

**G. PACE, A. DI SARRA, D. MELONI,
T. DI IORIO**

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

D. SFERLAZZO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Laboratorio di Lampedusa

**F. ANELLO, C. BOMMARITO, F. MONTELEONE,
S. PIACENTINO**

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Ufficio Territoriale di Palermo

B. DI PIETRA

Dipartimento Unità Tecnica Efficienza Energetica
Servizio Analisi e valutazione di sistemi per l'efficienza energetica
Ufficio Territoriale di Palermo

**SVILUPPO DI UN ALGORITMO AUTOMATICO
PER LA DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE
DI CALIBRAZIONE DI UN FOTOMETRO SOLARE**

RT/2017/45/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

G. PACE, A. DI SARRA, D. MELONI
T. DI IORIO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

D. SFERLAZZO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Laboratorio di Lampedusa

F. ANELLO, C. BOMMARITO, F. MONTELEONE
S. PIACENTINO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e Valorizzazione del Territorio
e del Capitale Naturale
Laboratorio di Osservazione e Analisi del Clima
Ufficio Territoriale di Palermo

B. DI PIETRA

Dipartimento Unità Tecnica Efficienza Energetica
Servizio Analisi e valutazione di sistemi per l'efficienza energetica
Ufficio Territoriale di Palermo

SVILUPPO DI UN ALGORITMO AUTOMATICO PER LA DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE DI CALIBRAZIONE DI UN FOTOMETRO SOLARE

RT/2017/45/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

SVILUPPO DI UN ALGORITMO AUTOMATICO PER LA DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE DI CALIBRAZIONE DI UN FOTOMETRO SOLARE

G. Pace, A. di Sarra, D. Meloni, T. Di Iorio, D. Sferlazzo, F. Anello, C. Bommarito, F. Monteleone
S. Piacentino, B. Di Pietra

Riassunto

Negli ultimi 30 anni misure di spessore ottico dell'aerosol sono divenute sempre più comuni, sia grazie alla presenza di reti internazionali di fotometri solari (e.g. AERONET, SkyNet, SkyRad, AeroCan) che per le stime ricavate da misure satellitari (e.g. MODIS). Queste misure sono comunemente utilizzate sia per ricerche riguardo i cambiamenti climatici, che per tematiche inerenti la qualità dell'aria e l'efficienza dei sistemi ad energia solare.

Per ottenere stime accurate dello spessore ottico dell'aerosol da fotometri solari è indispensabile utilizzare procedure di calibrazione oggettive e ripetibili. Il metodo più diffuso per la calibrazione in campo dei fotometri solari viene chiamato Langley *plot*.

Questo rapporto tecnico descrive l'implementazione di un algoritmo oggettivo che applichi questo metodo a lunghe serie temporali, in maniera completamente automatica. L'algoritmo è stato applicato alle misure acquisite tra il 2013 ed il 2017 dal fotometro solare SP02 prodotto dalla ditta Middleton, installato sul tetto della Stazione di Osservazione Climatiche ENEA di Lampedusa (<http://www.lampedusa.enea.it>).

I risultati sono discussi mediante il confronto con i valori di spessore ottico ricavati da un radiometro di riferimento installato presso l'Osservatorio, anche tenendo conto dell'impatto che i fenomeni di deposizione possono avere sulle misure del SP02.

L'algoritmo ha dato prova di funzionare correttamente e verrà applicato ad altri siti di misura caratterizzati da diverse condizioni climatiche dove operano i ricercatori del Laboratorio di Osservazione e Analisi della Terra e del Clima, tra cui l'Osservatorio Atmosferico Artico di Thule nel nord della Groenlandia (<http://www.thuleatmos-it.it/>).

Parole chiave: Fotometri solari, spessore ottico dell'aerosol, Langley plot.

Abstract

During the last 30 years measurements of aerosol optical depth have become widely diffuse due to the presence of international measurement networks (e.g., AERONET, SkyNet, SkyRad, AeroCan) and to the available determinations by satellite sensors (e.g. MODIS). Nowadays these measurements are commonly used for studies on climate change, air quality, and solar energy production.

The use of objective and repeatable procedures is mandatory to be able to accurately estimate the aerosol optical depth by sun photometer. The most common method applied for the in situ sun photometers' calibration is named Langley plot.

This technical report describes the implementation of a fully automatic objective algorithm that applies this method to long time series. The algorithm has been applied to measurements carried out between 2013 and 2017 at the ENEA Station for Climate Observations on the island of Lampedusa by a SP02 Middleton sun photometer (<http://www.lampedusa.enea.it>).

The discussion of the results is carried out comparing the retrieved aerosol optical depth with that estimated by a reference shadowband radiometer installed at the Observatory. The analysis also takes into account the influence produced by particles' deposition on SP02 measurements.

The algorithm has been tested and works properly in the difficult environmental conditions occurring at Lampedusa. The method will be applied to other operational sites in different climatic regimes run by the Laboratory Observation and Analyses of Earth and Climate, such as the Thule High Arctic Atmospheric Observatory (THAAO, <http://www.thuleatmos-it.it/>) in north-western Greenland.

Key words: sun-photometer, aerosol optical depth, Langley plot.

INDICE

IL METODO LANGLEY-PLOT	7
SVILUPPO DI UN ALGORITMO OGGETTIVO PER LA CALIBRAZIONE DI UN FOTOMETRO SOLARE	11
STIMA DELLO SPESSORE OTTICO E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	22
DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI ÅNGSTRÖM	33
CONCLUSIONI	36
APPENDICE: DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROGRAMMA PRINCIPALE	37
RINGRAZIAMENTI	42
BIBLIOGRAFIA	43

IL METODO LANGLEY PLOT

L'uso di fotometri solari per misurare l'estinzione atmosferica degli aerosol si è sempre più diffuso a partire dagli anni '60 del secolo scorso (Volz, 1959; Frohlich, 1979; Volz, 1974; Shaw et al. 1973) e, grazie al miglioramento della strumentazione e alle tecniche di inversione dei dati, attualmente consente non solo la stima dello spessore ottico degli aerosol, definito come il valore integrato dell'estinzione prodotta dal particolato atmosferico, ma anche quella della loro distribuzione dimensionale (King et al. 1978; Yamamoto e Tanaka, 1969) ed entro certi limiti l'individuazione del tipo di aerosol prevalente sulla colonna atmosferica (O'Neill e Royer, 1993; Pace et al. 2006; Meloni et al. 2006); oltre che lo studio degli aerosol in atmosfera i fotometri solari sono ampiamente utilizzati per la misura della contenuto colonnare di diversi gas presenti in atmosfera tra cui il vapore acqueo (Volz, 1974; Pittset al. 1977; Bird e Hulstrom, 1982; Halthore et al. 1997), l'ozono (Basher, 1982; Michalsky et al. 1995) e il biossido di azoto (NO₂, Shaw, 1976).

Come per qualunque altra strumentazione l'elemento chiave per garantire l'accuratezza e la continuità delle misure è la procedura di calibrazione che comunemente viene effettuata in laboratorio utilizzando delle lampade di riferimento o "sul campo" mediante un metodo chiamato Langley *plot*, in riferimento al lavoro pionieristico del fisico statunitense Samuel Pierpont Langley (1834-1906).

Il Langley *plot* consente di ricavare il segnale $V_{\lambda,0}$ (generalmente un segnale in tensione) che un fotometro solare misurerebbe se osservasse il sole fuori dall'atmosfera terrestre, assumendo che l'attenuazione atmosferica rimanga costante durante le misure, che generalmente vanno dall'alba al mezzogiorno solare, o dal mezzogiorno solare al tramonto. Per questo motivo il metodo funziona al meglio se applicato in siti di alta montagna, meno affetti dalla presenza e dal ciclo giornaliero degli aerosol.

Per derivare le equazioni su cui si basa il Langley *plot* si parte dalla legge di Beer-Lambert-Bouguer che descrive l'attenuazione cui è sottoposta la radianza attraversando un mezzo con determinate caratteristiche chimico-fisiche, dove per radianza si intende il flusso di radiazione per unità di angolo solido.

Nel caso dell'atmosfera terrestre l'estinzione di un fascio di radiazione monocromatica segue la legge

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\lambda,0}}{R^2} \exp(-\tau_{\lambda} m_{\theta}) \quad 1)$$

dove L_{λ} è la radiazione monocromatica che raggiunge il suolo alla lunghezza d'onda λ , R è la distanza Terra-Sole espressa in unità astronomiche al momento dell'osservazione, m_{θ} è la massa d'aria funzione dell'angolo zenitale solare θ e τ è lo spessore ottico dell'atmosfera, definito come l'integrale dell'estinzione della radiazione attraverso l'atmosfera, ossia $\tau = \int_0^{z_{atm}} k_{ext}(z) dz$.

La tensione misura dal fotometro solare è proporzionale a L_{λ} e può quindi essere espressa come

$$V_{\lambda} = \frac{V_{\lambda,0}}{R^2} \exp(-\tau_{\lambda} m_{\theta}) \quad 2)$$

Lo scopo di questo processo di calibrazione indiretto è quindi la determinazione di $V_{\lambda,0}$.

L'estinzione atmosferica è dovuta al contributo di tutti i costituenti, siano essi molecole, gas o aerosol, in grado di interagire con la radiazione a lunghezza d'onda λ , e lo spessore ottico atmosferico è dato dalla somma dei loro contributi:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{mol,\lambda} + \tau_{gas,\lambda} + \tau_{a,\lambda} \quad 3)$$

dove i 3 termini sulla destra dell'eq. 3) indicano rispettivamente lo spessore ottico dovuto alla diffusione da parte delle molecole dei gas presenti in atmosfera, generalmente chiamato contributo molecolare, all'assorbimento dei gas, e ai fenomeni di estinzione (ossia di diffusione e di assorbimento) da parte degli aerosol. Si noti che il contributo di tutti questi termini dipende della lunghezza d'onda; di conseguenza selezionando l'intervallo spettrale delle osservazioni si possono studiare sia gli effetti dell'aerosol che quelli dei gas. Per brevità d'ora in avanti si ometterà la dipendenza esplicita dalla lunghezza d'onda dei vari parametri.

L'eq. 2) si può quindi riformulare come,

$$V = \frac{V_0}{R^2} \exp[-\tau_{mol} m_{mol,\theta} - \tau_{gas} m_{gas,\theta} - \tau_a m_{a,\theta}] \quad 4)$$

Se la lunghezza d'onda utilizzata è distante da bande di assorbimento intense di gas atmosferici, possiamo definire V_a , che corrisponde alla tensione che si misurerebbe se solo gli aerosol fossero presenti in atmosfera, come

$$V_a = V \exp[\tau_{mol} m_{mol,\theta} + \tau_{gas} m_{gas,\theta}] \quad 5)$$

Si usa questa definizione poiché nel caso in cui l'assorbimento dei gas sia piccolo, sia lo spessore ottico dovuto al contributo molecolare che quello dovuto all'assorbimento dei gas ad una data lunghezza d'onda sono noti con un elevato grado di precisione, una volta nota la pressione atmosferica al suolo e l'abbondanza colonnare del gas che assorbe nell'intervallo spettrale di misura del fotometro.

Il contributo molecolare viene stimato tramite la teoria di Rayleigh e vale (Hansen e Travis, 1974)

$$\tau_{mol} = c_1 \lambda^{-4} (1 + c_2 \lambda^{-2} + c_3 \lambda^{-4}) \frac{P}{P_0} \quad 6)$$

dove c_1 , c_2 e c_3 sono coefficienti noti, P_0 vale 1013 mbar e P è la pressione al suolo.

Il valore della massa d'aria per il contributo molecolare m_{mol} è fornita da Kasten e Young (1989) e vale

$$m_{mol} = \frac{1}{\cos(\theta) + d_1 * (d_2 - \theta)^{-d_3}} \quad 7)$$

dove $d_1 = 0.50572$, $d_2 = 96.07995^\circ$, $d_3 = 1.6364$.

Come descritto nel paragrafo seguente, in questo studio si sono utilizzati i dati di un fotometro solare operante a 412, 500, 862 e 1020 nm, che sono le lunghezze d'onda prese come riferimento per il calcolo di $\tau_{mol,\lambda}$ e $\tau_{gas,\lambda}$.

L'ozono presenta delle bande di assorbimento in corrispondenza di alcune delle lunghezze d'onda considerate. In generale il suo spessore ottico vale

$$\tau_{O_3} = f_T O_3 \quad 8)$$

dove O_3 è il contenuto colonnare di ozono espresso in unità Dobson (DU) e

$$f_T = (C_{0,\lambda} + C_{1,\lambda} (T - T_0) + C_{1,\lambda} (T - T_0)^2) 10^{-20} \quad 9)$$

è espresso in cm^2 ed è la sezione d'urto dell'ozono alla lunghezza d'onda λ , $T_0=273.15$ K e $T=220.15$ K è la temperature media a cui si trova il massimo di ozono in stratosfera alle nostre latitudini.

Come riferimento si riportano in **tabella 1** i valori dello spessore ottico molecolare alla pressione standard e quelli dell'ozono calcolato assumendo il contenuto colonnare di ozono pari a 312 DU, che corrisponde al valore medio annuale misurato a Lampedusa, che è il sito selezionato per provare il nuovo algoritmo (si veda il prossimo paragrafo).

Lunghezza d'onda, λ	412 nm	500 nm	862 nm	1020 nm
τ_{mol}	0.31850	0.14360	0.015800	0.0080
τ_{O_3}	0.00039	0.00775	0.000395	-

Tabella 1. Il contributo molecolare e dell'ozono alle lunghezze d'onda usate in questo lavoro.

Sostituendo la 4) nella 5) e passando al logaritmo dei vari termini, si ha:

$$\ln V_a = \ln V + \tau_{mol} m_{mol,\theta} + \tau_{gas} m_{gas,\theta} = (\ln V_0 - \ln R^2) - \tau_a m_{a,\theta} \quad 10)$$

Ponendo $Y=\ln V_a$, $C=\ln V_0-\ln R^2$, $B=\tau_a$ e $X=m_{a,\theta}$ abbiamo

$$Y = C - B X.$$

Si ha quindi una relazione lineare che lega il segnale prodotto dalla presenza dell'aerosol in atmosfera ($\ln V_a$) alla variazione della massa d'aria ($m_{a,\theta}$) e dunque dell'angolo zenitale. Il coefficiente angolare (τ_a) rappresenta lo spessore ottico dell'aerosol durante le osservazioni e l'intercetta ($C=\ln V_0-\ln R^2$) è il valore della tensione che lo strumento misurerebbe alla sommità dell'atmosfera se posto ad 1 unità Astronomica dal Sole.

Nel caso in cui lo spessore ottico rimanga costante durante l'intervallo di tempo selezionato e l'intervallo dei valori della massa d'aria sia sufficiente ampio, si può calcolare l'intercetta C e la pendenza B dall'eq. 10).

Una volta determinata C è possibile calcolare il valore istantaneo di τ_a .

Esplicitando lo spessore ottico degli aerosol, si ha

$$\tau_a = \ln V + \tau_{mol} m_{mol,\theta} + \tau_{gas} m_{gas,\theta} = \frac{\ln V_0 - \ln R^2 - \ln V}{m_{a,\theta}} - \tau_{mol} - \tau_{gas} \quad 11)$$

ossia,

$$\tau_a = \frac{C - \ln V}{m_{a,\theta}} - (\tau_{mol} + \tau_{gas}) \quad 12)$$

Al netto di una costante additiva espressa dal contributo dello spessore ottico molecolare e dei gas, lo spessore ottico dell'aerosol dipendente dalla massa d'aria e la sua incertezza dipende linearmente dall'incertezza con cui si stima C.

SVILUPPO DI UN ALGORITMO OGGETTIVO PER LA CALIBRAZIONE DI UN FOTOMETRO SOLARE

Scopo di questo lavoro è presentare una metodologia automatica per la stima della costante di calibrazione di fotometri solari, di seguito denominata C , che sia utilizzabile senza l'ausilio di informazioni complementari riguardanti la copertura nuvolosa e che quindi elimini automaticamente i dati di cielo nuvoloso o parzialmente nuvoloso. Una volta stimata C e verificatene le sue variazioni annuali ed inter-annuali, applicando l'eq. 12) si vuole calcolare lo spessore ottico per lunghe serie di dati.

Questa metodologia è stata per la prima volta applicata al fotometro solare SP02 prodotto dalla ditta australiana Middelton. Nel giugno del 2013 lo SP02 è stato installato sull'inseguitore solare Kipp & Zonen 2AP posto sul tetto della Stazione di Osservazioni Climatiche ENEA sull'isola di Lampedusa. Le principali caratteristiche tecniche del fotometro sono riportate in **tabella 2**.

Modello	Campo di vista	Lunghezza d'onda dei singoli canali in nm (banda passante 10 nm)			
SP02	5.0°	412	500	862	1020
Segnale di uscita	Da -0.05 a 4.5 V				
Tempo di risposta	0.2 s				
Temperatura di funzionamento	-30 °C/+70C°				
Tipo di sensore	UV fotodiodo al silicio; 33 mm ²				
Alimentazione	5.5/14.5 VDC, 20 mA				

Tabella 2. Caratteristiche tecniche del fotometro SP02.

