

Caratterizzazione di radiometri ultravioletti solari a banda larga presso il Laboratorio di Ottica dell'ARPA Piemonte e interconfronto con altri laboratori europei

Facta S.

ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), s.facta@arpa.piemonte.it

Saudino Fusette S.

ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), s.saudino@arpa.piemonte.it

Bonino A.

ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), a.bonino@arpa.piemonte.it

Diemoz H.

ARPA Valle d'Aosta, Loc. grende Charriere 44, 11020 Saint-Christophe (AO), h.diemz@arpa.vda.it

Anglesio L.

ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), l.anglesio@arpa.piemonte.it

d'Amore G.

ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), g.damore@arpa.piemonte.it

Gröbner J.

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, Dorfstrasse 33, CH-7260 Davos Dorf, Switzerland julian.groebner@pmodwrc.ch

Riassunto

Nel corso degli ultimi anni si è assistito allo sviluppo e alla diffusione di stazioni di monitoraggio per la misura della radiazione ultravioletta (UV) solare in Italia. Tali stazioni generalmente impiegano radiometri a banda larga con curva di risposta prossima allo spettro ad azione eritemale e permettono la misura in continuo dell'indice UV.

Le caratteristiche di risposta di questi radiometri hanno reso necessario lo sviluppo di una procedura di taratura dedicata, al fine di ottenere dati riproducibili tra strumenti diversi. In particolare la taratura ne presuppone la caratterizzazione in laboratorio, basata sulla misura della risposta spettrale e di quella angolare. In questo lavoro verranno illustrate le procedure seguite presso il Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte per determinare la risposta spettrale dei radiometri, in particolare ne verranno descritte le problematiche e le criticità associate e verranno riportati i risultati di interconfronti effettuati con altri Laboratori europei.

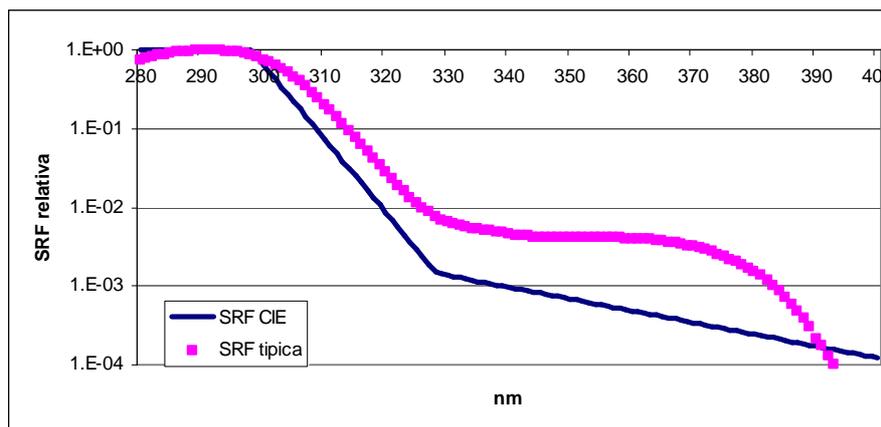
INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni, gli sviluppi della strumentazione e delle metodologie impiegate per la misura della radiazione solare UV hanno portato a importanti miglioramenti in questo campo. Gli strumenti d'eccellenza per la misura della radiazione solare UV sono gli spettroradiometri, ma gli elevati costi e la necessità di costante manutenzione ne limitano l'utilizzo principalmente presso alcune stazioni dove costituiscono il riferimento per la calibrazione di radiometri a banda larga (Hulsen et al, 2007). Sono questi ultimi gli strumenti generalmente installati presso le stazioni per la misura della radiazione UV solare. La loro risposta spettrale, ottenuta per mezzo di opportuni filtri, riproduce la sensibilità della pelle umana alla radiazione UV (CIE, 1998) e permette di ottenere una misura di irradianza efficace eritemale o di Indice UV (WHO, 2002).

