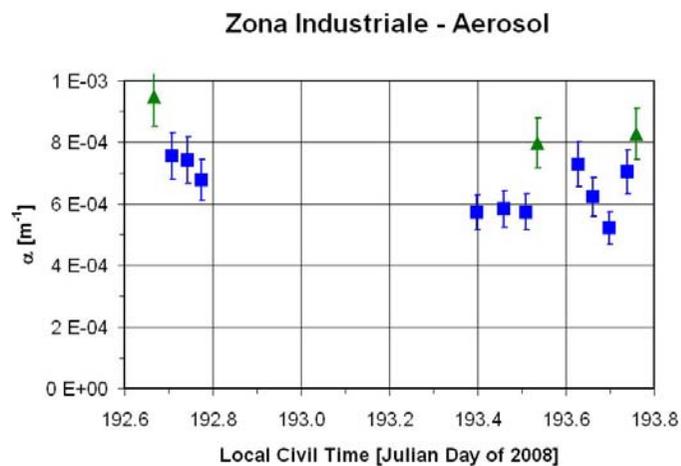
Fig. 11 – Misure di vapore acqueo, etilene, ammoniaca e carico aerosolico effettuate presso la zona industriale di Brindisi il 10 e 11 luglio 2008 (A1, A2, A3 e A4, nell'ordine) e presso lo stabilimento petrolchimico di Brindisi il 18 e 19 febbraio 2009 (B1, B2, B3 e B4, nell'ordine). I cammini ottici "S" sono orizzontali, quelli "V" verticali, quelli "T" orizzontali con bersaglio topografico (in estate non sono stati distinti i cammini orizzontali con e senza bersaglio). Le barre verticali rappresentano l'errore.



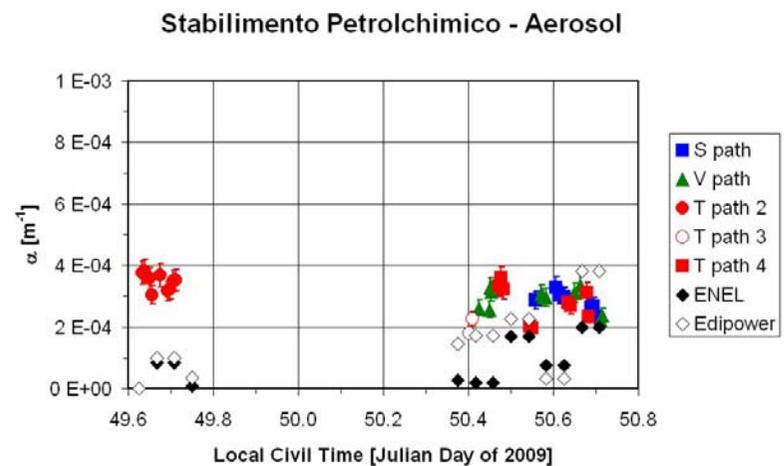
A3



B3



A4



B4

Fig. 11 – (continua)