Sullo stesso inseguitore (**figura 1**), normalmente sono anche installati un piranometro e un pirgeometro schermati dalla radiazione solare diretta, ed un pireliometro; questi strumenti misurano rispettivamente l'irradianza solare diffusa (0.3-2.8 μm), l'irradianza infrarossa (3.5-50.0 μm) e l'irradianza solare diretta (0.2-4.0 μm). L'accuratezza del puntamento dell'inseguitore solare è cruciale per avere serie storiche ben calibrate di spessore ottico ed è di circa 0.05°.

I requisiti considerati per la realizzazione della metodologia per la stima della costante di calibrazione del fotometro sono stati:

- 1) applicabilità a lunghe serie di misure fotometriche
- 2) indipendenza dal sito di misura
- 3) oggettività e controllabilità dei risultati intermedi e finali
- 4) verifica dei passaggi intermedi

Sinteticamente il metodo consiste nel selezionare le misure giornaliere e nel dividerle in un intervallo mattutino ed uno pomeridiano, a cui viene applicato il Langley *plot* (d'ora in avanti LP) in maniera indipendente per ogni canale (lunghezza d'onda) selezionato.

Per ottimizzare il metodo si sono usati sia criteri oggettivi indipendenti dal sito di misura, che valori di soglia definiti a priori derivati da analisi preliminari svolte durante l'implementazione del metodo.



Figura 1. L'inseguitore solare 2AP della Kipp & Zonen con il suo carico di strumenti. In alto si possono notare i tre bracci con all'estremità le sfere per schermare i sensori installati sul piano dell'inseguitore dalla radiazione solare diretta. Sul piano sono installati da destra a sinistra: un piranometro Eppley PSP con il suo ventilatore, uno spettroradiometro Satlantic e un pirgeometro CGR4 della Kipp & Zonen dotato anch'esso di ventilatore. Sotto la piastra sul lato sinistro si notano due fotometri Middelton, un SP02 ed un SP02-L, riconoscibili dai 4 alloggiamenti per i filtri e sensori; sul lato destro dal basso verso l'alto sono visibili due pireliometri CHP1 della Kipp & Zonen e il piccolo sensore quadrangolare per il puntamento del sistema.

Partendo da lunghe serie temporali il passo iniziale è quello di selezionare i dati di un giorno con valori di massa d'aria, m_a , inferiori a 6 e valori in tensione maggiori di 10 mV.

La scelta di questi valori tiene rispettivamente conto della sensibilità dello strumento, e quindi della sua capacità di misurare la radianza a elevati valori di massa d'aria (angoli zenitali $\theta > 80.85^\circ$), e del fatto che la presenza di nubi attenua fortemente la radiazione diretta e quindi il segnale del fotometro. In condizioni di cielo sereno la tensione misurata dai diversi canali del SP02 per valori di massa d'aria pari a 6 ($\theta \cong 80.85^\circ$), varia da circa 200-300 mV del canale a 412 nm a circa 1500-1600 mV del canale a 1020 nm. Il valore di soglia di 10 mV tende quindi ad escludere i casi con nubi otticamente rilevanti o di mal funzionamento dell'inseguitore solare ed è ovviamente dipendente dallo strumento considerato. A titolo di esempio in **Figura 2** si mostra l'andamento del segnale dei 4 canali del SP02 del 27 e 28 Luglio 2013 in funzione dell'angolo zenitale e della massa d'aria.

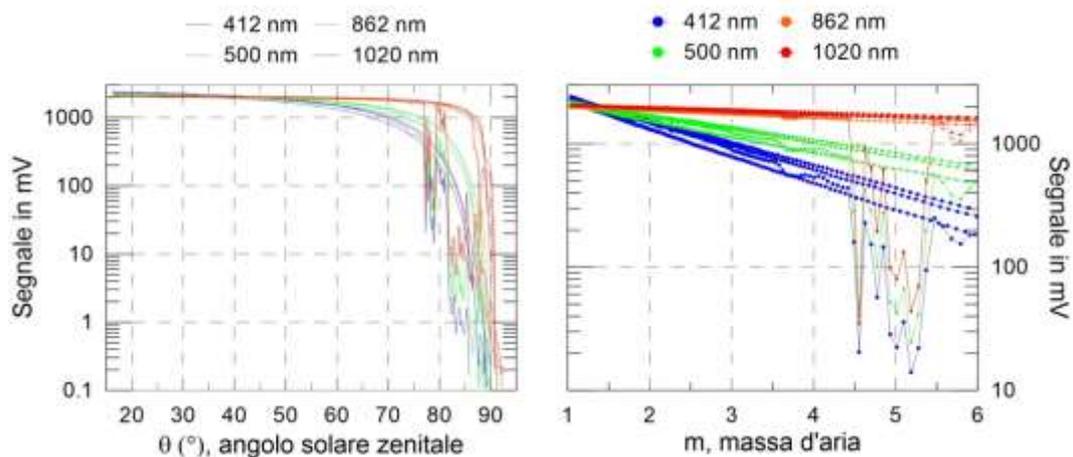


Figura 2. A andamento del segnale dei 4 canali del fotometro Middleton SP02 in funzione dell'angolo solare zenitale (a sinistra) e della massa d'aria (a destra) per il 27 e 28 Luglio 2013.

Per tener conto dell'asimmetria della densità temporale delle misure rispetto alla variazione di m_a (molte misure a piccoli valori di masse d'aria e poche a grandi) e quindi della disomogeneità dei valori rispetto all'asse delle ascisse del LP, si sono interpolate linearmente le tensioni misurate con risoluzione temporale di 1 minuto ad intervalli di angolo zenitale solare equispaziati pari a 0.01° .

Questa scelta consente di definire in maniera oggettiva un numero minimo di valori su cui poter effettuare il LP a valle dell'eliminazione dei periodi nuvolosi. Infatti dopo aver eliminato gli intervalli di cielo nuvoloso si possono avere casi con valori distribuiti in maniera disomogenea durante la giornata, che possono introdurre maggiori incertezze nella stima di C . Inoltre, come per altri criteri implementati nell'algoritmo, la possibilità di interrompere l'analisi della singola sessione prima di trovare il risultato finale consente un notevole risparmio del tempo macchina.

Suddivisi i dati giornalieri in un intervallo mattutino e pomeridiano, si definisce un numero minimo di valori per i due intervalli, basato sul confronto tra il numero di valori effettivamente misurati e quelli aspettati durante i due intervalli di misura. L'analisi avrà luogo se il numero dei dati selezionati (ma non ancora interpolati sui valori di m_a) è maggiore di $1/5$ dei dati misurati durante lo stesso intervallo.

D'ora in avanti si descriverà l'analisi per l'intervallo mattutino tenendo conto che quella per l'intervallo pomeridiano segue lo stesso approccio.

Utilizzando valori medi giornalieri della pressione atmosferica e del contenuto di ozono colonnare misurati a Lampedusa o ricavati da *database* meteorologici, si calcola il valore giornaliero dello spessore ottico molecolare, di quello dell'ozono e i parametri contenuti in eq. 10). Si calcola una prima regressione lineare tra i valori di $\ln V_a$ e m_a , da cui si ottiene una stima dei valori del $\ln V_0$ e di τ_a , da cui si ricava una prima variazione lineare di $\ln V_a$, denominata $\ln V_{a,1}$, che riproduce l'andamento del segnale al variare di m_a .

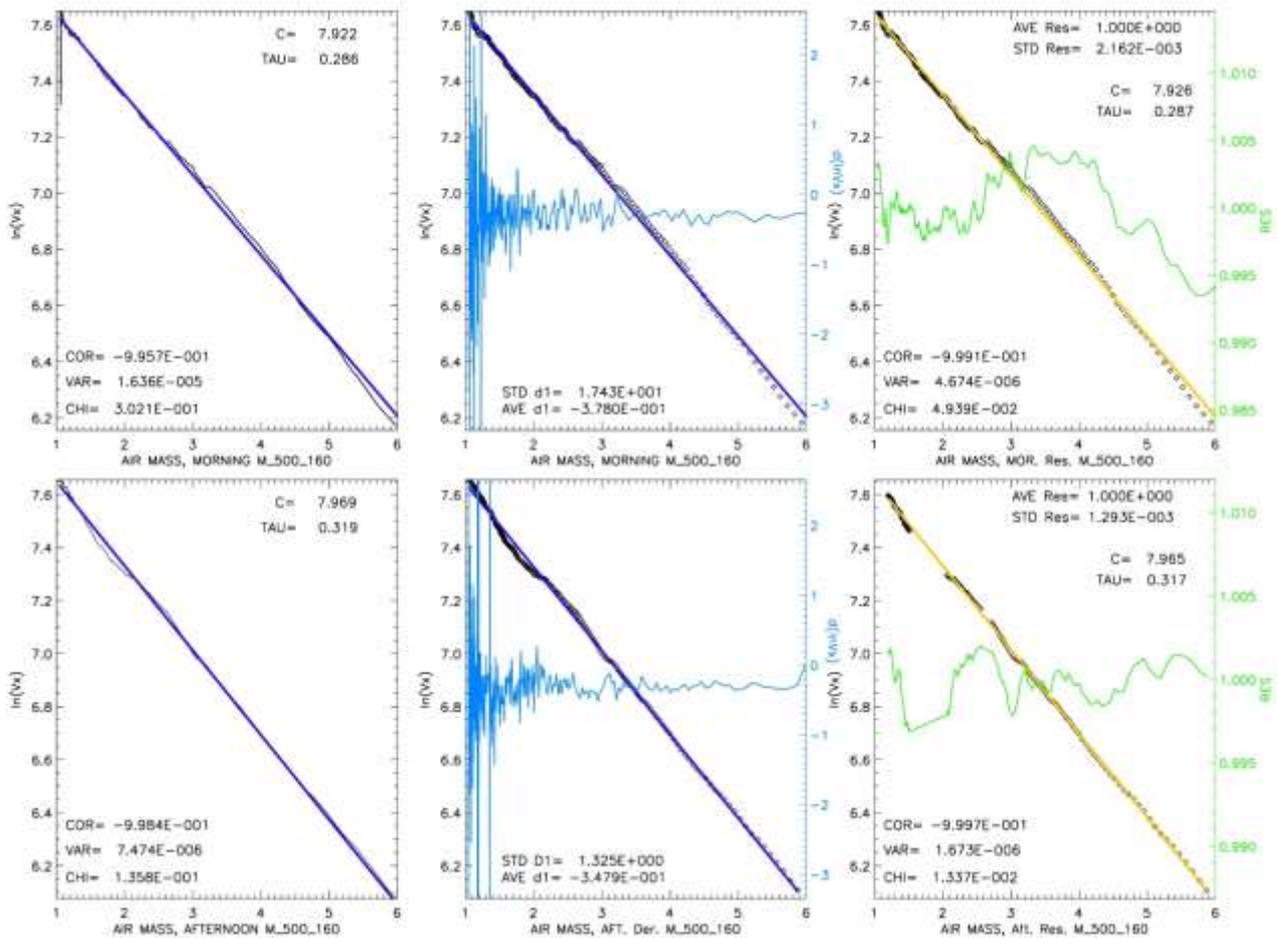


Figura 3. Il grafico di controllo dell'algoritmo per il 9 Giugno 2014, ossia il 160esimo giorno dell'anno. La riga in alto riassume graficamente i tre passi della selezione fatta durante l'intervallo mattutino, mentre quella in basso quelli per i dati pomeridiani. I grafici sulla prima colonna mostrano l'andamento del $\ln V_a$ in funzione della massa d'aria ed il risultato della prima regressione lineare (linea in blu). La seconda colonna mostra i dati legati al **test delle derivate** e quindi il valore della derivata (in blu) e la retta (linea in blu) ottenuta utilizzando solo i valori che soddisfano questo test. Sulla terza colonna sono mostrati i valori che passano la selezione dei residui ed il valore dei residui stessi (in verde).

In ogni riquadro si trovano scritti i valori ricavati dalla regressione o relativi ai criteri di selezione utilizzati.

Parametri relativi alla prima colonna: C e TAU indicano rispettivamente l'intercetta e il coefficiente angolare della regressione lineare, ossia il $\ln V_0$ e τ della sessione di misure, CORR, VAR e CHI indicano il valore del coefficiente di correlazione lineare, della varianza e del test del χ^2

Parametri relativi alla seconda colonna: STD d1 e AVE d1 indicano rispettivamente il valore della deviazione standard e della media delle derivate prima del $\ln V_a$.

Parametri relativi alla terza colonna: oltre agli indici già definiti nella prima colonna si sono introdotti il valore del AVE Res e del STD Res che indicano la media del residuo ed il suo valore standard.

Per analizzare la variabilità di $\ln V_a$ rispetto a $\ln V_{a,1}$ si calcola il rapporto tra i due. Il primo grafico sulla prima riga della **figura 3** mostra l'andamento di $\ln V_a$ (linea nera) e $\ln V_{a,1}$ (retta blu) al variare di m_a . Tutte queste informazioni riassunte in un file.

Il primo criterio oggettivo per la selezione dei dati, denominato **test delle derivate**, si basa sul fatto che in caso di cielo sereno in condizioni atmosferiche stabili caratterizzate da valori quasi costanti dello spessore ottico dell'aerosol, la radianza aumenta (diminuisce) monotonamente durante la mattina (pomeriggio). In un

caso ideale di cielo sereno ci si aspetta che la derivata del segnale rispetto alla massa d'aria (e anche al tempo) risulti essere sempre positiva di mattina e negativa di pomeriggio.

Nei casi reali la variabilità delle nubi o degli aerosol, o un disallineamento/riallineamento dell'inseguitore solare possono indurre un incremento o una riduzione del segnale e della sua derivata prima.

Si impongono quindi 2 condizioni:

- 1) Si escludono gli intervalli che presentino valori della derivata prima eccessivamente positivi o negativi, assumendo come riferimento il valor medio giornaliero della derivata del segnale rispetto alla variazione della massa d'aria. Praticamente si escludono i punti con derivata maggiore (minore) del valore medio cui viene sommato (sottratto) un valore pari a 2 volte il valore della deviazione standard della derivata. Quando i dati sono caratterizzati da un'elevata variabilità si utilizza un limite definito a priori per la deviazione standard della derivata del segnale, pari a 0.15.
- 2) Per escludere dall'analisi segnali fortemente attenuati dalla presenza di nubi stratiformi che non inducano variazioni di rilievo nella derivata del segnale, si escludono anche casi che presentino valore del $\ln V_a$ inferiori a 3, pari a circa a 20 mV.

La prima condizione prende spunto dal lavoro di Harrison e Michalsky (1994), mentre la seconda è legata alle caratteristiche del fotometro utilizzato.

Se il numero dei dati che soddisfa queste condizioni risulta eccessivamente piccolo (ossia inferiore ad 1/3 dei dati sottoposti a questo test) si passa all'analisi dei valori pomeridiani.

In caso contrario si ha un insieme di dati che potenzialmente può fornire un buon Langley *plot*, a condizione che i valori rimanenti siano distribuiti in maniera sufficientemente omogenea su un intervallo di valori di massa d'aria sufficientemente esteso, dove per sufficientemente esteso si assume maggiore di 4.

L'omogeneità della distribuzione dei valori viene valutata dividendo in 4 intervalli uguali l'intervallo di massa d'aria su cui si effettua l'analisi ed imponendo che in ogni intervallo siano presenti almeno 1/8 dei valori che hanno superato il **test delle derivate**.

Se queste condizioni non sono verificate si passa ad analizzare i dati pomeridiani, altrimenti si calcola una nuova regressione lineare tra i valori selezionati di $\ln V_a$ e m_a , i cui valori vengono indicati da $\ln V_{a,2}$, e quindi una nuova stima del valore di $\ln V_0$ e di τ_a . Il grafico degli andamenti di $\ln V_a$ (simboli in seconda colonna **figura 3**) e di $\ln V_{a,2}$ funzione di m_a (retta viola in seconda colonna **figura 3**), nonché l'andamento della derivata prima del segnale (linea in blu) viene mostrato nella seconda colonna della **figura 3**.

Come ulteriore condizione per verificare la bontà della selezione dei dati si calcola una soglia sul valore del residuo tra i valori misurati e quelli della loro regressione lineare normalizzato al valore della retta stessa, ossia $\text{residuo} = (1 - \ln V_a) / \ln V_{a,2}$. Si selezionano i valori il cui residuo sia inferiore a 0.01, ossia i valori del residuo $< 1\%$.

Se il numero dei valori selezionati è superiore ai 3/4 dei valori che hanno passato il criterio della derivata, si stima un nuovo valore della regressione lineare, indicato $\ln V_{a,3}$, e si ha una nuova stima dei valori del $\ln V_0$ e

di τ_a . Tra questi valori viene fatta un'ulteriore selezione basata sul test del χ^2 selezionando solo i LP con un χ^2 inferiore a 0.02. I risultati di questa selezione ed il valore del residuo (linea in verde) sono mostrati nella terza colonna della **Figura 3**.

