

# **Tecniche di fotometria solare per la qualità dell'aria: recenti avanzamenti nello studio del contenuto colonnare di NO<sub>2</sub> e delle proprietà ottiche degli aerosol**

Diémoz H.

ARPA Valle d'Aosta, loc. Grande Charrière 44, 11020 Saint-Christophe (AO)  
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Scienze dell'Atmosfera e del Clima, via Fosso del Cavaliere,  
100, 00133 Roma  
[h.diemoz@arpa.vda.it](mailto:h.diemoz@arpa.vda.it)

Siani A.M., Casale G. R.

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, P.le A. Moro, 5, 00185 Roma  
[annamaria.siani@uniroma1.it](mailto:annamaria.siani@uniroma1.it), [giuseppe.casale@uniroma1.it](mailto:giuseppe.casale@uniroma1.it)

Campanelli M.

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto Scienze dell'Atmosfera e del Clima, via Fosso del Cavaliere,  
100, 00133 Roma  
[m.campanelli@isac.cnr.it](mailto:m.campanelli@isac.cnr.it)

## **INTRODUZIONE**

Attraverso la misura della radiazione solare in arrivo al suolo è possibile studiare varie caratteristiche dell'atmosfera, come ad esempio le concentrazioni colonnari di gas in traccia o dell'aerosol. La fotometria solare si basa sull'equazione fondamentale di Bouguer-Lamber-Beer (Bouguer, 1729):

$$I=I_0 \exp(-\text{TAU} \cdot \text{AMF})$$

dove  $I$  rappresenta l'intensità (più precisamente la radianza, cioè la potenza per unità di superficie e di angolo solido) del fascio diretto di radiazione misurata a terra a una definita lunghezza d'onda,  $I_0$  la radianza esotrasferica (costante "extraterrestre", ovvero la radianza teoricamente misurabile in assenza di estinzione),  $\text{TAU}$  lo spessore ottico (il prodotto della densità colonnare del costituente atmosferico considerato e della sua sezione d'urto di assorbimento e di diffusione) e  $\text{AMF}$  il fattore di massa d'aria, ovvero la lunghezza del percorso dei raggi solari in tutta l'atmosfera riferita alla lunghezza corrispondente al sole allo zenith.

La fotometria solare, dunque, permette generalmente una stima del contenuto colonnare (cioè dal suolo fino alla "sommità" dell'atmosfera) di un determinato costituente. Rappresenta, perciò, un utile complemento al tradizionale monitoraggio della qualità dell'aria con centraline *in situ*, rappresentativo esclusivamente degli strati di atmosfera prossimi al suolo, e permette, dunque, di ottenere preziose informazioni lungo la "terza dimensione" dell'atmosfera, quella verticale. D'altra parte, uno dei limiti principali della fotometria solare è che essa è, ovviamente, utilizzabile solo quando il sole è visibile, e dunque non durante la notte o in giornate nuvolose.

Nel contributo verranno descritte tre applicazioni della fotometria solare sviluppate da ARPA Valle d'Aosta nel corso degli ultimi anni e pubblicate come articoli su riviste internazionali (Diémoz et al., 2014a; Diémoz et al., 2014b; Diémoz et al., 2016).

## **STUDIO DELL'AEROSOL COLONNARE IN VALLE D'AOSTA**

La misura delle proprietà ottiche e microfisiche dell'aerosol riveste oggi un ruolo di fondamentale importanza nella fisica dell'atmosfera. L'aerosol ha effetti diretti (bilancio radiativo) e indiretti (nuclei di condensazione delle nubi, Levy et al., 2013) sul clima e provoca danni alla salute

umana (WHO, 2006). In particolare, in territorio montano, gli impatti su un clima intrinsecamente fragile possono essere molto pronunciati, come nel caso dei ghiacciai. Da non dimenticare, inoltre, l'impatto dell'aerosol sul paesaggio: anche basse concentrazioni di polveri, soprattutto se accompagnate da dinamiche igroscopiche, possono notevolmente peggiorare la qualità visiva del paesaggio, provocando un grave danno turistico ed economico. La regione alpina, infine, all'incrocio tra il bacino mediterraneo e l'Europa continentale, è caratterizzata da basse concentrazioni di inquinanti ed è, perciò, un'area ideale per monitorare fenomeni di trasporto a macroscale. L'orografia complessa della regione alpina rende arduo il monitoraggio da satellite e, di conseguenza, necessaria la misura da terra quale riferimento.