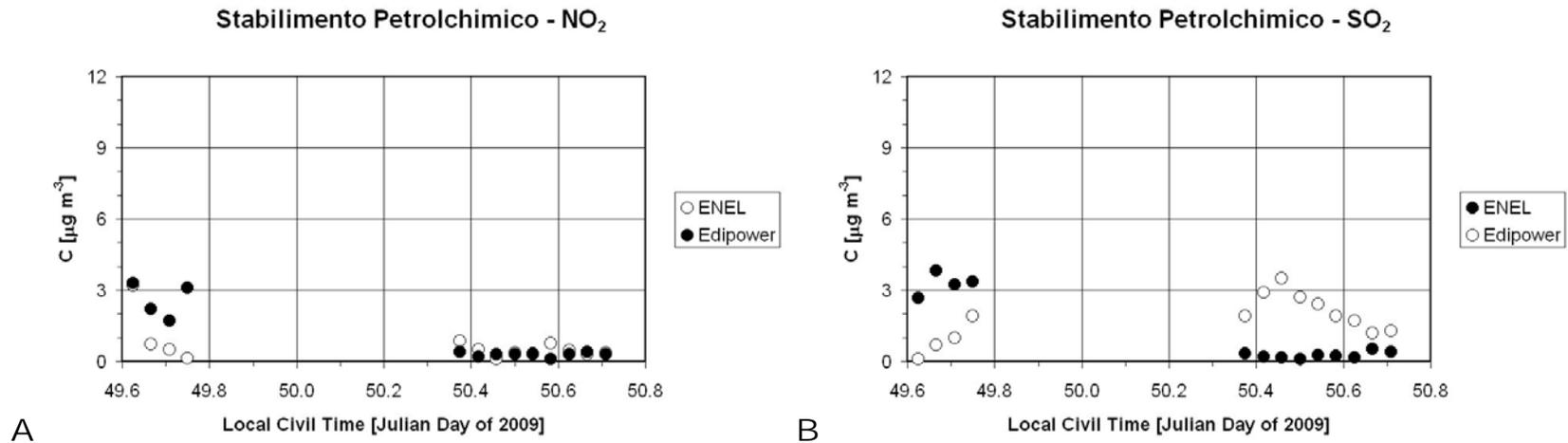


Fig. 12 – Concentrazioni di NO_2 (A) ed SO_2 (B) rilevate dalle centraline dell'Edipower e dell'ENEL più vicine allo stabilimento petrolchimico (circa 5 km a Ovest e a Sud, rispettivamente).

4.3 Tabella riepilogativa

Dopo aver mostrato i risultati delle campagne estiva e invernale, forniamo una tabella riepilogativa con le medie stagionali per entrambi i siti (Tab. 2).

Componente	Centrale elettrica		Zona industriale e stabilimento petrolchimico	
	Media estiva	Media invernale	Media estiva	Media invernale
H ₂ O [torr]	11.1	3.9	7.6	3.8
C ₂ H ₄ [ppb]	52	54	147	110
NH ₃ [ppb]	123	571	328	325
Aerosol [m ⁻¹]	3.4×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴	7.0×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻⁴

Tab. 2 – Valori medi estivi e invernali di vapore acqueo e inquinanti sia presso la centrale elettrica, sia presso la zona industriale e lo stabilimento petrolchimico.

5 Discussione

Dopo un primo giorno di bel tempo, la campagna invernale è stata caratterizzata dal passaggio di un'intensa perturbazione su Brindisi, con temperature basse, venti forti e precipitazioni intense (Tab. 3).

Sessione	P [hPa]	T [°C]	Vento [nodi e direzione]	Visibilità	Cielo
17 mattina	1019÷1020	8÷9	5÷9 SW÷SSW	Buona	Sereno÷Nubi sparse
17 pomeriggio	1016÷1019	10÷11	8÷10 S÷SSW	Buona	Sereno÷Nubi sparse
18 mattina	1008	7÷8	5÷10 SW÷SSW	Buona÷Discreta	Pioggia
18 pomeriggio	1006÷1007	4÷7	13÷28 W÷WSW	Discreta	Pioggia
19 mattina	1009÷1010	5÷6	20÷25 NW÷WNW	Discreta	Nuvoloso÷Pioggia
19 pomeriggio	1010÷1012	6÷7	18÷22 NW÷WNW	Buona	Nuvoloso÷Pioggia

Tab. 3 – Condizioni meteo durante la campagna invernale di Brindisi [6].

5.1 Misure presso la centrale elettrica

5.1.1 Quadro osservativo

I valori medi lungo il cammino ottico di vapore acqueo (Fig. 8B1) seguono grosso modo l'andamento dei dati meteo, indicando che la concentrazione di tale composto è dominata dallo spostamento delle masse d'aria, anche se le forzanti locali (ciminiera e scarico delle acque di raffreddamento) possono introdurre delle fluttuazioni. Il fatto che non ci siano differenze significative tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali vicine nel tempo suggerisce che lo strato limite planetario sia ben rimescolato.

5.1.2 Inquinanti

Considerando i valori medi lungo il cammino ottico di etilene, ammoniaca e carico aerosolico (Figg. 8B2, 8B3 e 8B4, rispettivamente) possono essere tirate le seguenti conclusioni:

- l'etilene è stato inequivocabilmente rivelato il 17 e 18 febbraio; le concentrazioni del 17 – fatta eccezione per un valore – sono attorno a 50 ppb, quelle del 18 attorno a 100 ppb; il fatto che la misura verticale fornisca un valore praticamente nullo e la forte variabilità nel tempo dei dati, suggeriscono che la sorgente dell'etilene sia locale; quest'ipotesi è suffragata dalla direzione del vento, proveniente da S e SW e quindi non da Brindisi o dalla sua zona industriale;