Il diagramma di flusso dettagliato del programma è riportato in appendice.

In questo modo si ottiene una prima sequenza temporale delle costanti di calibrazione C, indipendentemente dal valore “medio” dello spessore ottico durante il Langley stesso.

Sebbene da un punto di vista matematico non sia strettamente necessario che lo spessore ottico degli aerosol sia piccolo, bensì che sia costante durante l'intervallo su cui si applica il LP, per evitare che variazioni di τ_a (ossia della pendenza della retta) determinino una stima inaccurata di C (intecetta) si pone una soglia al valore di τ_a che tenga conto del variare dello spessore ottico dell'aerosol con la lunghezza d'onda; nello specifico, per definire le soglie sul valore massimo accettabile di τ_a , si è assunto un valore dell'esponente di Ångström, un parametro che descriva la variazione di τ_a al variare di λ , pari a 1 (per la definizione esatta dell'esponente di Ångström e del suo significato relativamente alle misure di aerosol in atmosfera si rimanda al paragrafo *Determinazione dell'esponente di Ångström*).

Il valore di soglia dello spessore ottico dipende dal tipo di aerosol che più frequentemente si osserva con piccoli spessori ottici e dipende quindi dal sito di misura.

Il LP funziona al meglio lì dove il contenuto di aerosol sia piccolo e dove la sua variabilità durante la giornata sia minima: per questo motivo i siti ideali sono quelli in alta montagna. Nel nostro caso il LP si applica alle misure fatte a Lampedusa, un sito che a seconda della provenienza delle masse d'aria risulta caratterizzato da diversi tipi di aerosol che possono presentare valori anche molto elevati di τ_a specialmente nel caso di trasporto di aerosol desertico.

I valori di soglia per lo spessore ottico imposti per Lampedusa nella procedura del LP sono riportati in **tabella 3**.

Lunghezza d'onda	412 nm	500 nm	868 nm	1020 nm
Spesso ottico dell'aerosol	0.175	0.144	0.084	0.071

Tabella 3. Valori di soglia ammessi per lo spessore ottico medio dell'aerosol per l'applicazione del metodo del Langley plot. I valori si sono ricavati imponendo che lo spessore ottico dell'aerosol a 412 nm sia pari a 0.175 e che l'esponente di Ångström sia pari ad 1.

Tutti i valori di C ricavati dall'algorithmo nel 2014 indipendentemente dal valore di τ_a (linee continue) e quelli corrispondenti a spessori ottici inferiori alle soglie (simboli) sono mostrati in **figura 4**. Si noti come l'inclusione di questa soglia generalmente elimini i valori di C che più si allontanano dall'andamento medio. La variabilità di C associata ad ogni canale è comunque non trascurabile (circa $\pm 2-3\%$); per una massa d'aria di 1.5, un'incertezza su C del 3% corrisponde ad una incertezza su τ_a dell'ordine di 0.2.

Si pone quindi il problema di decidere se usare il valore di C ricavato da un singolo LP o un valore mediato su più C inclusi in una data finestra temporale, C_{COR} . La variabilità di C è legata ad una molteplicità di fattori che includono problemi strumentali, come la pulizia delle ottiche del radiometro, la possibile dipendenza dei sensori dalla temperatura e soprattutto il corretto funzionamento dell'inseguitore solare.

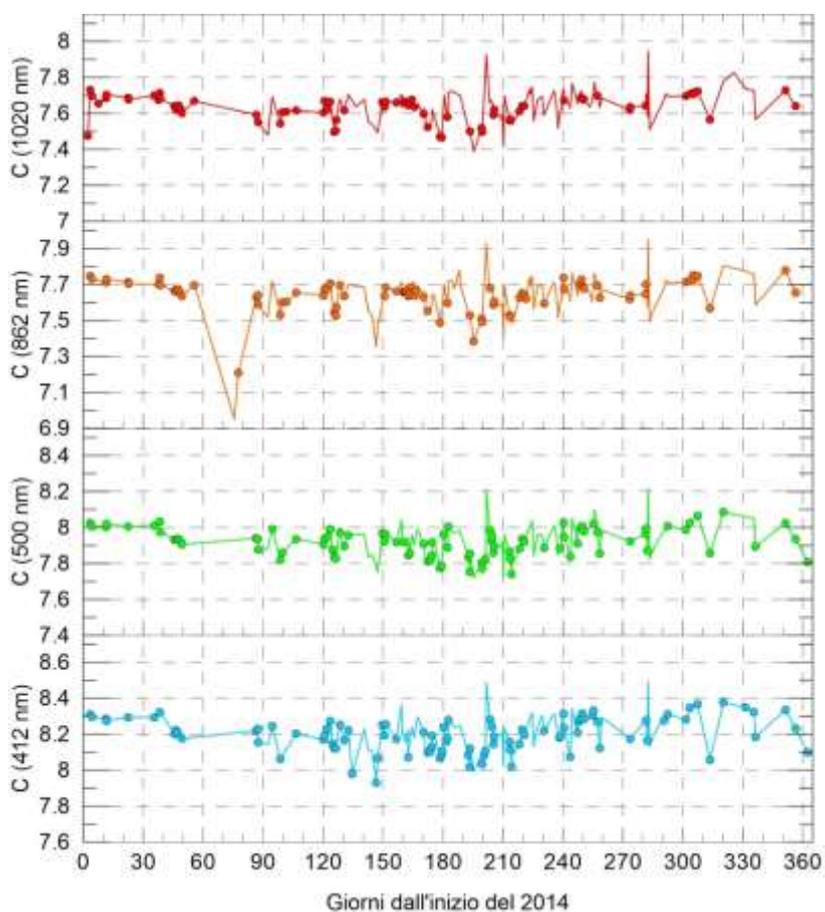


Figura 4. Variazione della costante di calibrazione C determinata per le 4 lunghezze d'onda del SP02 durante il 2014. Le linee continue mostrano tutti i valori selezionati dall'algoritmo, mentre i simboli indicano i valori corrispondenti a uno spessore ottico medio inferiore a quello della soglia riportate in **tabella 3**.

La scelta di utilizzare valori medi è pressoché univoca in letteratura (tra gli altri si ricordano Schmid e Wehrli, 1995 o il più recente Kiedron e Michalsky, 2016) ed è giustificata anche dalla necessità di non indurre rapide discontinuità nei valori di spessore ottico.

Per ottenere una serie omogenea di costanti di calibrazione si è quindi calcolato il valore della media corrente C_{COR} su una finestra temporale di ± 45 giorni. Dal calcolo di questa media corrente sono stati esclusi i valori la cui differenza con il valore medio fosse superiore al doppio della deviazione standard di C calcolata utilizzando i valori delle C derivati per l'intero database (2013-2017), ossia $|C - C_{COR}| > 2 * STD(C)$.

La variazione di C_{COR} e le soglie utilizzate per eliminare gli outlier sono mostrati in **figura 5**. Tutti i canali mostrano una variabilità annuale che presenta un minimo in estate che è tanto più accentuato quanto è

minore la lunghezza d'onda. Questo tipo di variabilità è stata osservata anche da altri autori ed è stata attribuita alla diversa sensibilità dello strumento con la temperatura (Shaw 1983, Forgan 1994, Schmid e Wehrli 1995; di Sarra et al., 2015).

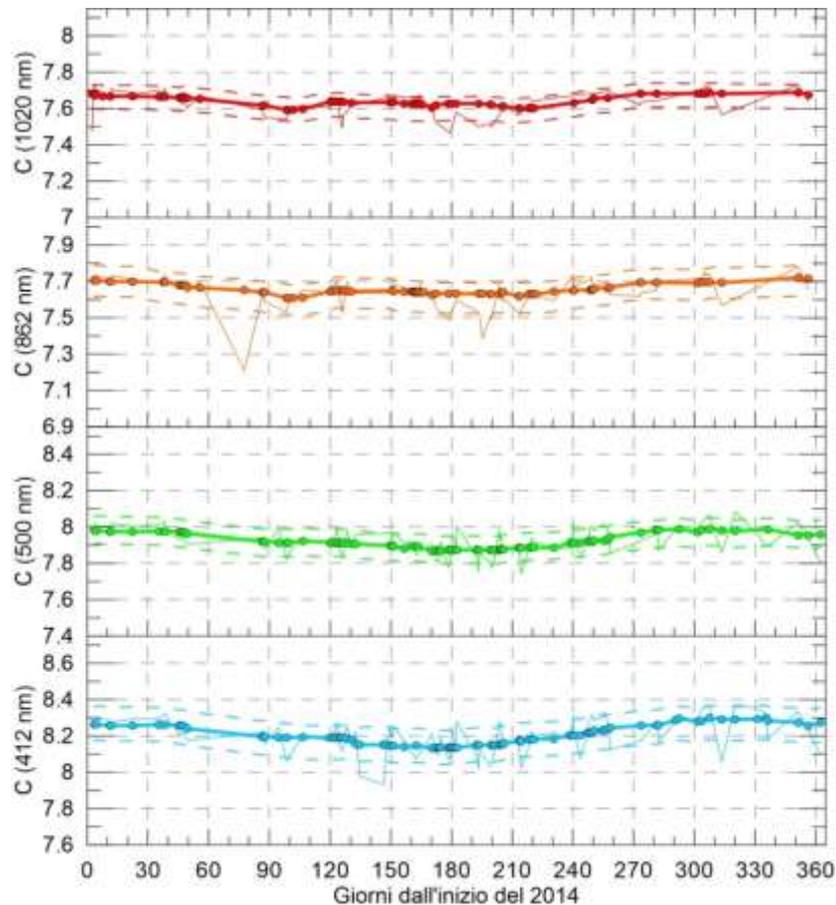


Figura 5. Variazione della media corrente della costante di calibrazione determinata per le 4 lunghezze d'onda del fotometro SP02 durante il 2014. Le linee tratteggiate indicano i valori di soglia. Il valore medio C_{COR} è indicato da cerchi connessi da una linea più spessa. I singoli valori di C sono indicati dalla linea più sottile.

Figura 6 mostra l'andamento di C_{COR} e C calcolate nei 4 anni di misura. La serie dei valori di C presenta notevoli interruzioni e andamenti irregolari nella tarda estate del 2013, nella seconda metà del 2015 ed a cavallo tra il 2016 ed il 2017.

Una trattazione dettagliata del funzionamento del fotometro SP02 installato a Lampedusa è oltre lo scopo di questo lavoro. Tuttavia, al fine di verificare le capacità del metodo di applicare automaticamente e con successo il LP e si è reso necessario verificare il corretto funzionamento dei fotometri.

A tal fine si sono calcolate le medie orarie diurne del segnale del canale a 862 nm normalizzate con la distanza terra-sole e la loro media corrente fatta su 11 campioni (**figura 7**).

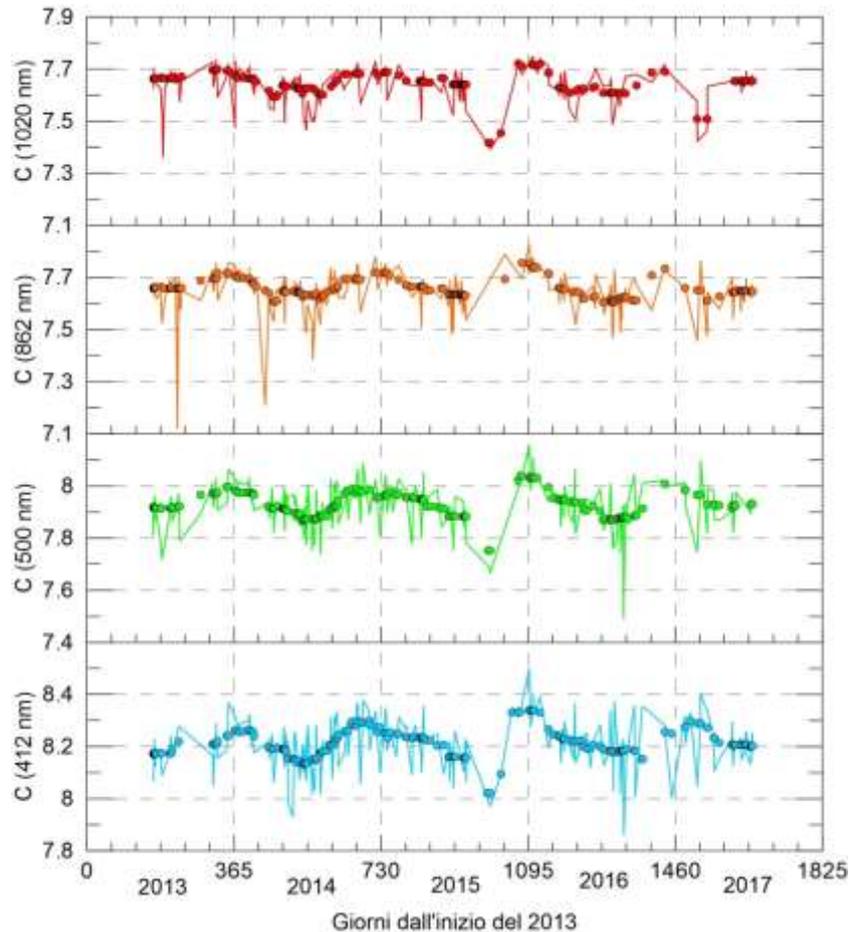


Figura 6. Andamento della costante di calibrazione media (C_{COR} , simboli) e dei singoli valori (C , linea continua) dei 4 canali dal 2013 al 2017.

Si è già evidenziato (si veda **figura 2** e annessa discussione) come in condizioni di cielo sereno per angoli zenitali maggiori di 80° (massa d'aria circa 6) i canali a lunghezze d'onda maggiori (862 e 1020 nm) misurino valori superiori a 1000 mV.

Sebbene durante giorni completamente nuvolosi sia possibile misurare valori medi del segnale inferiori a 10 mV, che indicano l'attenuazione quasi completa della componente diretta della radiazione, associabile alla presenza di una nube otticamente significativa, è ben difficile ipotizzare che a Lampedusa la presenza di queste nubi possa persistere per più giorni, specialmente in periodi diversi da quello invernale.

La spiegazione più plausibile e supportata dalle osservazioni quotidiane del personale ENEA presente a Lampedusa, è il disallineamento o il non funzionamento dell'inseguitore solare, dovuto ad esempio a interruzioni dell'alimentazione elettrica. I periodi caratterizzati da mal funzionamenti dell'inseguitore solare producono dati inconsistenti e sui quali non è possibile applicare con successo i Langley *plot*.

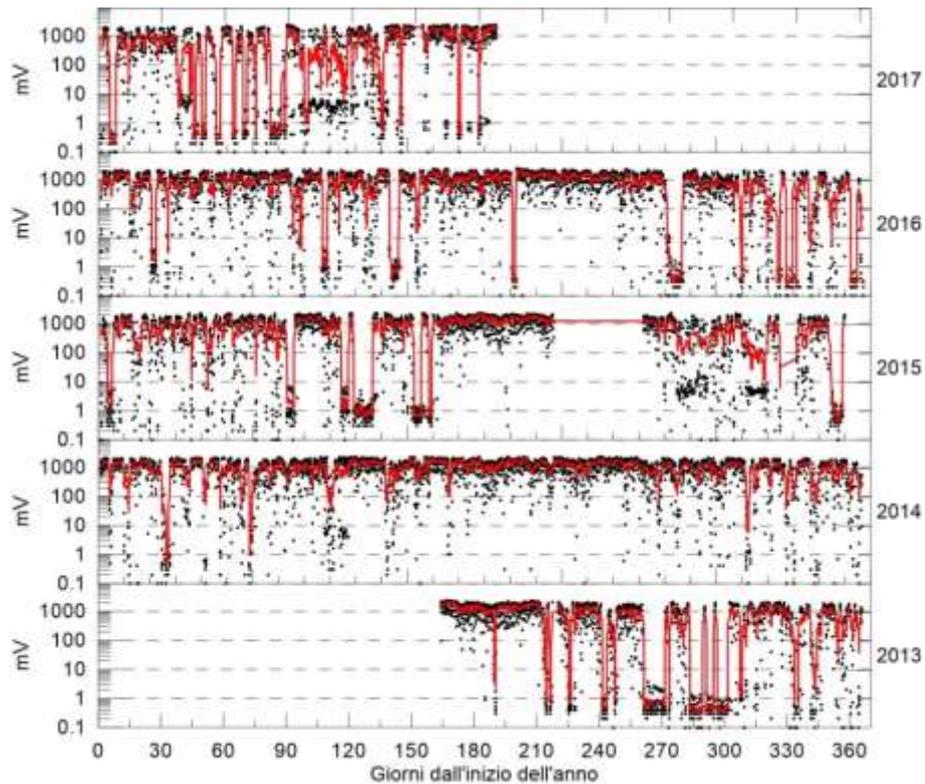


Figura 7. I cerchi indicano l'andamento della media oraria del segnale normalizzato ad 1 unità astronomica a 862 nm dal 2013 al 2017; la linea rossa mostra la loro media corrente calcolata su 11 valori.