La non perfetta corrispondenza della risposta spettrale dei radiometri, di cui un esempio è riportato in fig.1, con lo spettro d'azione eritemale e la variazione di diversi ordini di grandezza dello spettro solare al suolo hanno reso necessario definire una procedura di taratura specifica per questi strumenti (Grobner et al, 2006). Tale taratura si basa da un lato sull'esposizione dei radiometri alla radiazione solare e dall'altro sulla loro caratterizzazione in laboratorio ai fini di determinare la

risposta spettrale e quella angolare. L'esposizione solare, per confronto con uno spettrometro di riferimento, note le risposte spettrale e angolare, consente di valutare un coefficiente di taratura assoluto dei radiometri. Tramite modello di trasporto radiativo, sulla base delle risposte spettrale e angolare, viene quindi determinata una matrice di coefficienti correttivi da applicare, in funzione dell'ozono colonnare e dell'elevazione solare, al fattore di cui sopra. Il prodotto tra tale fattore e la matrice dei coefficienti correttivi costituisce la matrice di taratura del radiometro.

Figura 1 – Spettro ad azione eritemale e risposta spettrale di un radiometro. È riportato il confronto tra lo spettro ad azione eritemale e una tipica risposta spettrale di un radiometro banda larga per la misura dell'Indice UV



Sulla base di quanto riportato si evince che la qualità delle misure di radiazione UV solare ottenute per mezzo di radiometri banda larga dipende significativamente dall'accuratezza della caratterizzazione in laboratorio. In questo lavoro verranno descritti i metodi impiegati dal Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte situato ad Ivrea per determinare la risposta spettrale dei radiometri e verranno riportati i risultati delle misure eseguite, confrontate con quelle ottenute da altri Laboratori europei.

MATERIALI E METODI

Le caratteristiche della risposta spettrale (Spectral Response Factor - SRF) dei radiometri ne rendono complessa la misura, soprattutto in relazione ai seguenti fattori:

- variazione della sensibilità dei radiometri di 4 ordini di grandezza nell'intervallo spettrale 280-400 nm. L'andamento di una tipica risposta spettrale è stato riportato in fig.1: dopo una prima regione in cui non si registrano forti variazioni della sensibilità del radiometro, la sensibilità diminuisce con un elevato gradiente tra 300 e 330 nm; seguono quindi una regione di nuova stabilità e infine, per lunghezze d'onda superiori a 370-380 nm, una di rapida diminuzione.
- sensibilità dei radiometri estremamente bassa tipicamente per lunghezze d'onda superiori a 370-380 nm, dove i segnali di tensione generati sui radiometri si confondono con il rumore strumentale.

Tali fattori determinano le caratteristiche della strumentazione utilizzata per la misura e dei metodi impiegati.

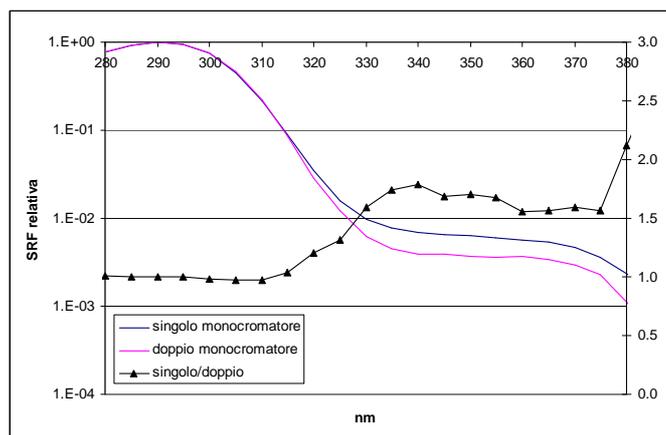
SISTEMA SPERIMENTALE

Il sistema sperimentale utilizzato dal Laboratorio di Arpa Piemonte consiste in un doppio monocromatore Bentham DM 150 con reticoli di 2400 scanalature per millimetro e lunghezza d'onda di blazing 250nm. Una lampada allo Xe da 150 W viene accoppiata tramite un sistema di lenti al doppio monocromatore, in modo da ottenere la massima potenza di radiazione in corrispondenza della fenditura d'uscita. In corrispondenza di questa è posto un deviatore di fascio (beam splitter), montato verticalmente a 45°, che trasmette circa l'80% della radiazione verso il

rivelatore in analisi e il 20% verso un fotodiode utilizzato per verificare la stabilità del segnale in uscita nel corso delle misura.