- ATLAS misura valori elevati di ammoniaca: tra 500 e 1500 ppb la mattina del 17 e attorno a 500 ppb il pomeriggio del 17 e il 18; anche in questo caso il fatto che la misura verticale fornisca un valore praticamente nullo e la forte variabilità nel tempo dei dati, suggeriscono che la sorgente dell'ammoniaca sia locale;
- il carico aerosolico non è molto superiore ai dati pubblicati in letteratura [1] o misurati da ATLAS in zone rurali [3] (attorno a 10^{-4} m^{-1}); il suo valore è praticamente costante nel tempo (la leggera diminuzione del 18 febbraio può essere spiegata dall'effetto pulente della pioggia sull'aria) e non c'è differenza significativa tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali, indicando che il particolato è ben rimescolato nello strato limite planetario (almeno fino a 600 m di altezza); queste osservazioni, farebbero propendere verso la conclusione che ATLAS osservi il carico aerosolico di fondo e non particelle generate presso la centrale elettrica, anche perché il vento proviene da zone rurali e soffia dal lidar alla ciminiera;
- non sembra che vi siano correlazioni tra etilene, ammoniaca, biossido di azoto e biossido di zolfo, suggerendo che le sorgenti di tali inquinanti siano distinte;
- al contrario, gli andamenti del carico aerosolico e delle polveri sono molto simili, confermando che ATLAS è particolarmente sensibile a particelle di taglia attorno a $10 \mu\text{m}$, in accordo con la teoria dell'interazione tra luce e particolato (teoria di Mie).

I profili del coefficiente di estinzione (Fig. 7) dimostrano che il carico aerosolico diminuisce con l'altitudine in aria limpida sia nel 2008, sia nel 2009, in pieno accordo con le misure sperimentali e i modelli teorici pubblicati in letteratura [1]. D'inverno, la presenza di strati nuvolosi, anche non percepibili a occhio nudo, implica un forte aumento del coefficiente di estinzione, producendo dei picchi (evidentissimo quello alle 14:47 del 17 febbraio).

5.1.3 Differenze stagionali

Passando dalla campagna estiva a quella invernale, la concentrazione di vapore acqueo diminuisce grosso modo di un fattore 3. Ciò non è sorprendente, in quanto anche le temperature si sono ridotte da attorno a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ad attorno a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e, quindi, la pressione di vapore saturo decresce di circa un fattore

3. In altre parole, a parità di umidità relativa (misurata in %), in estate si registrano concentrazioni assolute di vapore acqueo (misurate in torr) superiori rispetto all'inverno.

Per quanto riguarda l'etilene, anche se in febbraio si riscontrano valori più elevati che in luglio, le due medie stagionali sono praticamente uguali. Un aumento sensibile si riscontra invece per l'ammoniaca in inverno, praticamente sempre al di sopra delle concentrazioni estive. Infine, per quanto riguarda il carico aerosolico, d'inverno i valori medi si attestano su livelli inferiori rispetto a quelli estivi, mentre i profili evidenziano una maggiore variabilità, probabilmente a causa del forte vento che trasporta strati più o meno ricchi di goccioline d'acqua.

5.2 Misure presso lo stabilimento petrolchimico

5.2.1 Quadro osservativo

Come nel caso della centrale elettrica, i valori medi lungo il cammino ottico di vapore acqueo (Fig. 11B1) seguono grosso modo l'andamento dei dati meteo, indicando che la concentrazione di tale composto è dominata dallo spostamento delle masse d'aria, anche se le forzanti locali (ciminiera) possono introdurre delle fluttuazioni: il vapore emesso dalle ciminiere a sinistra di ENVILAB in Fig. 5, ad esempio, variava nel corso della giornata. Proprio l'intensa emissione di vapore da tali ciminiere può spiegare i valori particolarmente alti osservati il 18 febbraio alle 16:15 e alle 16:39 nella misura con bersaglio e il 19 febbraio alle 14:50 nella misura orizzontale. In tutte le altre rilevazioni, in prima approssimazione, non si osservano differenze particolarmente significative tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali vicine nel tempo, suggerendo che lo strato limite planetario sia abbastanza rimescolato (almeno fino a 600 m di altezza). In realtà, guardando più attentamente, si può concludere che, mentre le misure orizzontali e con bersaglio mostrano un andamento decrescente, quelle verticali ne evidenziano uno praticamente costante. Questa osservazione potrebbe essere spiegata dalla relativa indipendenza delle misure verticali dalle forzanti locali a causa della stratificazione atmosferica.