La mancanza di costanti di calibrazione in alcuni episodi nella seconda parte del 2013 ben coincide con i frequenti disallineamenti mostrati in **figura 7**. Tra Agosto ed Settembre 2015 vi è circa 1 mese e mezzo di dati mancanti, mentre disallineamenti prolungati si ripetono anche nell'Aprile e nel Maggio dello stesso anno. E' particolarmente istruttivo l'andamento osservato nel Novembre 2015 (attorno al giorno 315) in cui si vede una decrescita graduale del segnale che suggerisce un progressivo disallineamento dell'inseguitore solare. La fine del 2016 ed l'inizio del 2017 sono nuovamente costellati da disallineamenti del sistema che si riflettono nella mancanza stime di C. D'altra parte appare evidente che in caso di misure continuative, come nel 2014 e durante la parte iniziale del 2016, l'algoritmo riesca a determinare un elevato numero di costanti di calibrazione (**figura 6**).

In base a queste osservazioni nel proseguo del lavoro si utilizzeranno solo le misure del SP02 acquisite durante il 2014, l'anno che mostra una maggiore consistenza. Per verificare che le costanti di calibrazione del 2014 siano rappresentative anche dei risultati ottenuti durante gli altri anni, si sono riportate in un grafico le distribuzioni dei valori di C (**figura 8**) e se ne sono calcolati i principali indici statistici (**tabella 4**). I valori medi di C coincidono a tutte le lunghezze d'onda entro la prima cifra significativa della loro deviazione standard.

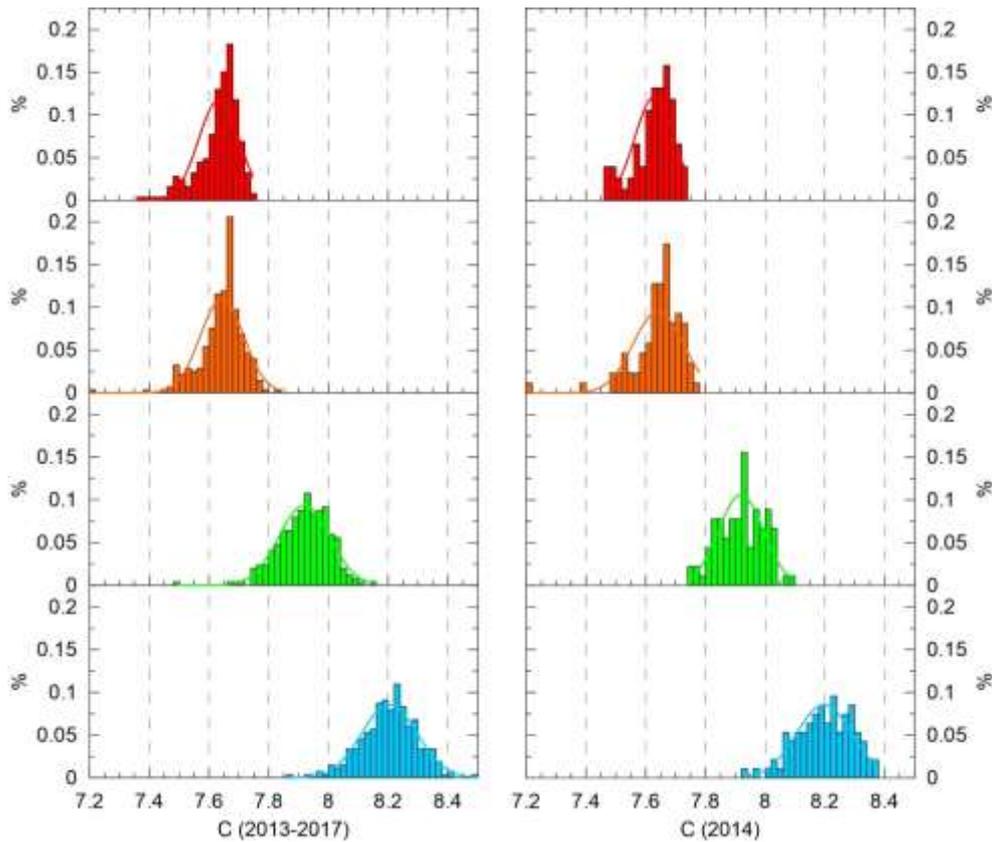


Figura 8. Distribuzione dei valori delle costanti di calibrazione calcolate durante tutto il periodo di misura (a sinistra) e nel solo 2014 (a destra); diversi colori delle barre indicano i valori di C dei 4 canali (412 nm-celeste, 500 nm-verde, 862 nm-arancione e 1024 nm-rosso). Le linee continue indicano il fit con una distribuzione normale.

Le distribuzioni di C ottenute sull'intero periodo a 412 e 500 nm presentano un'elevata simmetria che ben riproduce l'andamento di una distribuzione normale, mentre sia quella del canale a 862 nm che quella a 1064 nm appaiono maggiormente asimmetriche mostrando entrambe una coda di valori piccoli rispetto al valore medio. Gli stessi andamenti si riscontrano nei dati delle costanti di calibrazione ricavate nel solo 2014. Sia le distribuzioni che i valori statistici indicano che i risultati del 2014 sono ben rappresentativi dell'intero periodo di misura.

	2013-2017				2014			
Lunghezza d'onda (nm)	412	500	862	1024	412	500	862	1024
Numero di C	264	251	277	246	94	90	86	76
Valore medio di C	8.20	7.92	7.64	7.63	8.20	7.92	7.64	7.63
Deviazione standard di C	0.09	0.09	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07

Tabella 4. Numero di determinazioni, valor medio e deviazione standard delle costanti di calibrazione per il periodo 2013-17e per il solo 2014.

STIMA DELLO SPESSORE OTTICO E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Calcolata la costante di calibrazione del fotometro e definitone un valore giornaliero, è possibile calcolare lo spessore ottico degli aerosol per l'intera serie di misure applicando l'eq. 10. Per evitare di avere discontinuità nei valori di τ_a dovute alle variazioni di C_{COR} , il valore giornaliero della costante di calibrazione utilizzato per il calcolo di τ_a , C_{day} , è stato calcolato interpolando i valori medi C_{COR} mostrati in **figura 6**.

Per calcolare i valori di τ_a è necessario definire gli intervalli di cielo sereno. Usualmente le nubi presentano spessori ottici molto maggiori di quelli dell'aerosol, tanto che la loro presenza può completamente attenuare la componente diretta della radiazione; solo nel caso in cui siano presenti nubi otticamente sottili (normalmente cirri) è possibile attribuire agli aerosol un effetto dovuto alle nubi.

Per identificare le condizioni di cielo sereno presso l'Osservatorio ENEA di Lampedusa si applica il metodo descritto da Biavati e di Sarra (2004), che consiste in un adattamento alle condizioni di Lampedusa del metodo descritto da Long e Ackermann (2000). Noti gli intervalli di cielo sereno si è calcolato il valore medio su 5 minuti dello spessore ottico dell'aerosol per tutta la serie temporale.

L'andamento di τ_a ricavato dal fotometro SP02 ($\tau_{a,SP02}$), è stato confrontato con quello ricavato da un MultiFilter Rotating Shadowbad Radiometer (MFRSR-VIS, **figura 9**) prodotto dalla Yankee Environmental Systems, di seguito denominato $\tau_{a,MFR}$. Il MFRSR-VIS è una tipologia di radiometro a banda rotante presente a Lampedusa fin dal 1999.

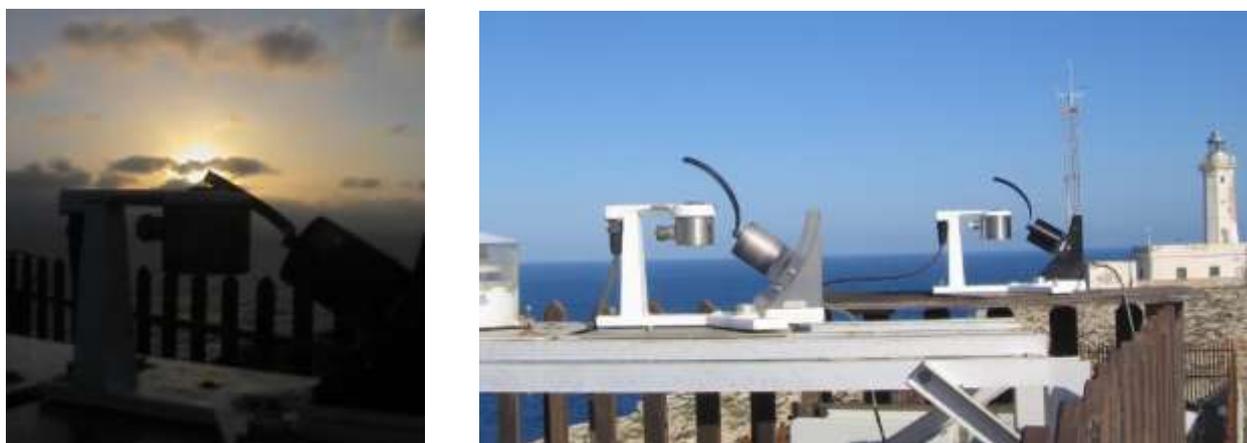


Figura 9. A sinistra un'immagine del MFRSR-VIS all'alba, a destra una di una coppia di MFRSR-VIS installati sul tetto del Osservatorio di Lampedusa in prossimità del faro di Capo Grecale.

Grazie alla rotazione della banda che scherma il sensore dalla componente diretta dell'irradianza, il radiometro misura ogni 15 secondi l'irradianza globale e diffusa in 6 intervalli di lunghezze d'onda ampi 10 nm, centrati rispettivamente attorno a 416, 496, 615, 673, 869, and 940 nm, ed in un canale a larga banda (300-1100 nm).

Gli MFRSR-VIS operanti a Lampedusa vengono anch'essi calibrati usando il Langley *plot*; i singoli LP sono calcolati con lo schema di Harrison e Michalsky (1994). Le costanti di calibrazione così ottenute sono poi filtrate, dipendentemente dalla bontà del fit del LP, sulla base del valore e dalla variabilità di τ_a , e mediate in finestre temporali trimestrali (di Sarra et al., 2015).

Il confronto tra i due strumenti è stato fatto usando solo i valori del 2014 (**figura 10**), l'anno in cui minori sono stati i problemi di disallineamento del fotometro SP02 e di conseguenza in cui l'algoritmo automatico ha stimato un maggior numero di costanti di calibrazione.

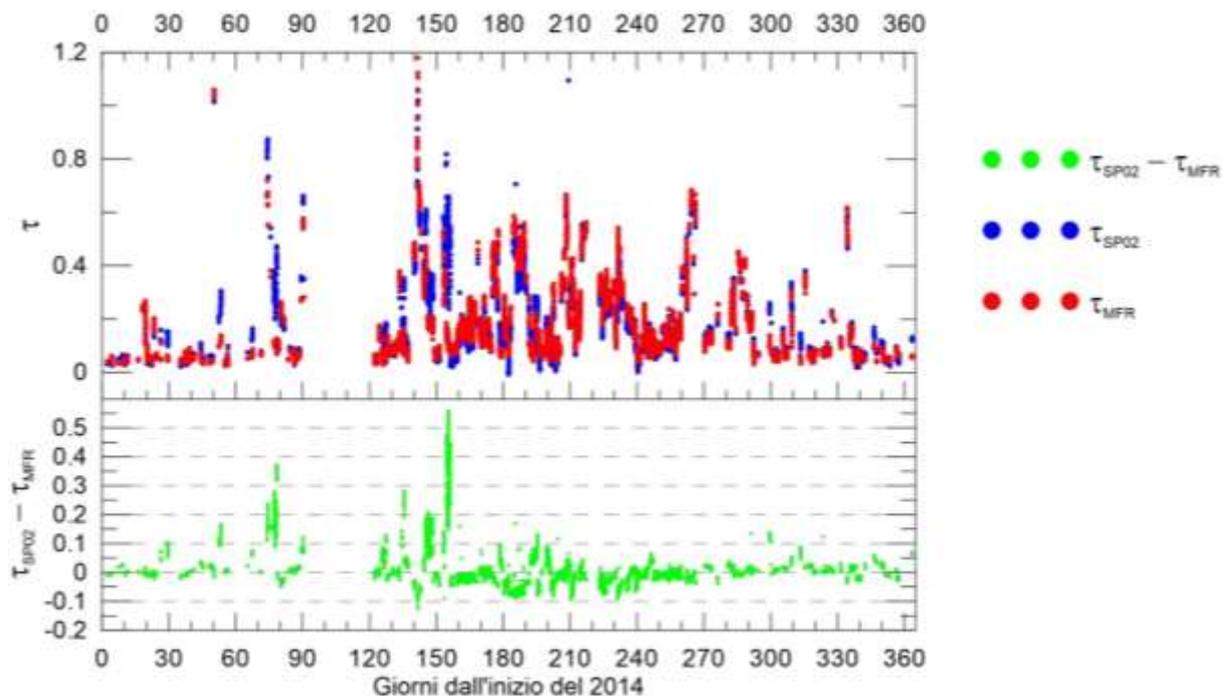


Figura 10. Serie temporali dello spessore ottico misurato a 500 nm dal SP02 e dal MFRSR (in alto) e della loro differenza (in basso) nel 2014.

In generale le differenze tra i due spessori ottici sono inferiori a ± 0.1 ed il loro andamento presenta un discreto accordo, tranne in alcuni periodi in cui $\tau_{a,SP02}$ sovrastima fortemente $\tau_{a,MFR}$ generando differenze anche molto maggiori di 0.1.

In particolare questi casi si osservano nei giorni 29, 53, 74, 77, 78, 134, 135, 145, 146, 147, 148, 153, 154, 155, 156 del 2014. In ciascuno di questi giorni si nota una variazione regolare della differenza tra $\tau_{a,SP02}$ e $\tau_{a,MFR}$ che risulta massima al mezzogiorno solare e minima all'alba e al tramonto. Questo andamento non stupisce se si considera il legame tra τ_a e m_a esplicitato nell'eq. 12); infatti nel caso in cui la differenza C-InV rimanga all'incirca costante durante la giornata il valore di τ_a varierà come $1/m_a$.

Un esempio di questo comportamento è mostrato in **figura 11**, che presenta l'andamento delle due serie di valori di spessore ottico dal 20 Maggio (giorno 140) al 9 Giugno (giorno 160) del 2014. In questa serie è particolarmente interessante l'andamento dei valori di $\tau_{a,SP02}$ del 5 Giugno (giorno 156); infatti durante la giornata il valore di $\tau_{a,SP02}$ mostra una brusca diminuzione di circa 0.4, a seguito della quale il suo valore si avvicina molto a quello di $\tau_{a,MFR}$.

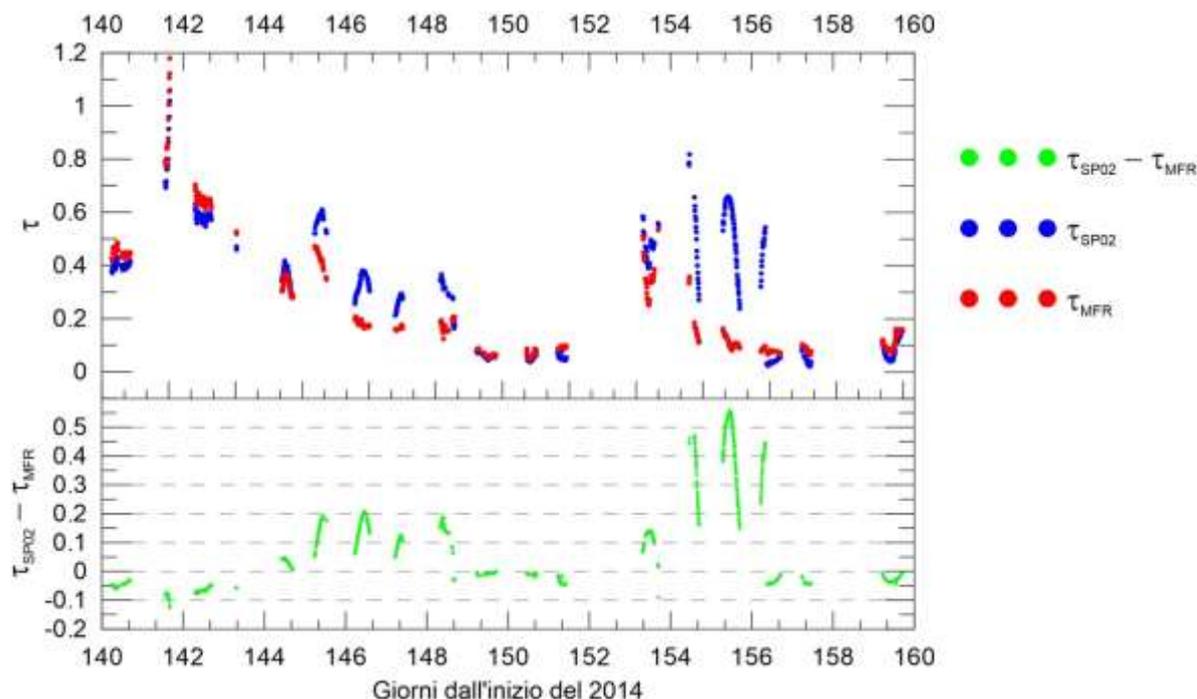


Figura 11. Analogo a figura 10, ma nell'intervallo temporale che va dal 20 Maggio al 9 Giugno 2014.