Per questi motivi, ARPA Valle d'Aosta ha avviato nel 2012 un programma di monitoraggio delle proprietà ottiche e microfisiche dell'aerosol tramite tecniche fotometriche ed ha installato presso la sua sede di Saint-Christophe (45.7422°N, 7.3570°E, 570 m slm) un fotometro POM-02. Lo strumento opera a 11 diverse lunghezze d'onda comprese tra l'ultravioletto (315 nm) e l'infrarosso (2200 nm) e in due modalità diverse. Nella prima modalità, lo strumento registra la radiazione diffusa dal cielo in direzioni diverse su una semicirconferenza allo stesso angolo di elevazione del sole (almucantar); nella seconda modalità, solo la radiazione diretta dal sole è misurata dallo strumento. La stazione di Aosta/Saint-Christophe è inserita nella rete europea di monitoraggio dell'aerosol EuroSkyRad (<http://www.euroskyrad.net/>).

I risultati del primo anno di misure, descritti in modo più approfondito nella pubblicazione, hanno evidenziato spessori ottici dell'aerosol (AOD) mediamente bassi, ma molto variabili. Poiché la distribuzione statistica degli spessori ottici è meglio descritta da una curva log-normale, le proprietà statistiche medie saranno indicate attraverso la media e la deviazione standard geometriche:

$$\text{AOD}(500 \text{ nm}) = 0.07 \cdot 2.4^{\pm 1}$$

Un confronto con altri siti della rete ESR (Aosta/Saint-Christophe, Roma, Burjassot/Valencia - in Spagna - e Londra) è proposto in fig. 1, da cui si evince come Roma e Londra siano mediamente le città con un maggiore carico di aerosol. Spessori ottici relativamente alti possono, tuttavia, essere misurati talvolta anche in Valle d'Aosta, in seguito a emissioni locali (in particolare, durante episodi di inversione termica e stagnazione d'aria) o avvezioni a larga scala, come nel caso di polveri sahariane (Magri et al., 2016) o grandi incendi. Tra questi ultimi, riportiamo il caso degno di nota del 13 luglio 2013, quando il fotometro ha misurato uno spessore ottico di quasi 0.7 a 500 nm (cioè circa dieci volte maggiore rispetto alla media). Anche a occhio nudo era visibile durante l'episodio una larga aureola solare (fig. 2). L'analisi delle retrotraiettorie ha permesso di individuare l'origine oltreoceano, in Canada, dove pochi giorni prima era scoppiato il secondo incendio più grande della storia del paese.