5.2.2 Inquinanti

Considerando i valori medi lungo il cammino ottico di etilene, ammoniaca e carico aerosolico (Figg. 11B2, 11B3 e 11B4, rispettivamente) possono essere tirate le seguenti conclusioni:

- l'etilene è stato inequivocabilmente rivelato il 18 e 19 febbraio; le concentrazioni del 18 – fatta eccezione per un valore – sono attorno a 50 ppb, quelle del 19 attorno a 100 ppb, tranne in tre casi in cui si attestano sui 400-500 ppb; da una parte, il fatto che – in generale – tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali vicine nel tempo non ci siano differenze significative suggerisce che lo strato limite planetario sia rimescolato, ipotesi suffragata dal vento forte, dall'altra, la forte variabilità nel tempo dei dati, indica che nella concentrazione dell'etilene giochino un ruolo le sorgenti locali;
- sia il 18, sia il 19 febbraio, ATLAS misura praticamente tutte le concentrazioni di ammoniaca da zero a un valore massimo, con la differenza che tale massimo è di circa 500 ppb il 18 e circa 750 ppb il 19; in entrambi i casi si osserva una diminuzione regolare, fino a valori praticamente nulli alle 17; inoltre, essendo stato condotto il 19 un monitoraggio durante tutto l'arco della giornata lavorativa, è evidente un ciclo di aumento (dalle 9) e diminuzione (fino alle 17), il che porterebbe ad ascrivere la presenza di ammoniaca alle attività dello stabilimento petrolchimico; come nel caso dell'etilene, il fatto che tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali vicine nel tempo non ci siano differenze significative suggerisce che lo strato limite planetario sia rimescolato;
- il carico aerosolico è superiore sia ai dati pubblicati in letteratura [1] o misurati da ATLAS in zone rurali [3] (attorno a 10^{-4} m^{-1}), sia al valore di fondo osservato presso la centrale elettrica (circa $2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$); anche se meno pronunciato, per il carico aerosolico si osserva lo stesso comportamento dell'ammonica: aumento dalle 9 e diminuzione fino alle 17; è probabile che al carico aerosolico contribuiscano sia il fondo per circa $2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, sia il particolato emesso presso lo stabilimento petrolchimico, fino a un massimo di quasi $2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, fornendo un totale che si avvicina a $4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$; anche in questo caso, non c'è differenza significativa tra misure con bersaglio, orizzontali e verticali, indicando che il particolato è ben rimescolato nello strato limite planetario;
- non sembra che vi siano correlazioni tra etilene, ammonica, biossido di azoto e biossido di zolfo, suggerendo che le sorgenti di tali inquinanti siano distinte; del resto paragonare dati così

distanti geograficamente potrebbe non essere corretto, come indica la differenza tra i valori dello stesso inquinante misurati dalle centraline ENEL ed Edipower;

- contrariamente alla centrale elettrica, probabilmente a causa della grande distanza tra centraline e ATLAS, nel caso dello stabilimento petrolchimico, gli andamenti del carico aerosolico e delle polveri non sono simili, confermando che il particolato osservato dal lidar è, almeno in parte, di origine locale;
- sia nel caso dell'etilene, sia nel caso dell'ammoniaca, la misura relativa al bersaglio 1 (cammino ottico verso N) è inferiore a quella quasi simultanea relativa al bersaglio 4 (cammino ottico verso S); questo risultato, combinato all'osservazione che il vento spirava intensamente da NW, è un'ulteriore conferma che nello stabilimento petrolchimico vi sono sorgenti di etilene e ammoniaca.

Come nel caso della centrale elettrica, i profili del coefficiente di estinzione (Fig. 10) dimostrano che il carico aerosolico diminuisce con l'altitudine in aria limpida per entrambe le campagne, in pieno accordo con le misure sperimentali e i modelli teorici pubblicati in letteratura [1]. D'inverno, la presenza di strati nuvolosi, anche non percepibili a occhio nudo, implica un forte aumento del coefficiente di estinzione, producendo dei picchi, anche doppi (come quello alle 10:52 del 19 febbraio).