La necessità di massimizzare il segnale in uscita al doppio monocromatore è dovuta alla bassa sensibilità dei radiometri già per lunghezze d'onda superiori a 330-340 nm. Al fine di ottenere segnali maggiori, si potrebbe sostituire il doppio monocromatore con un singolo, ma la maggiore luce parassita (stray light) associata a questa soluzione rappresenta un problema nel caratterizzare i radiometri nella regione spettrale in cui sono meno sensibili. Infatti dove la sensibilità diminuisce di 3-4 ordini di grandezza una stray light di 10^{-3} - 10^{-4} (migliori valori ottenibili con un singolo monocromatore) può portare ad un aumento della tensione sul radiometro dovuto, non al segnale alla lunghezza d'onda in esame, ma alla luce parassita alle lunghezze d'onda a cui il radiometro è più sensibile. In fig.2 è riportato il confronto tra le SRF, normalizzate al valore massimo, ottenute, sullo stesso radiometro, tramite un singolo (Zolix – Omni λ -150) e un doppio monocromatore (Bentham DM 150). A partire da 320 nm la prima è significativamente maggiore rispetto alla seconda, ad indicare che il contributo della stray light, dovuto all'utilizzo del singolo monocromatore, genera segnali sul radiometro paragonabili a quelli dovuti alla lunghezza d'onda in esame.

Figura 2 – Confronto singolo e doppio monocromatore
Sono riportate le SRF ottenute sullo stesso radiometro impiegando un singolo e un doppio monocromatore e il rapporto tra le due.



Per valutare la SRF del radiometro occorre conoscere la potenza in uscita al doppio monocromatore $P(\lambda)$ alle varie lunghezze d'onda. Tale potenza viene misurata con un fotodiode tarato SI-CAL-EX. Indicando quindi con $V(\lambda)$ la tensione sul radiometro alla lunghezza d'onda λ e con V_{offset} il segnale di fondo del radiometro, misurato otturando la fenditura d'ingresso del monocromatore, la SRF(λ) del radiometro è data da:

$$SRF(\lambda) = \frac{V(\lambda) - V_{offset}}{P(\lambda)}$$

La tensione sul radiometro viene letta tramite un analizzatore di segnale HP3561A.

La misura della SRF viene effettuata nell'intervallo spettrale compreso tra 280 e 400 nm a intervalli di 2 nm e normalizzata al valore massimo. L'incertezza relativa sul fattore SRF viene stimata per ogni radiometro sulla base di misure ripetute del segnale di fondo e della tensione a radiometro irradiato e dell'incertezza sul fattore di taratura del fotodiode. Risulta generalmente inferiore al 15% per valori di SRF superiori a 10^{-4} e inferiore al 30% per valori di SRF al di sotto di 10^{-4} .

Considerato l'andamento tipico della SRF dei radiometri, due parametri influenzano in modo significativo la misura nella regione spettrale compresa tra 300 e 330 nm: l'allineamento e la slit function del monocromatore.

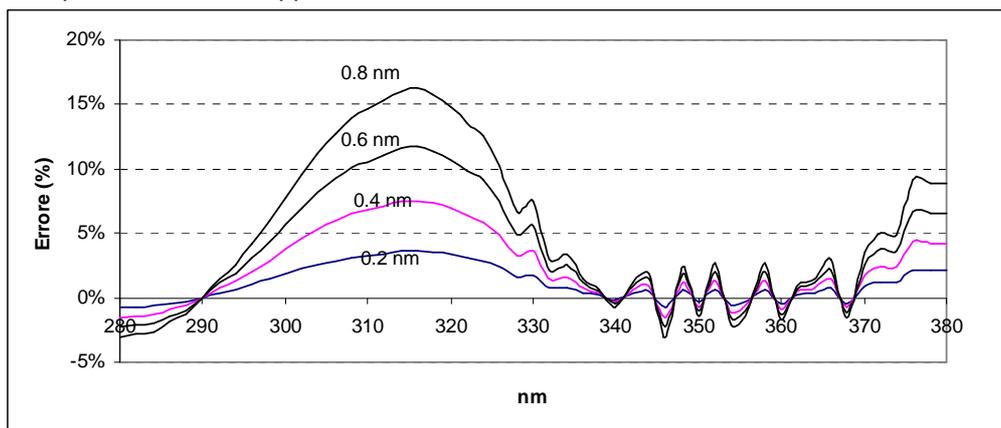
Per lunghezze d'onda maggiori, fino a 380 nm, a causa della diminuzione del segnale, diviene molto importante la corretta caratterizzazione della tensione di fondo del radiometro. Per lunghezze d'onda ancora superiori, la tensione sul radiometro diventa spesso praticamente indistinguibile dal rumore strumentale, rendendo la SRF non più valutabile. D'altra parte nel calcolo della matrice di taratura, la SRF per lunghezze d'onda superiori a 380 nm non ha un peso significativo, considerata l'estremamente bassa sensibilità dei radiometri, come verrà evidenziato anche più avanti.