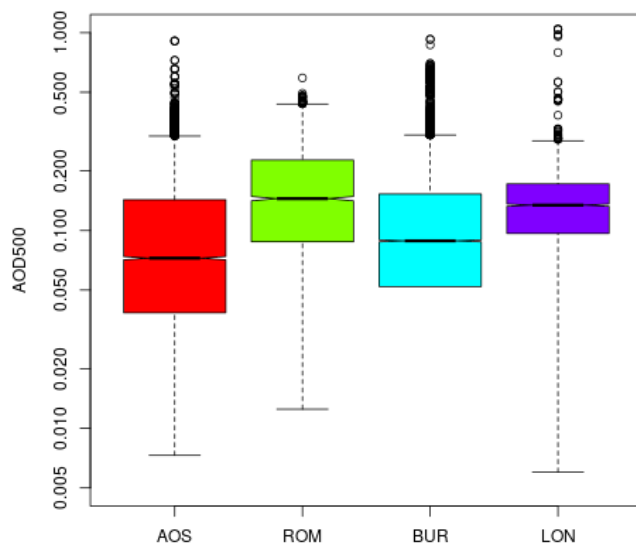
In tab. 1 sono indicati i valori medi degli spessori ottici misurati a Saint-Christophe e della loro dipendenza spettrale (esponente di Angstrom) raggruppati in tre diverse classi: giorni normali, trasporto di polveri dal sahara e ceneri di incendi. Come si può notare, le polveri minerali desertiche e le ceneri da incendi si possono distinguere dai giorni normali a causa degli spessori ottici maggiori e differiscono tra loro per un diverso esponente di Angstrom. Nel caso delle polveri dal deserto, una minore dipendenza spettrale (esponente di Angstrom minore) indica particelle più grandi; per gli incendi, una maggiore dipendenza spettrale (esponente di Angstrom maggiore) indica particelle più piccole.

Tabella 1 - Proprietà medie di tre diverse classi di aerosol

|                   | Spessore ottico dell'aerosol | Esponente di Angstrom |
|-------------------|------------------------------|-----------------------|
| Giorni normali    | $0.07 \cdot 2.2^{\pm 1}$     | $1.1 \pm 0.4$         |
| Polveri sahariane | $0.20 \cdot 1.6^{\pm 1}$     | $0.8 \pm 0.3$         |
| Ceneri da incendi | $0.30 \cdot 1.6^{\pm 1}$     | $1.6 \pm 0.2$         |

Infine, diamo una rapida descrizione ai prodotti di inversione dalle scansioni almucantar. Uno dei dati più interessanti, confrontabile con le proprietà misurabili *in situ*, è la distribuzione colonnare di volume dell'aerosol. Le diverse dimensioni del particolato atmosferico in tre casi diversi sono ben visibili dal grafico in fig. 3.

Figura 1 - Boxplot degli spessori ottici ad Aosta, Roma, Burjassot (Valencia) e Londra



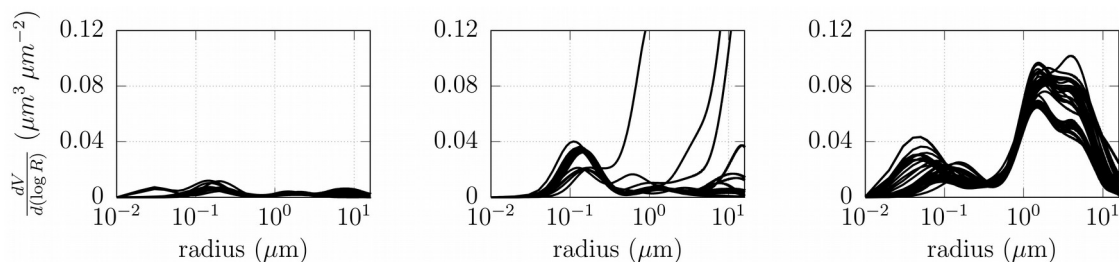
La mediana di ogni distribuzione è indicata dalla linea centrale di ogni rettangolo, la cui altezza rappresenta la distanza interquartile. I "baffi" identificano i massimi e i minimi valori, esclusi gli outliers (pallini).

Figura 2



Immagine riprese dalla cloudcam in due giorni consecutivi (12 e 13 luglio 2013).

Figura 3 - Distribuzioni di volume



Esempi di distribuzione di volume: sinistra, 16 novembre 2012 (giorno con basse concentrazioni di aerosol e alta visibilità); centro, 22 aprile 2013 (fuochi di sterpaglie; nel grafico sono anche visibili interferenze delle nubi agli alti raggi); destra, 2 maggio 2013 (poveri sahariane).