5.2.3 Differenze stagionali

Passando dalla campagna estiva a quella invernale, come nel caso della centrale elettrica, la concentrazione di vapore acqueo si riduce grosso modo di un fattore 2. Ancora una volta, la causa di tale diminuzione va ricercata nella diminuzione della temperatura e, quindi, della pressione di vapore saturo.

Per quanto riguarda l'etilene, anche se, rispetto a luglio, in febbraio si riscontrano valori leggermente superiori, la media stagionale è inferiore, a causa del maggior numero di basse concentrazioni. L'ammoniaca presenta un comportamento interstagionale simile: anche se alcuni valori invernali sono i più alti in assoluto, le medie di luglio e febbraio sono praticamente uguali. Al contrario i valori medi di carico aerosolico si riducono di un fattore 2, probabilmente a causa dell'effetto pulente della pioggia

sull'aria, mentre i profili evidenziano una maggiore variabilità, probabilmente a causa del forte vento che trasporta strati più o meno ricchi di goccioline d'acqua.

5.2.4 Test di risoluzione spaziotemporale

Alla fine della campagna di misura (17:11 del 19 febbraio), nello stabilimento petrolchimico è stato condotto un test di risoluzione spaziotemporale. ATLAS è stato puntato in verticale e, invece di mediare su centinaia di colpi, è stato misurato il carico aerosolico ogni 30 colpi laser, corrispondenti a 6 s. Cinque profili consecutivi, estratti da tale campione, sono riportati in Fig. 13 con risoluzione spaziale pari a 15 m. Il grafico dimostra che il lidar è in grado di rivelare variazioni di carico aerosolico sia lente ed estese, sia rapide e localizzate: si noti l'aumento costante passando dal profilo 0 al profilo 4 tra 300 e 500 m e l'apparire e lo scomparire di sottili strati retrodiffondenti (particolarmente evidenti quelli a 1500 m nel profilo 0 e a 2850 m nel profilo 4). In conclusione, le risoluzioni spaziale e temporale di ATLAS sono almeno di 15 m e 6 s, rispettivamente.

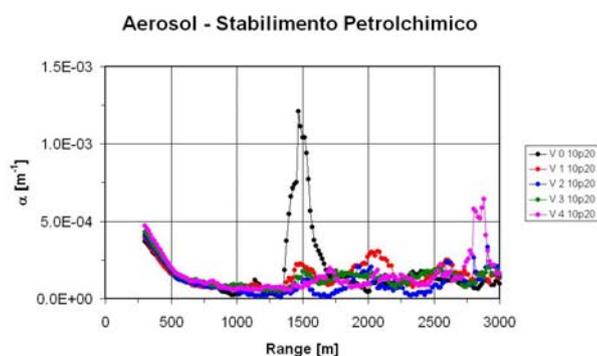


Fig. 13 – Cinque profili verticali di carico aerosolico misurati a distanza di 6 s l'uno dall'altro presso lo stabilimento petrolchimico di Brindisi alle 17:11 del 19 febbraio 2009.

6 Conclusioni

Dopo la campagna estiva (9-11 luglio 2008), il lidar atmosferico ATLAS, a bordo del laboratorio mobile ENVILAB, ha svolto una campagna invernale di misura dell'inquinamento atmosferico presso la centrale termoelettrica ENEL di Cerano e lo stabilimento petrolchimico ENI di Brindisi (17-19 febbraio 2009). Dal 17 febbraio mattina al 19 febbraio pomeriggio, sono state effettuate 440 misure di etilene, vapore acqueo, ammoniaca e carico aerosolico. L'ozono non è stato rilevato, in quanto si tratta di un inquinante secondario che si sviluppa solo in estate a causa dell'elevata radiazione solare (smog fotochimico). L'intervallo di misura ha raggiunto 3 km, le risoluzioni spaziale e temporale si sono spinte fino a 15 m e 6 s, rispettivamente. Nonostante le circostanze sperimentali difficili, sia per il medio-alto carico aerosolico, sia per un guasto nel circuito di alta tensione del laser, sono stati raccolti più dati che in estate e gli errori di misura sono stati contenuti generalmente nell'ordine di decine di ppb per etilene e ammoniaca, frazioni di torr per il vapore acqueo e 10% per il carico aerosolico.

Le misure effettuate sono state utilizzate sia per definire un quadro osservativo (rilevazioni di vapore acqueo combinate ai dati meteorologici), sia per valutare la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale dell'inquinamento (misure di etilene, ammoniaca e carico aerosolico).