Figura 12 mostra l'andamento della tensione misurata dai 4 sensori del fotometro SP02 durante il 5 Giugno, caratterizzato dal repentino incremento del segnale che è la causa della forte riduzione dello spessore ottico. L'improvviso aumento del segnale del SP02 alle 8:10 UT (corrispondente al valore 156.34) è dovuto alla pulizia delle ottiche esterne del fotometro SP02 che viene effettuata manualmente con ricorrenza settimanale. E' evidente come la *non pulizia* della finestra sia responsabile della sovrastima dello spessore ottico del fotometro SP02. Infatti la deposizione di aerosol di diversa origine (crostale, marina, inquinata) sulla finestra di ingresso dello strumento attenua la radiazione che raggiunge i sensori.

E' interessante notare come i diversi canali vengano influenzati in maniera diversa dal materiale deposto sulla finestra; ciò è particolarmente importante perché varia il rapporto tra i valori di $\tau_{a,SP02}$ a diverse lunghezze d'onda, da cui si ottiene un'indicazione della distribuzione delle dimensioni dell'aerosol stesso (si rimanda al paragrafo *Determinazione dell'esponente di Ångström*) ed un'indicazione sul tipo di particolato corrispondente (Pace et al., 2006).

Il segnale prima della pulizia della finestra del fotometro SP02 valeva rispettivamente il 42%, 52%, 60%, e 50% di quello misurato dopo la pulizia della finestra rispettivamente a 412, 500, 862 e 1020 nm.

Appare evidente come i valori di $\tau_{a,SP02}$ successivi al giorno 152 (molto maggiori di quelli misurati dal radiometro MFRSR) dipendano dalla deposizione di particolato sulla finestra che probabilmente ha cominciato a “sporcarsi” proprio durante il giorno 152 o nella notte tra il giorno 152 e il 153.

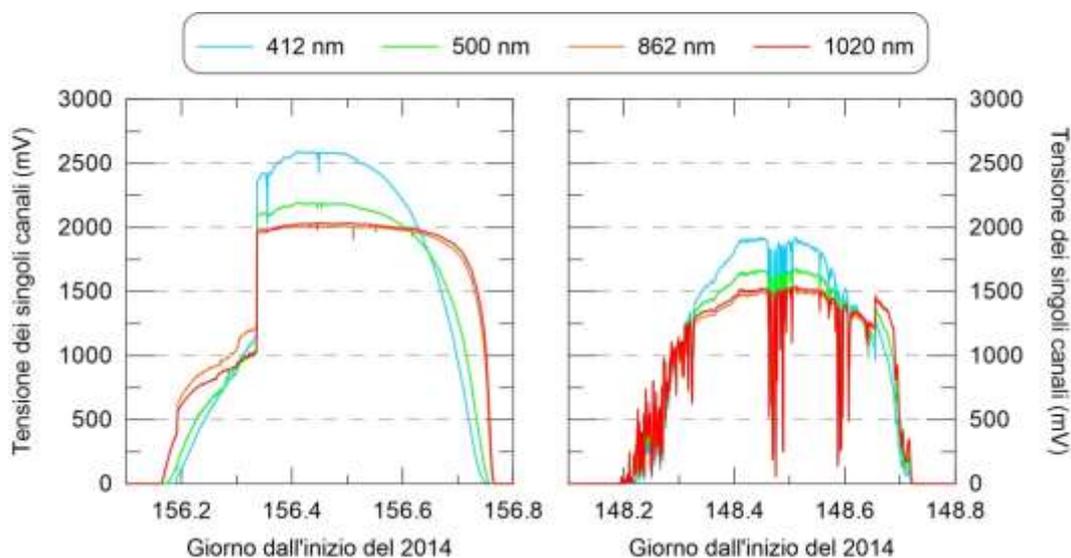


Figura 12. Andamento del segnale del fotometro SP02 acquisito il 5 Giugno (giorno 156, a sinistra) ed il 28 Maggio (giorno 148, a destra); il diverso colore delle linee indica il segnale alle 4 lunghezze d’onda.

Un lettore attento potrebbe chiedersi come mai anche i valori di $\tau_{a,MFR}$ non presentino la stessa dipendenza dalla pulizia della sua ottica di ingresso. La risposta è nelle sue caratteristiche tecniche; infatti, mentre il fotometro SP02 misura la radianza che attraversa una finestra di vetro ed un filtro, il radiometro MFRSR misura l’irradianza globale e diffusa che passa attraverso un diffusore su cui viene proiettata l’ombra della banda rotante, e di seguito un filtro. Il diffusore è molto meno sensibile alla deposizione rispetto la finestra di vetro, da qui la minore sensibilità delle misure MFRSR alla presenza di materiale deposto sul suo diffusore. Ad ulteriore conferma dell’importanza della pulizia della finestra del fotometro si mostra l’andamento del segnale del 28 Maggio del 2014 (giorno 148, **figura 12**). Anche in questo caso nel pomeriggio la differenza tra i valori di $\tau_{a,SP02}$ e di $\tau_{a,MFR}$ si riduce improvvisamente e, anche in questo caso, la pulizia della finestra effettuata alle 15:50 UT circa (148.66) è responsabile di questa variazione; analogamente a quanto supposto nel caso precedente, è realistico ipotizzare che la finestra del fotometro si sia stata “sporca” sin dal giorno 144. Il segnale in questo caso risulta attenuato di un fattore di circa 0.85 ai diversi canali.

Come evidenziato da questi due esempi la pulizia della finestra ricopre un ruolo fondamentale per avere valori dello spessore ottico sensati.

A valle di queste considerazioni appare complesso e fuori dallo scopo di questo lavoro (il cui fine è quello di presentare una procedura automatica per effettuare la calibrazione di uno fotometro applicando il metodo del Langley *plot*) realizzare un confronto sistematico tra i valori dello spessore ottico misurato dal fotometro

SP02 e dal radiometro MFRSR misurati dal 2013 al 2017. E' comunque interessante valutare le differenze tra gli spessori ottici dei due strumenti nel 2014; dal confronto si escludono i periodi in cui la deposizione sulla finestra del SP02 abbia maggiormente influenzato la stima di $\tau_{a,SP02}$ che vengono identificati con i periodi che presentano una differenza tra $\tau_{a,SP02}$ e $\tau_{a,MFR}$ maggiore di 0.1 a 500 nm.

Questo valore di soglia costante è probabilmente troppo elevato, ma d'altronde, essendo questo il lavoro in cui si presenta l'implementazione della metodologia per la stima automatica della costante di un fotometro e quindi la stima dello spessore ottico ottenuto usando le stesse costanti, non sarebbe stato corretto selezionare i valori che meglio corrispondono con quelli stimati indipendentemente dell'MFRSR, se non a valle di una analisi che ne giustifichi rigorosamente la scelta.

Gli *scatter plot* tra i valori di $\tau_{a,SP02}$ a 412, 500 e 862 nm ed i corrispondenti valori di $\tau_{a,MFR}$ sono mostrati in **figura 13**, mentre in **tabella 5** si riassumono le statistiche del loro confronto basate sulle 12869 osservazioni simultanee dei due strumenti effettuate nel 2014.

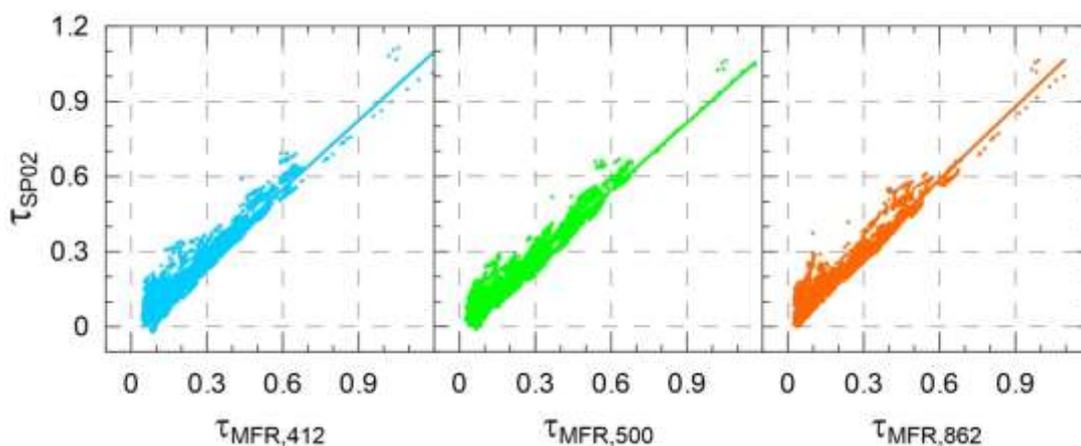


Figura 13. Da destra a sinistra si mostra rispettivamente lo *scatter plot* tra i valori di $\tau_{a,SP02}$ e di $\tau_{a,MFR}$ a 415, 500 e 865 nm; le linee continue indicano il risultato della regressione lineare tra i valori di $\tau_{a,SP02}$ e di $\tau_{a,MFR}$.

Sebbene tutti i coefficienti di correlazione, R^2 , presentino valori maggiori o uguali a 0.93, lo spessore ottico del fotometro SP02 presenta una maggiore variabilità di quello dell'MFRSR, specialmente per bassi valori di τ_a ; si noti come a tutte le lunghezze d'onda utilizzate gli spessori ottici MFRSR non presentino valori negativi che al contrario, anche se in piccolo numero, sono presenti per $\tau_{a,SP02}$ (**figura 13**).

Lunghezza d'onda, λ	412 nm	500 nm	862 nm
Regressione lineare	$\tau_{a,SP02}=0.918*\tau_{a,MFR}-0.002$	$\tau_{a,SP02}=0.892*\tau_{a,MFR}-0.011$	$\tau_{a,SP02}=0.966*\tau_{a,MFR}-0.009$
R^2	0.93	0.95	0.93
RMSE	0.0012	0.0010	0.0013

Tabella 5. Parametri statistici del confronto tra gli spessori ottici ricavati dal fotometro SP02 e dal radiometro MFRSR; R^2 indica il quadrato del coeff. di correlazione lineare e RMSE l'errore quadratico medio dei residui.

La tendenza alla sottostima dei valori di $\tau_{a,SP02}$ viene evidenziata dalla distribuzione delle differenze tra gli spessori ottici (**figura 14**) calcolata per intervalli di 0.01, minori dell'incertezza della misura MFRSR che è stimata essere circa ± 0.02 , rispettivamente a 412, 500 e 862 nm (di Sarra et al. 2015). Le principali caratteristiche della distribuzione delle differenze alle 3 lunghezze d'onda sono mostrate in **tabella 6**.

Canale	Min	Mas	Media	RMSE	10%	25%	50%	75%	90%
						I° quartile	Mediana	III° quartile	
412 nm	-0.282	0.176	-0.019	0.037	-0.062	-0.046	-0.020	-0.002	+0.024
500 nm	-0.125	0.875	-0.009	0.036	-0.059	-0.028	-0.008	+0.011	+0.032
862 nm	-0.095	1.042	+0.004	0.038	-0.032	-0.021	-0.006	+0.019	+0.055

Tabella 6. Parametri statistici della distribuzione delle differenze tra i valori di τ del SP02 e del MFR eseguita su 12869 misure.

La distribuzione delle differenze di τ più simmetrica è quella a 500 nm, mentre quelle a 412 e 862 nm sono rispettivamente caratterizzate da un'asimmetria verso valori negativi (sottostima) e positivi (sovrastima).

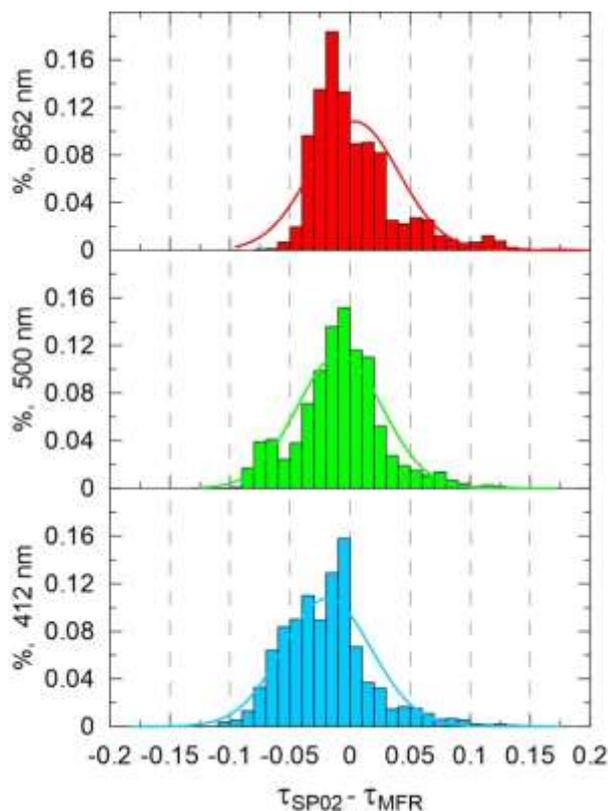


Figura 14. L'istogramma illustra la distribuzione percentuale delle differenze tra lo spessore ottico stimato da SP02 e da MFRSR a 412, 500 e 862 nm rappresentate rispettivamente in celeste, verde e rosso.

A tutte le lunghezze d'onda si notano code positive delle distribuzioni ad indicare che in alcuni casi vi è una sovrastima degli spessori ottici del fotometro SP02 rispetto a quelli del radiometro MFRSR. Alla luce di quanto discusso in precedenza, questi casi potrebbero corrispondere a casi di deposizione sulla finestra del

fotometro SP02 che generano incrementi dello spessore ottico non esclusi dalla semplice selezione dei valori per i quali la differenza tra $\tau_{a,SP02}$ e $\tau_{a,MFR}$ a 500 nm fosse superiore a 0.1, che quindi, come si è ipotizzato in precedenza, si è rivelato un valore di soglia troppo elevato, la cui selezione è stata fatta in maniera troppo semplificata rispetto al complesso problema di individuare i casi in cui sulla finestra sia presente della deposizione utilizzando i solo dati del fotometro.

Ricordando il forte impatto della pulizia della finestra sulle misure ci si pone la domanda se la deposizione sulla finestra possa aver influenzato la stima delle singole costanti di calibrazione (C) utilizzate per il calcolo dello spessore ottico. Si ricorda che il valore utilizzato nel calcolo è un valore giornaliero ricavato dall'interpolazione delle loro medie correnti (C_{COR}) su una finestra di ± 45 giorni.

Ancora una volta le misure del 5 Giugno 2014 (giorno 156) permettono di dare una risposta a questo quesito in quanto fortunatamente, il LP eseguito quel pomeriggio, subito dopo la pulizia della finestra, ha avuto successo a tutte le lunghezze d'onda.

Se per il calcolo dello spessore ottico si usano i valori di C ottenuti quel pomeriggio si ottengono valori di $\tau_{a,SP02}$ che presentano un accordo con quelli $\tau_{a,MFR}$ migliore rispetto a quelli calcolati usando il valore medio C_{COR} . Attorno al mezzogiorno locale la sottostima di $\tau_{a,SP02}$ a 500 e 862 nm passa da valori vicini a -0.05 e -0.03 (**figura 15** riquadro sinistro, C_{COR}) a -0.015 (**figura 14** riquadro destro, C) entro l'incertezza della stima MFRSR (di Sarra et al. 2015); anche lo spessore ottico del canale a 412 nm si avvicina al valore di quello del radiometro MFRSR, seppure mantenga una sottostima maggiore rispetto a quello degli altri canali pari a circa -0.03.

In questo caso l'utilizzo delle costanti di calibrazione ottenute durante la stessa giornata produce un miglior accordo con i dati di riferimento MFRSR, fornendo un'importante conferma della bontà della metodologia automatica usata per ricavare la singola costante di calibrazione e quindi dello spessore ottico in una giornata in cui la finestra del SP02 era stata pulita.

D'altronde le serie temporali di C alle diverse lunghezze d'onda (si veda **figura 5**) mostrano frequenti "salti" rispetto al loro valor medio C_{COR} , dell'ordine di 0.1 o superiori; questi valori corrispondono a ~1.2-1.3% della costante di calibrazione media. Come mostra l'eq. 13) una sovrastima o sottostima di C determina la medesima sottostima o una sovrastima dello spessore ottico pesata per il valore della massa d'aria al momento della misura.