ALLINEAMENTO

L'allineamento del doppio monocromatore viene effettuato monitorando alle diverse lunghezze d'onda impostate, tra 280 e 400 nm a passo di 2 nm, il segnale in uscita con uno spettroradiometro pre-allineato utilizzando i picchi di una sorgente al mercurio. Questa metodologia consente di effettuare l'allineamento del sistema nella stessa configurazione in cui viene utilizzato per la misura della SRF e di ridurre a 0.1 nm l'incertezza sull'allineamento, rispetto al caso in cui venga effettuato accoppiando direttamente al monocromatore la lampada al mercurio (incertezze di 0.2-0.3 nm).

Il corretto allineamento riveste particolare importanza soprattutto nella regione di rapida variabilità di sensibilità dei radiometri. In fig.3 viene riportato l'errore che si commette, valutato teoricamente partendo dalla SRF di un radiometro Kipp&Zonen, in funzione del disallineamento: disallineamenti di soli 0.4 nm portano ad errori prossimi all'8% a 315 nm.

Figura 3 – Allineamento del doppio monocromatore Sono riportati in funzione della lunghezza d'onda gli errori nella valutazione della SRF dovuti al disallineamento per un tipico radiometro Kipp&Zonen

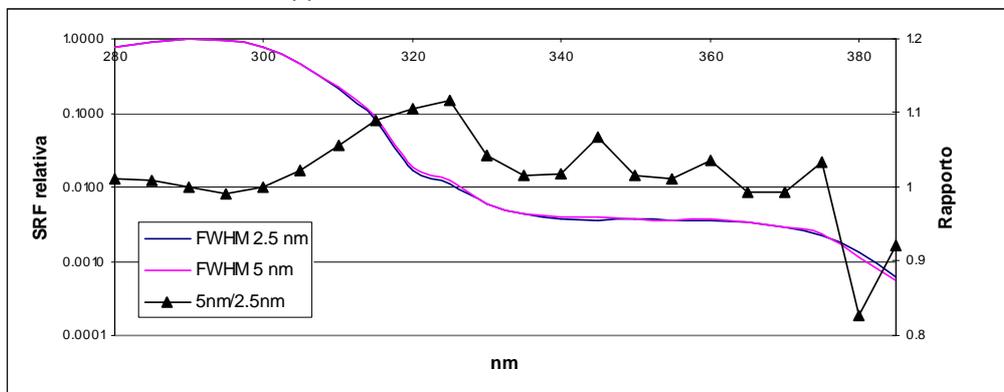


SLIT FUNCTION

La slit function del doppio monocromatore, funzione della dimensione delle fenditure in ingresso e in uscita e della dispersione del monocromatore, è stata valutata durante la procedura di allineamento tramite lo spettroradiometro. La larghezza (FWHM) del segnale in uscita ma anche la sua forma sono parametri che influenzano la SRF soprattutto nella regione di rapida variabilità di sensibilità dei radiometri. In fig.4 viene riportata la SRF ottenuta sullo stesso radiometro utilizzando fenditure tali da avere una FWHM di 2.5 nm e di 5 nm: si registrano differenze anche superiori al 10%.

Tanto minore è la dimensione delle fenditure e quindi la FWHM del segnale in uscita, tanto più precisa sarà la determinazione della SRF tra 300 e 330 nm. Dall'altra parte la diminuzione della dimensione delle fenditure comporta una diminuzione del segnale in uscita al monocromatore. Presso il Laboratorio di Arpa Piemonte le fenditure sono state regolate in modo da avere una FWHM di 2.5nm.

Figura 4 – Slit function del doppio monocromatore. Sono riportate le SRF ottenute su un radiometro Kipp&Zonen per fenditure del monocromatore tali da avere una FWHM di 2.5 nm e 5 nm, e il rapporto tra le due.