I risultati finali indicano che l'inquinamento da particolato è presente presso lo stabilimento petrolchimico, mentre nella centrale elettrica si misura un valore di fondo. Questi risultati, però, sono influenzati dalla direzione del vento e dall'effetto pulente delle precipitazioni. Per quanto riguarda gli inquinanti gassosi, ammoniaca ed etilene sono presenti in entrambi i siti. L'ammoniaca è particolarmente elevata il 17 febbraio presso la centrale elettrica, l'etilene il 19 febbraio presso lo stabilimento petrolchimico. Inoltre, nello stabilimento petrolchimico, è stato osservato un ciclo diurno nei dati di ammoniaca e carico aerosolico, comportamento rilevante ai fini della raccolta di informazioni sull'evoluzione e l'origine dell'inquinamento. Queste osservazioni, combinate con le informazioni sui venti, suggeriscono che lo stabilimento petrolchimico sia una sorgente di etilene, ammoniaca e particolato.

Le misure lidar di vapore acqueo sono in accordo con quelle convenzionali. Per quanto riguarda gli inquinanti, invece, i dati delle centraline correlano con quelli di ATLAS solo nel caso del particolato allorché entrambi gli strumenti sono nello stesso sito (centrale elettrica). Ammoniaca, etilene, biossido

di azoto e biossido di zolfo hanno andamenti diversi, indicando che le sorgenti relative sono indipendenti.

Venendo alle differenze stagionali, sia nella centrale elettrica, sia nella zona industriale si riscontrano per ammoniaca ed etilene valori più elevati in inverno che in estate. Nondimeno, considerando le medie stagionali, si osserva una costanza quasi perfetta per l'etilene nella centrale elettrica e per l'ammoniaca nella zona industriale. Al contrario, soprattutto presso la centrale elettrica, il carico aerosolico è inferiore in febbraio rispetto a luglio. Tale risultato, però, potrebbe risentire della direzione del vento e dell'effetto pulente delle precipitazioni e non autorizza a concludere che l'inquinamento da particolato immesso dalla centrale elettrica e dalla zona industriale sia inferiore nei mesi invernali.

Sebbene le campagne di misura del luglio 2008 e del febbraio 2009 abbiano dimostrato il potere diagnostico del lidar atmosferico, è innegabile che sia auspicabile eseguire serie più lunghe di misure, idealmente con un sistema fisso ininterrottamente funzionante, in modo da affrancare le informazioni ottenute da fenomeni di fluttuazione e dall'influenza delle variabili meteorologiche (vento e precipitazioni). Inoltre, sarebbe utile effettuare un ciclo di misure in un'area il meno possibile inquinata, anche se soggetta alle stesse variabili naturali (come, ad esempio, l'aerosol marino), in modo da avere una stima dei valori di fondo delle concentrazioni.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano per il sostegno e i dati delle centraline il Dr. Pasquale Epifani e la Sig.a Stefania Leone (Servizio Ambiente della Provincia di Brindisi) e per l'accoglienza il personale dell'ENEL (Dr.ssa Marcella Polignano e Ing. Vincenzo Putignano) e dell'ENI (Ing. Francesco Leone). Sono inoltre grati alla Dr.ssa Roberta Fantoni per l'incoraggiamento e al Sig. Roberto Giovagnoli per la realizzazione di parti meccaniche.

Bibliografia

- [1] Colao F., Del Bugaro D., Fiorani L., Palucci A., *Monitoraggio atmosferico mediante telerilevamento laser nella Provincia di Brindisi*, ENEA, Frascati, Italy, 2008.
- [2] Fiorani L., “Environmental monitoring by laser radar,” in *Lasers and Electro-Optics at the Cutting Edge*, Larkin S. B., ed., Nova Science Publishers, New York, US, 2007, pp. 119-171.
- [3] Fiorani L., Colao F., Palucci A., “Measurement of Mount Etna plume by CO₂-laser-based lidar,” *Optics Letters* **34**, 800-802 (2009).
- [4] Direttiva Europea 2001/81/CE.
- [5] Seinfeld J. H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, New York, US, 1986.
- [6] www.eurometeo.com
- [7] Comunicazione privata della Sig.a Stefania Leone, Servizio Ambiente della Provincia di Brindisi.