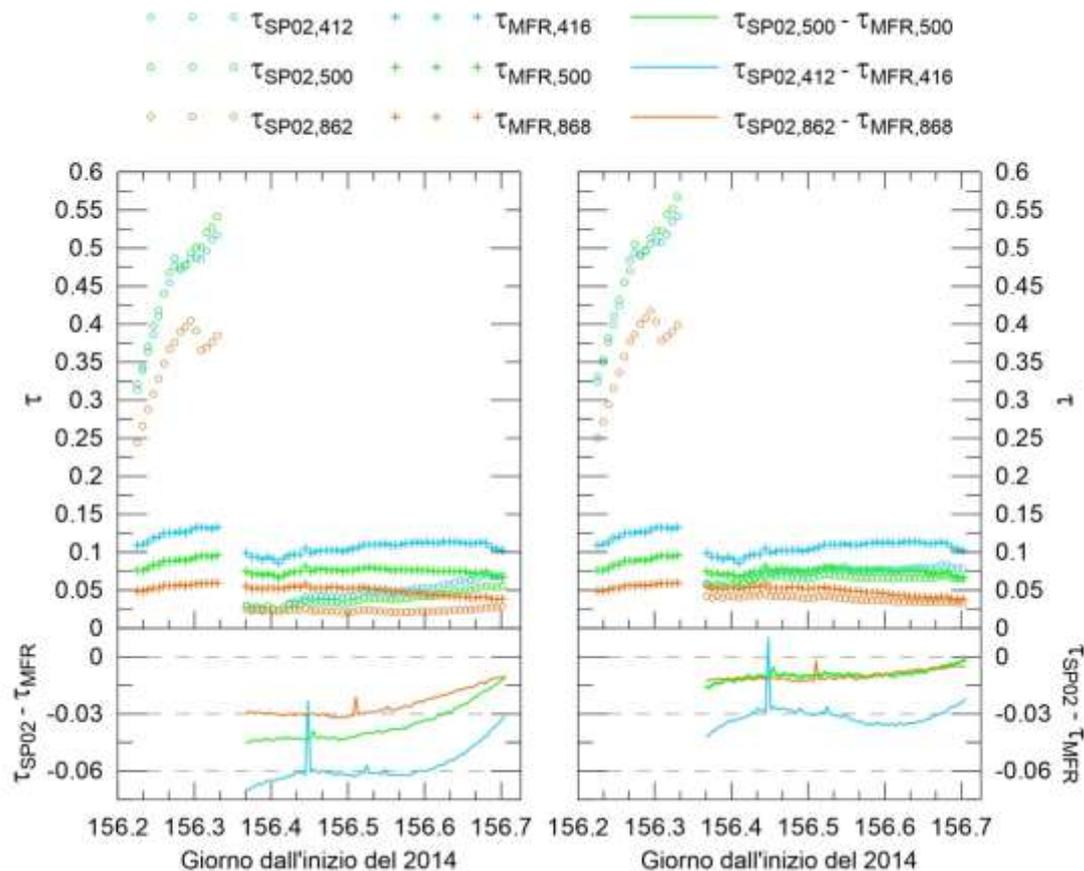


Figura 15. Andamento dello spessore ottico del fotometro SP02 e del radiometro MFRSR durante la giornata del 5 Giugno 2014; colori diversi indicano le tre lunghezze d’onda utilizzate, mentre diversi simboli indicano i dati SP02 (cerchi) e MFRSR (croci). Nei riquadri in basso si mostrano le differenze degli spessori ottici alle varie lunghezze d’onda. Il pannello a sinistra mostra gli spessori ottici SP02 calcolati con il valore di C_{COR} medio, mentre quello a destra quelli calcolati con la C calcolata il pomeriggio dello stesso giorno.

Avendo appurato che l’algoritmo automatico fornisce dei valori affidabili della costante di calibrazione in condizioni di assenza di deposizione ci si chiede in che modo la presenza di deposizione sulla finestra possa influenzare il risultato del Langley *plot*.

Infatti l’algoritmo si basa sull’assunzione che il fotometro sia ben allineato e la finestra pulita ed ha il fine di eliminare le variazioni della radiazione diretta normalmente prodotte dalla presenza di nubi, caratterizzate da una forte diminuzione e da un’elevata variabilità del segnale.

Diverso è il caso in cui il segnale venga attenuato in maniera quasi “costante” dalla presenza di un deposito sulla finestra del fotometro. In questo caso si potrebbe ottenere una stima di C non adatta al calcolo dello spessore ottico utilizzando le misure ottenute con una finestra pulita; in maniera analoga l’utilizzo di un valore di C ottenuto con finestra pulita non è adatto alla stima dello spessore ottico a partire da un segnale attenuato dalla presenza di un deposito sulla finestra.

Operativamente si tiene conto dell’incertezza/variabilità sulla singola stima di C utilizzando per il calcolo di τ_a il valore delle medie correnti di C , C_{COR} . Questo approccio però non elimina l’effetto che la presenza di più valori di C calcolati con una finestra non pulita avrebbero sulla stima di C_{COR} , specialmente se l’effetto

fosse sempre dello stesso segno, ossia se la deposizione sulla finestra inducesse una sovrastima o una sottostima sistematica dei singoli valori di C.

Per verificare se e come la costante di calibrazione vari nel caso in cui sia presente della deposizione sulla finestra, si è simulato l'effetto che questa deposizione ha sul segnale del fotometro. La deposizione produce un'attenuazione del segnale misurato dal fotometro che è indipendente dall'angolo zenitale solare e che si va a sommare all'attenuazione dovuta ai componenti atmosferici (eq. 3). Per tener conto del suo contributo si può riscrivere l'eq. 4) come:

$$V = \frac{V_0}{R^2} \exp[-\tau_{mol} m_{mol,\theta} - \tau_{gas} m_{gas,\theta} - \tau_a m_{a,\theta} - \tau_{DEP}] \quad (13)$$

dove τ_{DEP} indica lo *spessore ottico equivalente* indotto dalla deposizione che a seconda del tipo di materiale deposto può dipendere dalla lunghezza d'onda.

Lo spessore ottico dell'aerosol stimato in presenza di deposizione è dunque dato dalla seguente:

$$\tau_{a+DEP} = \tau_a + \frac{\tau_{DEP}}{m_{a,\theta}} \quad (14)$$

Ricordando l'eq. 10) si può anche derivare la costante di calibrazione calcolata con il LP in caso fosse presente della deposizione, data dalla seguente:

$$C_{DEP} = (\ln V_0 - \ln R^2) - \tau_{DEP} = C - \tau_{DEP} \quad (15)$$

Quindi nel caso si abbia della deposizione sulla finestra e si usi una C corretta si sovrastimerà τ_a , mentre in caso la finestra sia pulita, ma la C sia stata determinata con un LP influenzato dalla presenza di deposizione sulla finestra si otterrà una sottostima di τ_a . Si noti che lo spessore ottico associato al valore della pendenza della retta durante il LP non dipende dalla presenza di deposizione sulla finestra.

Si è quindi calcolata una tensione

$$V_{DEP} = T_{DEP} \cdot V \quad (16)$$

data dal prodotto tra la tensione misurata dal fotometro e da un fattore T_{DEP} che rappresenta la trasmittanza dello strato di aerosol depositato sulla finestra, pari a $\exp(-\tau_{DEP})$. T_{DEP} è stata fatta variare da 0.99 fino a 0.05, che equivale a valori di τ_{DEP} compresi tra 0.01 e 2.99.

Alle tensioni V_{DEP} si è applicato l'algoritmo per il calcolo di C in modo da poter stimare la differenza che si avrebbe nel valore della costante di calibrazione (intercetta) ricavata con il LP nel caso si usassero i valori di $V(C)$ o di $V_{DEP}(C_{DEP})$.

Le variazioni mostrate in **figura 12** sono dell'ordine di 1000-1400 mV e di 250-100 mV per valori di masse d'aria rispettivamente di ~ 1.3 e ~ 2.1 , che corrisponderebbero rispettivamente ad un'attenuazione del segnale di circa il 50% ed il 10% e quindi a valori di T_{DEP} (τ_{DEP}) rispettivamente di 0.5 (0.693) e 0.9 (0.105).

I risultati della simulazione sono mostrati in **figura 16** e rappresentano la differenza tra C e C_{DEP} , e l'andamento di C_{DEP} al crescere di T_{DEP} alle diverse lunghezze d'onda.

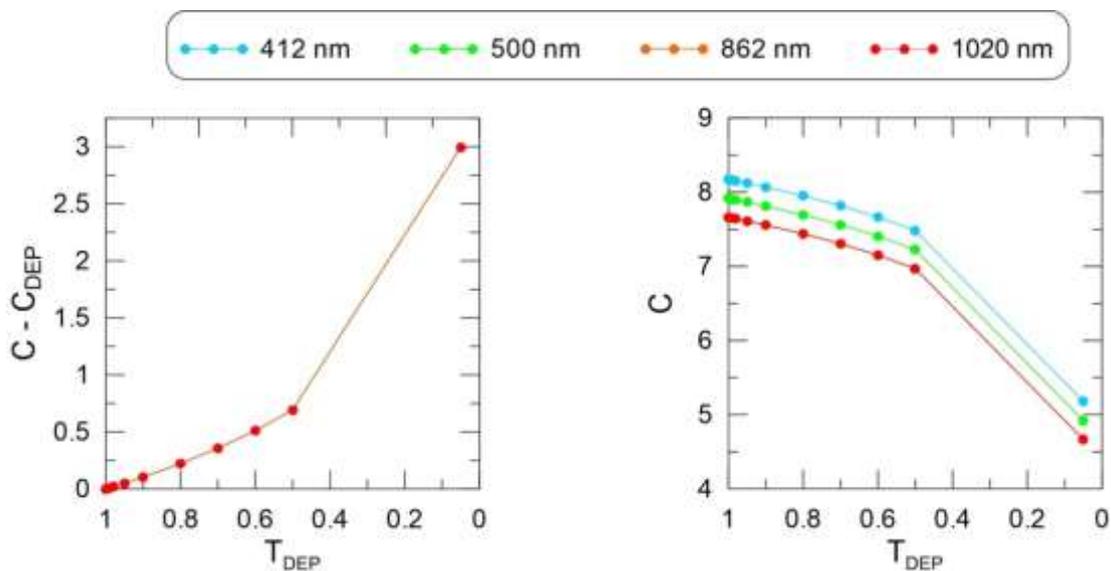


Figura 16. Andamento della differenza tra la C e C_{DEP} (a sinistra) e di C_{DEP} (a destra) al variare di T_{DEP} ; i colori azzurro, verde e rosso indicano i risultati ottenuti rispettivamente per il canale a 412, 500 ed 862 nm.

La variazione assoluta del valore di C all'aumentare di T_{DEP} è la stessa a tutte le lunghezze d'onda, sebbene in percentuale risulta maggiore quella a lunghezze d'onda maggiori che presentano valori di C iniziali inferiori. Per valori di T_{DEP} vicini ad 1, che corrispondono a valori di deposizione bassi, tra T_{DEP} e C c'è una relazione quasi lineare, per cui ad una riduzione del 10% del segnale ($T_{DEP} = 0.9$) corrisponde una sottostima di C di 0.1 che a sua volta genererà una sottostima dello spessore ottico di 0.1 per una massa d'aria unitaria.

Per verificare i risultati di questo test sull'intero arco dell'anno, si sono moltiplicati tutti i dati del 2014 per valori di T_{DEP} pari a 0.95 e 0.9 e si è ripetuta tutta l'analisi per il calcolo di C e C_{COR} . L'andamento della serie di C_{COR} e delle due di $C_{COR,DEP}$ per i 4 canali del SP02 è mostrato in **figura 17**.

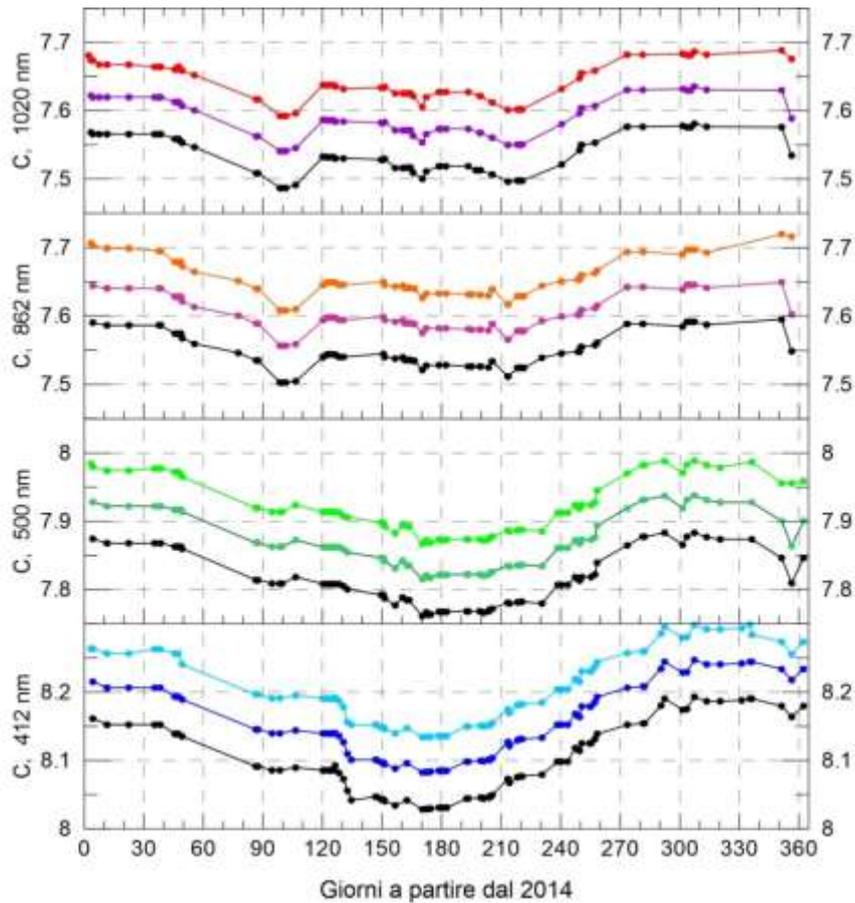


Figura 17. Andamento delle costanti di calibrazione mediate su ± 45 giorni, C_{COR} , nel caso originale (colore piú chiaro) e moltiplicando le tensioni misurate per 0.95 (colore piú scuro, $\tau_{DEP}=0.05$) e 0.9 (colore nero, $\tau_{DEP}=0.1$).

Per tutti i canali l'andamento conferma quanto osservato per il caso del 5 Giugno; se ne deriva che la deposizione sulla finestra del SP02 possa determinare costanti di calibrazioni medie inferiori e quindi una corrispondente sottostima dello spessore ottico.

Alla luce di questi risultati la coda di bassi valori delle distribuzioni dei valori di C , particolarmente evidente per i due canali a 862 e 1024 nm, è plausibilmente dovuta all'influenza di Langley *plot* effettuati in casi in cui sulla finestra era presente della deposizione (**figura 8**).

L'inclusione di questi LP nel computo del valore medio di C può quindi aver indotto una sottostima del valore di C usato per derivare lo spessore ottico e quindi una sottostima del corrispondente valore di τ . Ciò trova parziale conferma nella presenza di valori negativi di τ_{SP02} .

DETERMINAZIONE DELL'ESPONENTE DI ÅNGSTRÖM

La variabilità dello spessore ottico dell'aerosol con la lunghezza d'onda fornisce importanti informazioni sulla sua distribuzione dimensionale. Sebbene questa sia un'informazione integrata lungo l'intera colonna atmosferica, la variabilità della distribuzione dimensionale dell'aerosol viene usata nello studio dei fenomeni legati al trasporto ed alla caratterizzazione dell'aerosol per identificare il tipo di aerosol otticamente dominante presente in atmosfera.

E' quindi di particolare interesse confrontare l'andamento dell'esponente di Ångström ricavato da SP02 e da MFRSR. L'esponente di Ångström, qui denominato α , è definito come:

$$\alpha = - \frac{\ln(\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2})}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (17)$$

dove λ_n e τ_n indicano rispettivamente l'n-esima lunghezza d'onda ed il suo spessore ottico.

Aerosol con dimensioni molto maggiori rispetto alla lunghezza d'onda della misura, come ad esempio gli aerosol di origine desertica o quelli di origine marina, presentano valori di spessore ottico costanti nell'intervallo visibile dello spettro solare e quindi bassi valori di α ; diversamente aerosol caratterizzati da dimensioni inferiori, come gli aerosol di origine antropica e quelli generati dagli incendi, presentano spessori ottici maggiori a lunghezze d'onda inferiori e quindi valori di α maggiori.

Un modalità grafica molto usata per identificare i diversi tipi di aerosol è quella di usare uno *scatter plot* in cui si riporta in ascisse lo spessore ottico ed in ordinate il valore dell'esponente di Ångström (Eck et al. 1999). Data la maggiore variabilità della costante di calibrazione a 412 nm e la sua maggiore dipendenza percentuale dalla pulizia della finestra, si è scelto di calcolare α usando gli spessori ottici a 500 ed 862 nm (**figura 18**).