SEGNALE DI FONDO

Nelle regione spettrale in cui la sensibilità del radiometro è bassa la misura della SRF è tanto più precisa quanto meglio si è riusciti a caratterizzare il segnale di fondo, in quanto le tensioni sul radiometro divengono paragonabili al rumore strumentale (dell'ordine delle decine di μV). Dal momento che il segnale di fondo del radiometro o il dato restituito dallo strumento utilizzato per rilevarlo (a causa di oscillazioni di quest'ultimo) possono subire delle variazioni nel corso dell'acquisizione, il fondo viene monitorato sia prima che dopo la misura della SRF in corrispondenza di ogni lunghezza d'onda. Il valore del fondo, così come della tensione a radiometro irradiato, nelle regione di minore sensibilità, vengono inoltre determinati come media su 15 o 30 letture, a seconda dello strumento in studio.

INTERCONFRONTO CON ALTRI LABORATORI

Le misure sono state effettuate sui 4 radiometri riportati in tabella 1. I primi tre appartengono alla rete di monitoraggio di Arpa Valle d'Aosta mentre il quarto (Kipp&Zonen UV-S-AE-T s.n. 80003) è in dotazione di Arpa Piemonte.

I risultati delle tarature effettuate sui radiometri della rete di monitoraggio di Arpa Valle d'Aosta sono stati interconfrontati con il PMOD/WRC di Davos. La taratura del radiometro di Arpa Piemonte è stata inoltre confrontata con la taratura effettuata dal produttore Kipp&Zonen

Tabella 1 – Radiometri analizzati e Laboratori di interconfronto

Radiometro	Laboratorio
Kipp&Zonen UV-S-AE-T s.n. 526	PMOD/WRC
Kipp&Zonen UV-S-AE-T s.n. 40618	PMOD/WRC
Yankee Env. Syst UVB-1	PMOD/WRC
Kipp&Zonen UV-S-AE-T s.n. 80003	Kipp&Zonen

I sistemi sperimentali utilizzati sia da PMOD/WRC sia da Kipp&Zonen sono descritti in Schreder et al, 2004.

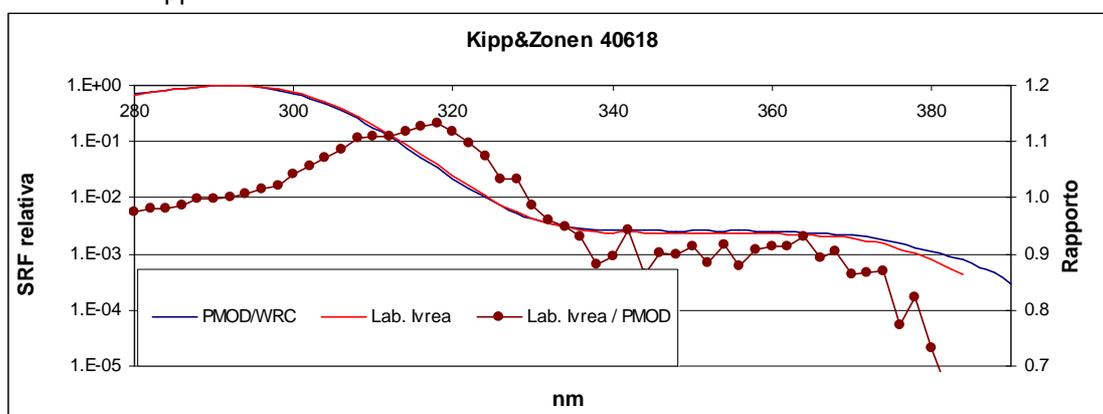
In merito al primo interconfronto, in fig.5 (a,b,c) sono riportate le SRF dei tre radiometri misurate da PMOD/WRC e dal Laboratorio di Arpa Piemonte e i rapporti tra le stesse. Per gli strumenti Kipp&Zonen, nell'intervallo spettrale compreso tra 280 e 370 nm, nonostante la variazione della SRF di 3 ordini di grandezza, le differenze risultano contenute entro il 15 %. Per il radiometro Yankee si sono invece ottenute differenze maggiori, soprattutto a causa dell'elevato rumore strumentale. Inoltre l'intervallo spettrale caratterizzato (280-342 nm) è risultato inferiore rispetto a

quello tipicamente analizzato per i Kipp&Zonen (280-385 nm), essendo questo un rivelatore di radiazione UVB, che viene adattato a misure di Indice UV.