### MISURA DELL'AEROSOL NELLA MEGALOPOLI DI ATENE

Negli ultimi anni, la misura di variabili ambientali nella megalopoli di Atene ha assunto un rinnovato interesse. Nelle serie dei principali marker delle emissioni antropiche, infatti, è ben riscontrabile il segno della recessione economica globale, a partire dal 2008. Presso l'accademia di Atene sono installati uno spettrofotometro Brewer, dal 2004, simile a quello in dotazione ad ARPA, e un fotometro Cimel, dal 2008. Il primo strumento, generalmente utilizzato per la stima del contenuto colonnare di ozono nello spettro ultravioletto, è anche in grado di misurare la radiazione solare diretta nella banda visibile a 440 nm circa, e dunque potenzialmente in grado di derivare lo spessore ottico dell'aerosol a tale lunghezza d'onda, coincidente con il Cimel. Quest'ultimo, invece, è il tipo di fotometro su cui è basata la rete AERONET, lo standard mondiale *de facto* per la determinazione delle proprietà ottiche dell'aerosol in atmosfera.

Obiettivo di una missione a breve termine in seno alla COST Action europea EUBREWNET è stato quello di migliorare la derivazione dell'aerosol con lo spettrofotometro Brewer e di confrontarlo con i risultati del Cimel, questo allo scopo di estendere la serie di AERONET agli anni precedenti alla recessione economica globale e di poter così calcolare, in un prossimo futuro, un trend più affidabile dell'aerosol nella città di Atene.

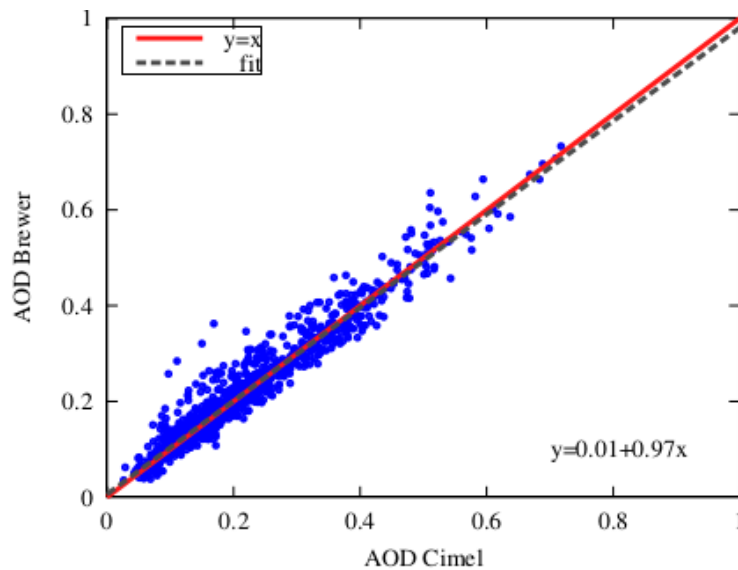
Il confronto ha dato correlazioni eccellenti sia durante un periodo di campagna intensiva di due settimane (indice di correlazione di Pearson di 0.996 e 90% dei dati entro le raccomandazioni stabilite dall'Organizzazione Mondiale della Meteorologia) sia considerando l'intera serie pluriennale (indice di correlazione di 0.97, fig. 4). Dal grafico si possono notare spessori ottici piuttosto elevati, con valori medi di  $0.17 \pm 1.8$  e picchi massimi superiori a 0.8 dovuti soprattutto all'avvezione di polveri dal deserto del Sahara.

Principale fonte di incertezza nel confronto è la stabilità radiometrica del Brewer, verificabile unicamente attraverso la futura istituzione di standard viaggianti da parte dei maggiori centri di calibrazione europei o mondiali.

### MISURA DEL BIOSSIDO D'AZOTO TRAMITE SPETTROFOTOMETRIA BREWER

Il biossido d'azoto è un componente chiave dell'atmosfera terrestre: nonostante la sua bassa concentrazione, riveste una estrema importanza nei processi chimici che portano alla distruzione dello strato di ozono stratosferico o, in condizioni differenti, alla sua salvaguardia. In troposfera, inoltre, il biossido d'azoto è uno dei principali responsabili dello smog fotochimico. Infine, tale gas assorbe la radiazione solare nel visibile, con conseguenti effetti radiativi e di interferenza con altri tipi di misure fotometriche.