I due *scatter plot* presentano caratteristiche simili per valori di $\tau > 0.1$, mentre per valori inferiori i valori di α del fotometro SP02 mostrano una maggiore variabilità rispetto a quelli stimati da MFRSR. Ricordando la definizione dell'esponente di Ångström (eq. 17) appare chiaro come piccole perturbazioni nello spessore ottico generino valori assai diversi di α , specialmente per piccoli valori di τ .

Per verificare in che modo la deposizione sulla finestra del fotometro SP02 possa influenzare la stima di α tra 500 e 862 nm, dati dei valori iniziali di α e di τ a 500 nm si è inizialmente calcolato il valore di τ a 862 nm. Si sono quindi calcolati gli spessori ottici che si sarebbero stimati in presenza di deposizione a 500 nm e 862 nm ed infine il valore dell'esponente di Ångström. Per questa simulazione si è scelto di usare un fattore T_{DEP} pari a 0.97 che indica la presenza di una "piccola" deposizione.

Una riduzione del 3% del segnale (corrispondente ad $T_{DEP} = 0.97$) produce una riduzione dello spessore ottico a 500 nm di 0.03 ed è di gran lunga inferiore a quella osservata il 5 Giugno o il 28 Maggio del 2014, che presentavano riduzioni del 50% e del 15% (**figura 12**).

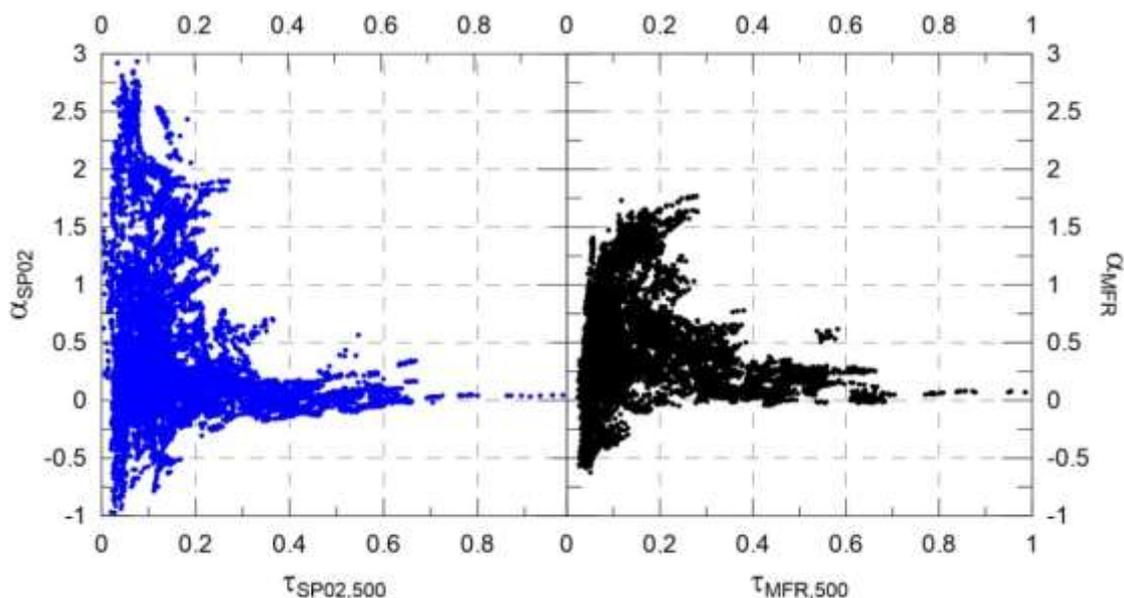


Figura 18. Andamento dell'esponente di Ångström al variare dello spessore ottico a 500 nm per i dati del fotometro SP02 (riquadro a sinistra) e del radiometro MFRSR (riquadro a destra). Per ridurre l'impatto della deposizione sulla finestra del fotometro SP02, analogamente a quanto fatto in precedenza, si sono esclusi i casi in cui la differenza tra $\tau_{a,SP02}$ e $\tau_{a,MFR}$ a 500 nm fosse maggiore di 0.1.

Nello specifico si è ipotizzato di avere dei valori iniziali (finestra pulita) di spessore ottico a 500 nm (τ_{500}) pari a 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 e dei valori iniziali di α pari a 0, 1 e 2. Per ciascuna delle 15 combinazioni di valori di α e di τ_{500} , usando l'eq. 17), si è derivato lo spessore ottico a 862 (τ_{862}).

Si sono quindi modificati questi valori sottraendo il valore di 0.03 ai valori di τ_{500} e τ_{862} e si è ricalcolato l'esponente di Ångström corrispondente. Questo approccio mostra le differenze che si avrebbero nel caso in cui diversi canali subissero la stessa attenuazione del 3%.

Come si è visto in precedenza (**figura 12**) l'attenuazione per i diversi canali può essere diversa. Si è quindi deciso di fare gli stessi calcoli ipotizzando che i canali a 500 nm e 862 nm fossero rispettivamente attenuati del 2% e del 3% o viceversa che il canale a 500 nm e 862 nm fossero attenuati del 3% e del 2%. I risultati sono mostrati in **figura 19**.

Per tutti e tre i valori iniziali di α si ha un andamento asintotico all'aumentare di τ_{500} . La variazione di α causata dall'attenuazione del segnale è tanto maggiore quanto più lo spessore ottico è piccolo e quanto più α è grande.

L'unico caso in cui si ha una variazione trascurabile rispetto ai dati iniziali è quello in cui entrambi i canali subiscano la stessa attenuazione ed il valore di α sia nullo. Negli altri casi quando il canale che presenta la maggiore attenuazione è quello a lunghezza d'onda maggiore si hanno valori di α maggiori dall'originale, mentre nel caso in cui l'attenuazione maggiore sia dovuta al canale a lunghezza d'onda inferiore si osserva una minore variazione di α .

Ciò accade perché valori maggiori di α indicano spessori ottici maggiormente decrescenti con la lunghezza d'onda, per cui la variazione di τ_{862} indotta dal deposito sulla finestra risulta in percentuale maggiore. A

titolo esemplificativo in **tabella 7** si riportano i valori degli spessore ottici a 500 e 862 nm e dell'esponente di Ångström calcolati a partire da τ_{500} pari a 0.1 e valori di α di 0, 1 e 2.

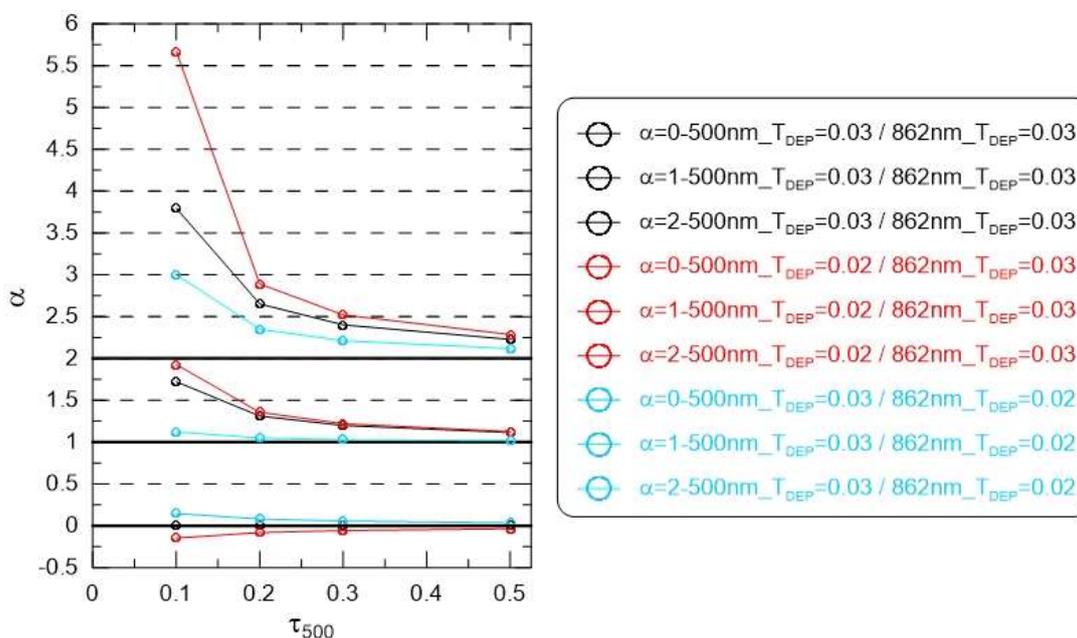


Figura 19. Simulazione dell'effetto indotto dalla deposizione sulla stima dell'esponente di Ångström (α) per diversi valori α e di τ_{500} . L'asse delle ascisse e le linee orizzontali viola e blu corrispondono rispettivamente ai 3 valori iniziali di α (ossia in condizione di finestra pulita) ossia 0, 1 e 2.

Questi risultati offrono una plausibile chiave di lettura per spiegare la maggiore variabilità dell'esponente di Ångström calcolato dal fotometro SP02 rispetto a quello del radiometro MFRSR per piccoli valori di τ_{500} (inferiori di ~ 0.1). Infatti, sebbene si sia cercato di limitare l'influenza della deposizione sulla finestra nella stima della costante di calibrazione, non si può eliminare l'incertezza associata all'utilizzo di una corretta costante di calibrazione in casi in cui la finestra risulti parzialmente sporca. C'è anche da sottolineare che deviazioni dell'ordine di 0.1 sono molto significative.

Valori iniziali (finestra senza deposizione)			Valori finali (finestra con stessa deposizione per i due canali $T_{DEP}=0.97$)		
α	τ_{500}	τ_{862}	α'	τ_{500}'	τ_{862}'
0	0.200	0.20	0	0.17 (15%)	0.17 (15%)
1	0.200	0.116	1.25 (25%)	0.17 (15%)	0.086 (26%)
2	0.200	0.067	2.78 (39%)	0.17 (15%)	0.037 (55%)

Tabella 7. Variazione dei valori di spessore ottico e dell'esponente di Ångström dovute alla presenza di depositi sulla finestra che attenuino la radiazione del 3% in entrambi i canali; in parentesi la variazione percentuale rispetto al valore iniziale.

CONCLUSIONI

Questo lavoro presenta la realizzazione e l'applicazione di una metodologia automatica per la stima dello spessore ottico dell'aerosol a partire da misure di radiazione diretta.

Il metodo, completamente automatico e applicabile a qualunque sito di misura, permette la stima della costante di calibrazione di un fotometro solare (C) ed è stato applicato alla serie temporale di misure effettuate dal fotometro solare Middleton SP02 presso la stazione di Lampedusa dal 2013 al 2017, senza che ai dati venisse applicato alcun trattamento preliminare. Una volta determinati il valore e la variabilità di C si è calcolato lo spessore ottico dell'aerosol.

L'analisi automatica ha mostrato diversi periodi in cui non è stato possibile calcolare le costanti di calibrazione o in cui fossero caratterizzate da un'ampia variabilità. L'analisi preliminare dei dati grezzi ha evidenziato come questi periodi fossero caratterizzati da errori di puntamento dell'inseguitore solare che hanno inficiato la corretta misura della radiazione diretta, evidenziando come il 2014 sia l'anno che presenti misure continuative di migliore qualità del fotometro.

Per quest'anno si sono calcolati gli spessori ottici dal fotometro Middleton SP02 che sono stati confrontati con quelli ottenuti con un radiometro solare, un MFRSR-VIS prodotto dalla ditta YESDAS, che opera a Lampedusa dal 1999. Il confronto ha evidenziato come la pulizia costante ed attenta delle ottiche del fotometro SP02 giochi un ruolo fondamentale riguardo la bontà del dato grezzo e quindi nella stima dello spessore ottico.

Si sono mostrati e discussi casi in cui, a seguito della pulizia delle ottiche esterne, gli spessori ottici del fotometro SP02 calcolati con la nuova procedura coincidevano all'interno dell'incertezza della misura con quelli del radiometro MFRSR-VIS, confermando la validità dell'approccio seguito.

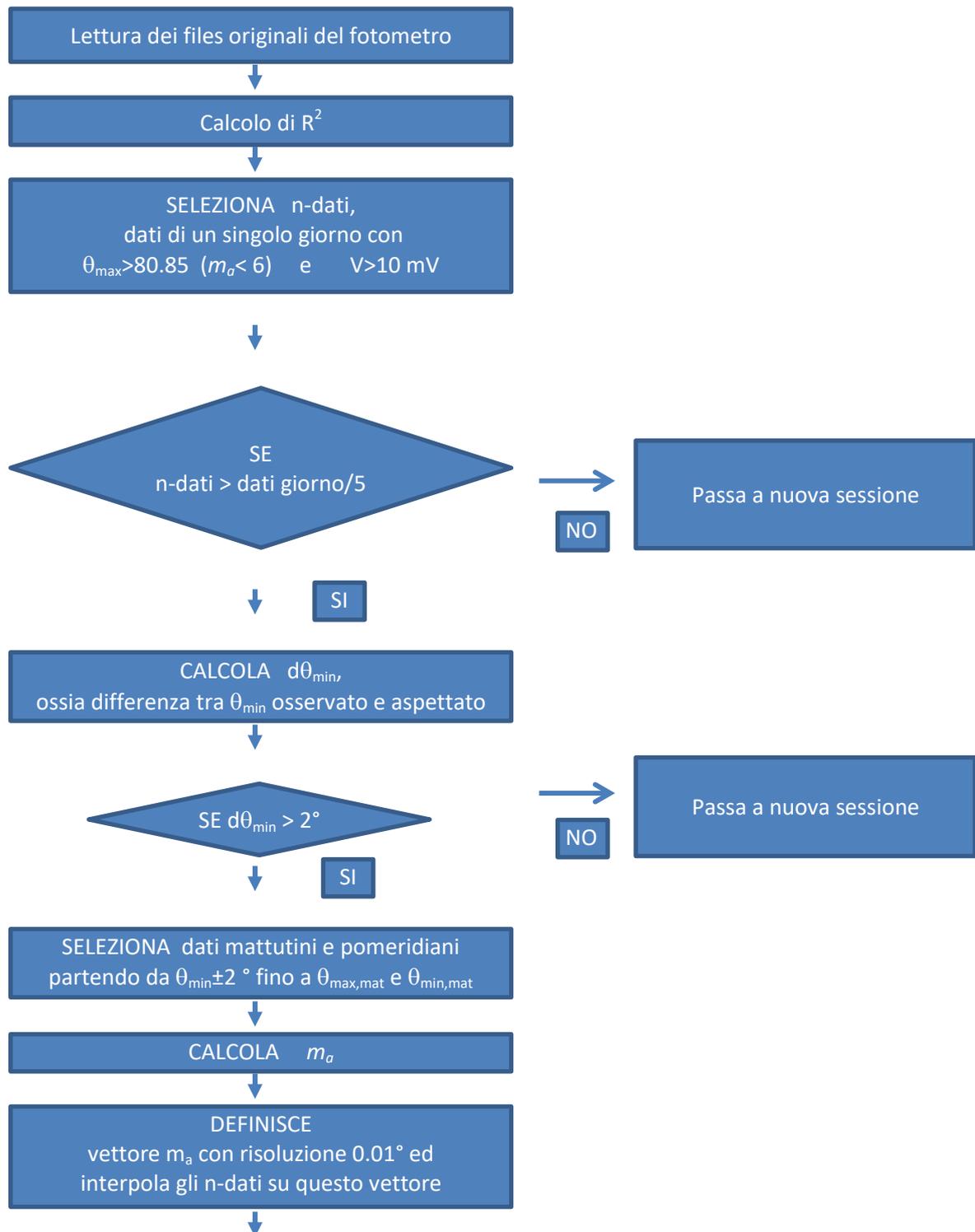
Utilizzando le misure di una singola giornata si è effettuato uno studio di sensibilità al fine di valutare il possibile effetto che la deposizione sulla finestra del fotometro SP02 produce sulla stima della costante di calibrazione. Questi risultati sono stati poi confermati da simulazioni annuali che mostrano come in presenza di deposizione, la metodologia utilizzata stimi dei valori di C inferiori a tutte le lunghezze d'onda.

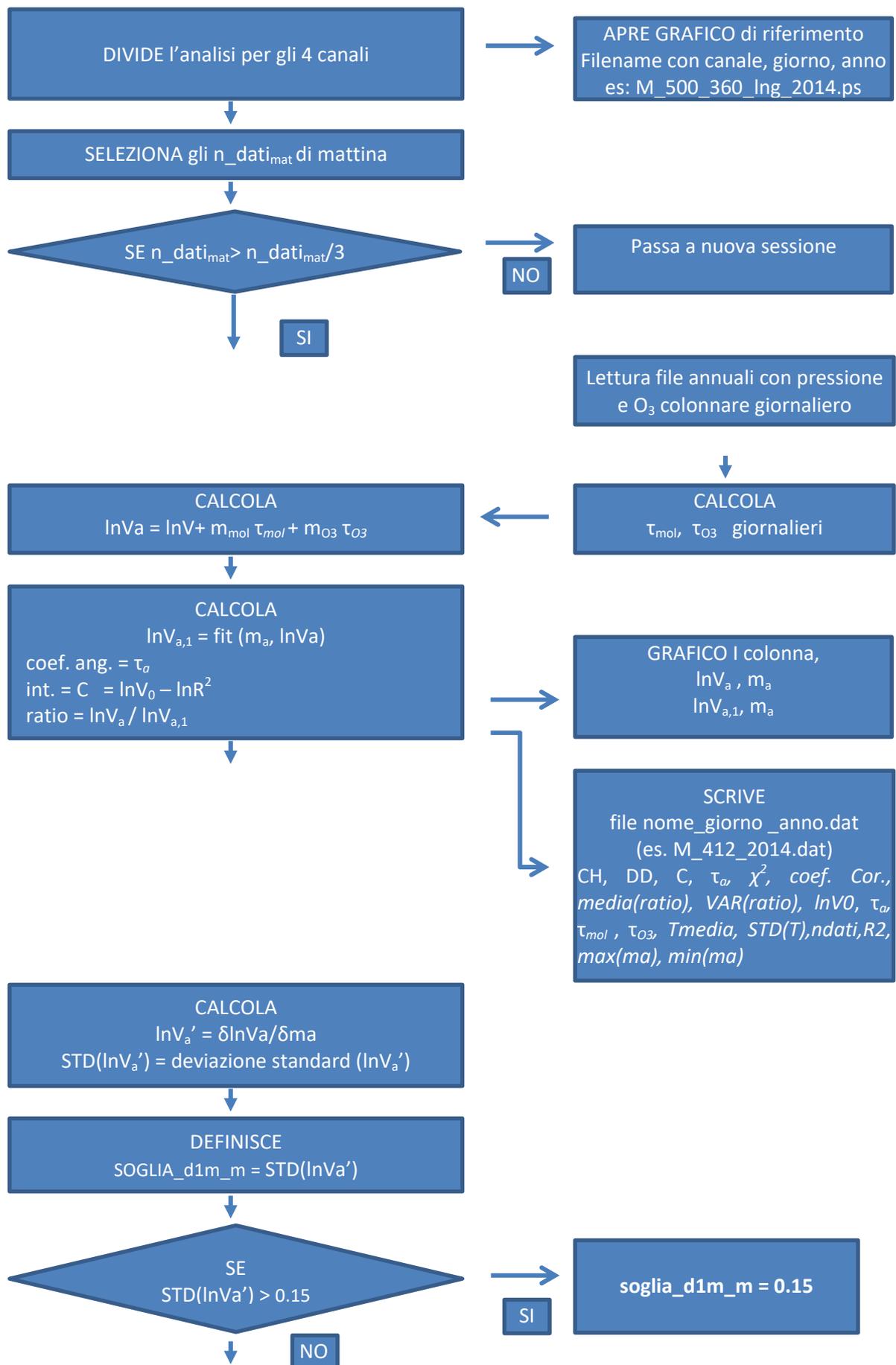
Come verifica finale della bontà dei risultati si sono paragonati gli *scatter plot* dell'esponente di Ångström e dello spessore ottico ricavati dal fotometro SP02 e dal radiometro MFRSR nel 2014. Il confronto mostra una buona corrispondenza per valori di spessore ottico a 500 nm maggiori di 0.1. Si è anche mostrato come anche solo un'attenuazione del 2-3% del segnale misurato a 500 e 862 nm, indicativa di una deposizione sulla finestra molto bassa, possa render facilmente conto della maggiore variabilità dell'esponente di Ångström stimato dal fotometro SP02 per valori dello spessore ottico inferiori a 0.1.

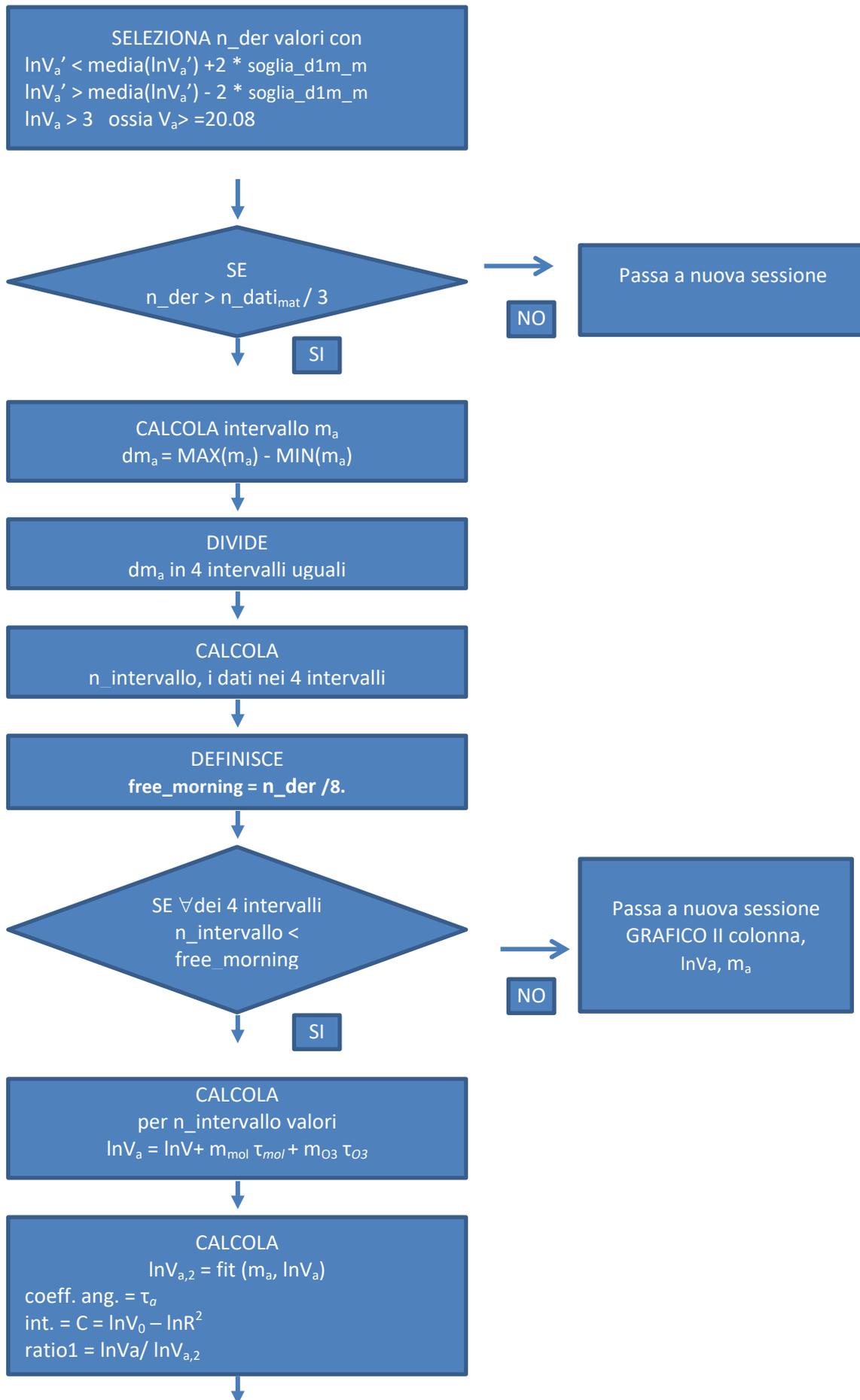
La metodologia ha quindi dato prova di fornire risultati robusti anche quando applicata ad una serie di dati non ottimale e sarà applicata a casi in cui le condizioni del sito di misura consentano di caratterizzare la variabilità di diversi tipi di fotometri in maniera più dettagliata.

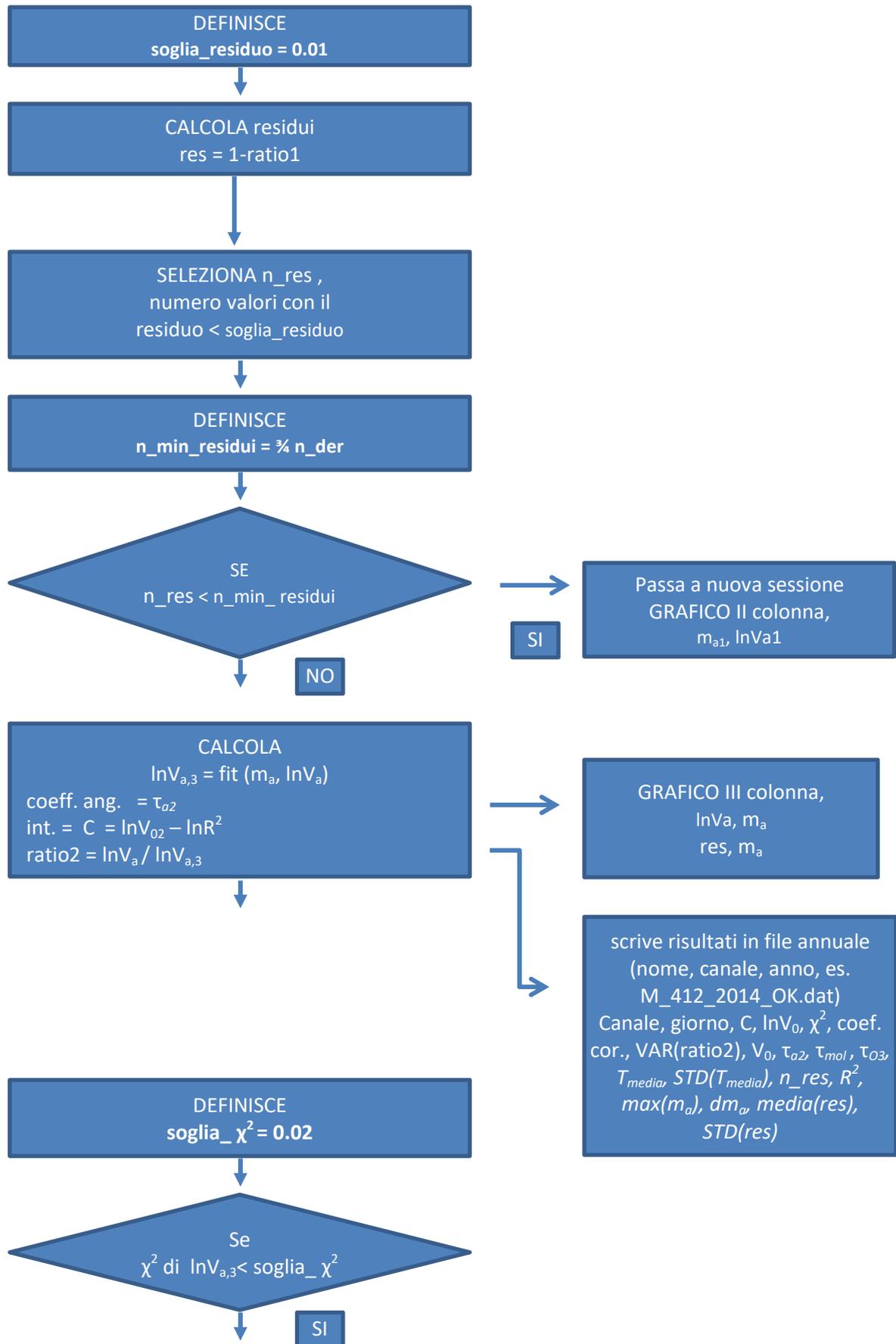
APPENDICE: DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROGRAMMA PRINCIPALE

Per una maggiore chiarezza riguardo la metodologia utilizzata per determinare il valore della singola costante di calibrazione si allega il diagramma di flusso del programma che applica il Langley *plot*.









Langley Plot ha avuto successo

scrive risultati in file annuale

(nome, canale, anno, es. M_412_2014_2OK.dat)

Canale, giorno, C, $\ln V_0$, χ^2 , coef. cor., VAR(ratio2), V_0 , τ_{a2} , τ_{mol} , τ_{O3} ,
 T_{media} , $STD(T_{media})$, n_{res} , R^2 , $max(m_a)$, dm_a , $media(res)$, $STD(res)$

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata condotta anche grazie al supporto del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca tramite il Progetto Bandiera RITMARE ed il Progetto di Interesse Strategico NEXDATA, e del Ministero dello Sviluppo Economico tramite la Ricerca di Sistema Elettrico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Basher, R. E., Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy, Global Ozone Res. Monit. Proj., Rep. 13, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland, Dec. (Available at <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ozwv/dobson/papers/report13/report13.html>), 1982.
- Biavati, G. and A. di Sarra, Individuazione dei periodi di cielo sereno da misure di radiazione solare globale e diffusa, Rapporto Tecnico ENEA, RT/2004/66/CLIM, 2004.
- Bird R. E. and Hulstrom, R. L., Precipitable Water Measurements with Sun Photometer, *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 1196, 1982.
- di Sarra, A., Sferlazzo, D., Meloni, D., Anello, F., Bommarito, C., Corradini, S., De Silvestri, L., Di Iorio, T., Monteleone, F., Pace, G., Piacentino, S. and S. Pugnaghi, Empirical correction of multifilter rotating shadowband radiometer (MFRSR) aerosol optical depths for the aerosol forward scattering and development of a long-term integrated MFRSR-Cimel dataset at Lampedusa, *Appl. Opt.*, **54**, 2725–2737 2015.
- Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, Wavelength dependence of optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, **104**, 31, 333–31, 349, 1999.
- Forgan, B. W., General method for calibrating Sun photometers, *Appl. Opt.*, **33**, 4841–4850, 1994.
- Frohlich C., Application Note of the WMO Sun-Photometer WMO/PMOD (Physikalisch Meteorologisches Observatorium and World Radiation Center), Davos Dorf, 1979.
- Halthore, R. N., Eck, T. F., Holben, B. N. and B.L. Markham, Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *J. Geophys. Res.*, **102**, 4343–4352, 1997.
- Hansen, J.E., and L.D. Travis, Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.*, **16**, 527–610, doi:10.1007/BF00168069, 1974.
- Harrison L. and J. Michalsky, Objective algorithms for the retrieval of optical depths from ground-based measurements, *Appl. Opt.*, **33**, 5126–5132, 1994.
- Kasten, E. and A. T. Young, Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt.*, **28**, 4735–4738, 1989.
- Kiedron, P. W. and J. J. Michalsky, Non-parametric and least squares Langley plot methods, *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 215–225, <https://doi.org/10.5194/amt-9-215-2016>, 2016.
- King, M. D., D. M. Byrne, B. M. Herman, J. A. Reagan, Aerosol size distributions obtained by inversion of spectral optical depth measurements, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2153–2167, 1978.
- Long C. N. and T. P. Ackerman, Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling, shortwave cloud effects, *J. Geophys. Res.*, **105**, 15609–15626 (2000).
- Meloni, D., A., di Sarra, G., Pace, and F. Monteleone, Aerosol optical properties at Lampedusa (Central Mediterranean) 2. Determination of single scattering albedo at two wavelengths for different aerosol types, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 715–727, 2006.
- Michalsky, J.J., Liljegren, J. C., and Harrison, L. C., A comparison of Sun photometer derivations of total column water vapor and ozone to standard measures of same at the Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement site, *J. Geophys. Res.*, **100**, 25,995–26,003, 1995.

- O'Neill N. and A. Royer, Extraction of bimodal aerosol-size distribution radii from spectral and angular slope (Angstrom) coefficients, *Appl. Opt.*, **32**, 1642-1645, 1993.
- Pace, G., A. di Sarra, D., Meloni, S., Piacentino, and P. Chamard, Aerosol optical properties at Lampedusa (Central Mediterranean) 1. Influence of transport and identification of different aerosol types, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 697-713, 2006.
- Pitts, D. E., W. E. McAllum, M. Heidt, K. Jeske, J. T. Lee, Temporal variations in atmospheric water vapor and aerosol optical depth determined by remote sensing, *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1312–1321, 1977
- Schmid B. and Wehrli C., Comparison of Sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp, *Appl. Opt.*, **34**, 4500-4512, 1995.
- Shaw, J., A. Reagan, and B. M. Herman, Investigations of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer, *J. Appl. Meteorol.*, **12**, 374–380, 1973.
- Shaw, G. E., Nitrogen dioxide—Optical absorption in the visible, *J. Geophys. Res.*, **81**, 5791–5792, 1976.
- Shaw, G. E., Sun Photometry, *Bulletin of American Meteorological Society*, **64**, 4-10, 1983.
- Volz, F. E., Photometer mit Selen-Photoelement zur spektralen Messung der Sonnenstrahlung und zur Bestimmung, der Wellenlangenabhängigkeit der Dunsttrubung, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. B*, **10**, 100–131, 1959.
- Volz, F. E., Economical Multispectral Sun Photometer for Measurements of Aerosol Extinction to 0.44 μm and Precipitable Water, *Appl. Opt.*, **13**, 1732, 1974.
- Yamamoto, G. and M. Tanaka, Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements, *Appl. Opt.*, **8**, 447-453, 1969.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
gennaio 2018