Figura 4



Scatterplot delle misure di spessore ottico dell'aerosol ottenute con il Brewer e il Cimel, installati presso l'Accademia di Atene.

Lo spettrofotometro Brewer, tradizionalmente utilizzato per il monitoraggio dell'ozono stratosferico, è potenzialmente in grado di determinare anche la concentrazione colonnare del biossido d'azoto. In particolare, lo strumento misura la radiazione solare (diretta o diffusa allo zenith) a sei diverse lunghezze d'onda. Attraverso una combinazione lineare delle sei componenti, è possibile isolare i diversi assorbitori della radiazione solare nell'intervallo spettrale di misura, tra cui l' $\text{NO}_2$ .

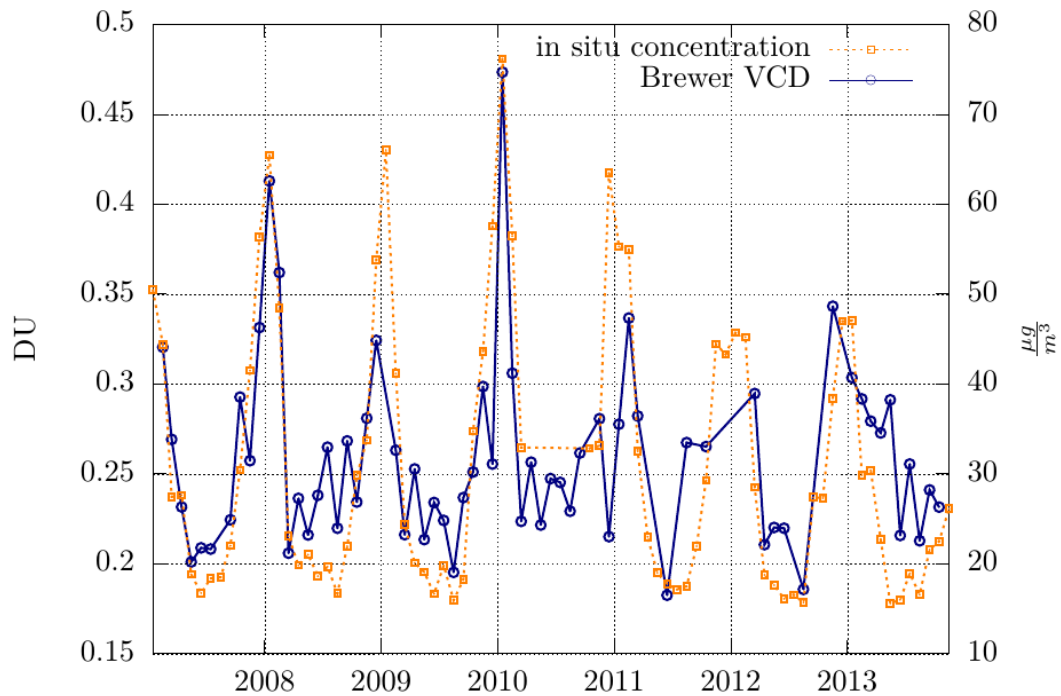
Una tecnica aggiornata di retrieval dell' $\text{NO}_2$  è stata sviluppata da ARPA Valle d'Aosta ed è ora disponibile a tutta la comunità internazionale. Per verificarne l'efficacia, il Brewer normalmente operante presso la sede di ARPA Valle d'Aosta è stato trasferito per due mesi (settembre e ottobre) nel corso del 2012 all'osservatorio di Izaña (Tenerife) per una campagna di taratura e confronto con strumentazione di riferimento. L'osservatorio è stato scelto a causa della sua lontananza da fonti di inquinamento locale (2400 m slm, al di sopra dell'inversione degli Alisei) e della sua posizione geografica (in corrispondenza del ramo discendente della cella di Hadley) che favorisce alta pressione e cieli sereni quasi perenni.

Il metodo di retrieval così validato è stato poi applicato a quattro serie storiche di misure Brewer in Europa (Aosta/Saint-Christophe, Roma, Atene e Hradec Králové, in Repubblica Ceca) al fine di individuare eventuali trend nella concentrazione di biossido d'azoto. Diminuzioni rilevanti sono state riscontrate su Roma e su Hradec Králové ( $-5.0\% \pm 1.5\%$ /anno, statisticamente significative), oltre che su Atene ( $-1.3\% \pm 0.8\%$ /anno, statisticamente non significativa).

In fig. 5 è graficata la serie di misure mensili del Brewer presso la stazione di Aosta-Saint-Christophe, sovrapposta a quella delle centraline per il monitoraggio della qualità dell'aria. Benché non necessariamente le due serie debbano forzatamente mostrare lo stesso andamento (il Brewer è sensibile all'intera atmosfera – troposfera e stratosfera –, mentre le centraline sondano esclusivamente lo strato di atmosfera più vicino al suolo), la correlazione è elevata (0.75), segno che la concentrazione dell'intera atmosfera – anche in un sito relativamente poco inquinato come Aosta – è quasi interamente governata dalle emissioni locali.

I dati ground-based sono stati, infine, confrontati con le stime da radiometri satellitari (OMI, SCIAMACHY e GOME2): escludendo il sito ad orografia complessa di Saint-Christophe, i bias sono generalmente molto bassi ( $-2.4\%$ ), tuttavia la correlazione lineare tra le due serie, al massimo di 0.5, lascia spazio a future indagini e ulteriori miglioramenti, sia nella misura a terra sia dalla stima da satellite.

Figura 5



Concentrazione colonnare (troposfera e stratosfera) del biossido d'azoto misurata ad Aosta tramite spettrofotometro Brewer e concentrazione *in situ* (al suolo) misurata dalle centraline della rete di monitoraggio della qualità dell'aria.

### Ringraziamenti

Si ringraziano la COST Action EUBREWNET – A European Brewer Network e Sapienza – Università di Roma per il finanziamento delle trasferte relative alle attività descritte nell'articolo, svolte nell'ambito di una missione scientifica a breve termine (STSM) ad Atene e del dottorato in telerilevamento (Tenerife), rispettivamente.

### Bibliografia

- Bouguer, P., *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, 1729, Ed. Jombert, C., Paris, France
- Diémoz, H., Campanelli, M., Estellés, V., *One year of measurements with a POM-02 sky radiometer at an Alpine EuroSkyRad Station*, 2014a, J. Meteorol. Soc. Jpn.
- Diémoz, H., Siani, A. M., Redondas, A., Savastiouk, V., McElroy, C. T., Navarro-Comas, M., Hase, F., *Improved retrieval of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) column densities by means of MKIV Brewer spectrophotometers*, 2014b, Atmos. Meas. Tech.
- Diémoz, H., Eleftheratos, K., Kazadzis, S., Amiridis, V., Zerefos, C. S., *Retrieval of aerosol optical depth in the visible range with a Brewer spectrophotometer in Athens*, 2016, Atmos. Meas. Tech.
- Levy, H., Horowitz, L. W., Schwarzkopf, M. D., Ming, Y., Golaz, J.-C., Naik, V., Ramaswamy, V., *The roles of aerosol direct and indirect effects in past and future climate change*, 2013, J. Geophys. Res.
- Magri, T., Diémoz, H., Tarricone, C., *Riscontri sperimentali del trasporto di polveri sahariane in Valle d'Aosta ed impatti sulla qualità dell'aria*, 2016, VI Convegno nazionale degli agenti fisici
- WHO, *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, 2006