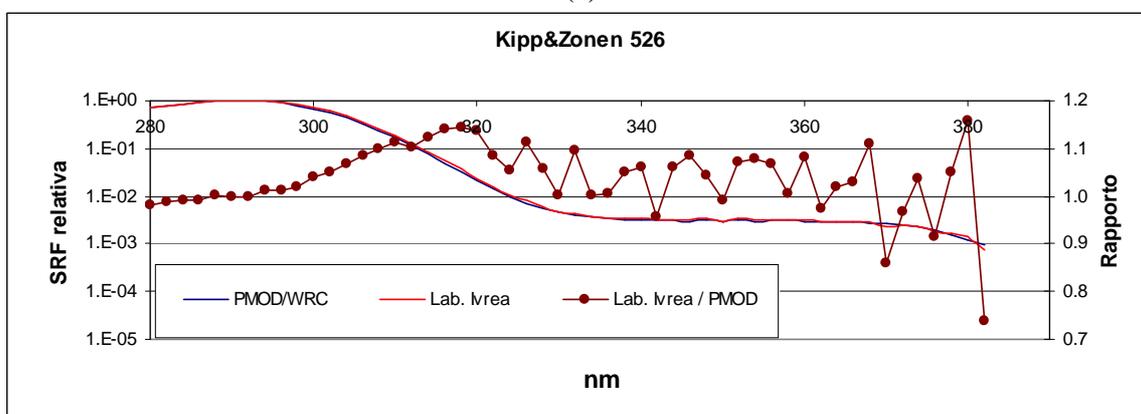
Nonostante le differenze tra i due laboratori rientrino nell'incertezza sperimentale, le curve di taratura misurate dal laboratorio di Arpa Piemonte presentano uno spostamento in lunghezza d'onda rispetto a quelle ottenute da PMOD/WRC, ad indicare un possibile disallineamento di uno dei due monocromatori. Da una verifica dell'allineamento del monocromatore di Arpa Piemonte, è risultato un disallineamento di 0.6 nm, in tutto l'intervallo spettrale considerato.

A seguito della correzione dell'allineamento del monocromatore, è stata quindi effettuata una nuova taratura del radiometro Kipp&Zonen s.n. 526, i cui risultati in confronto con quelli del Laboratorio di Davos sono riportati in fig.6. Le differenze nella regione spettrale comprese tra 300 e 330 nm risultano in questo caso entro il 5% e entro il 15 % nella regione spettrale tra 280 e 370nm.

Figura 5 – Confronto tra le SRF ottenute dal Centro PMOD/WRC e dal Laboratorio di Arpa Piemonte. Sono riportate le SRF dei 3 radiometri ottenute dal Centro PMOD/WRC e dal laboratorio di Arpa Piemonte e il rapporto tra le stesse.



(a)



(b)

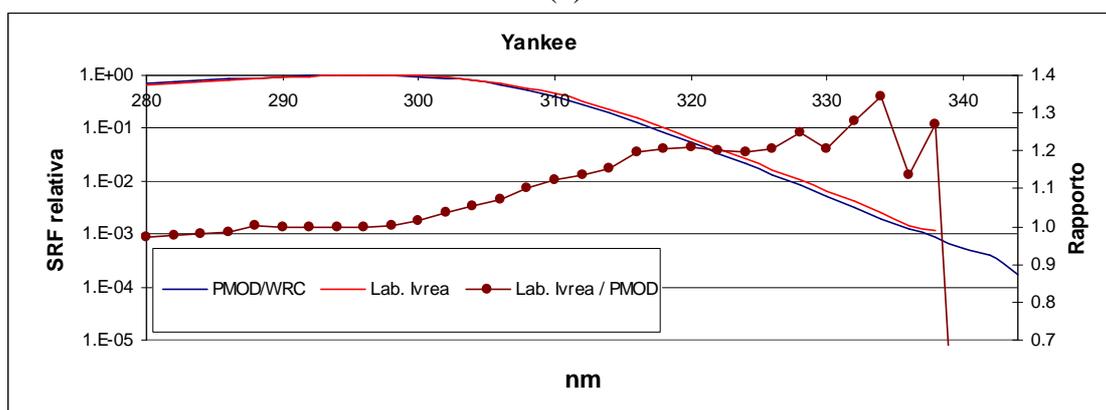
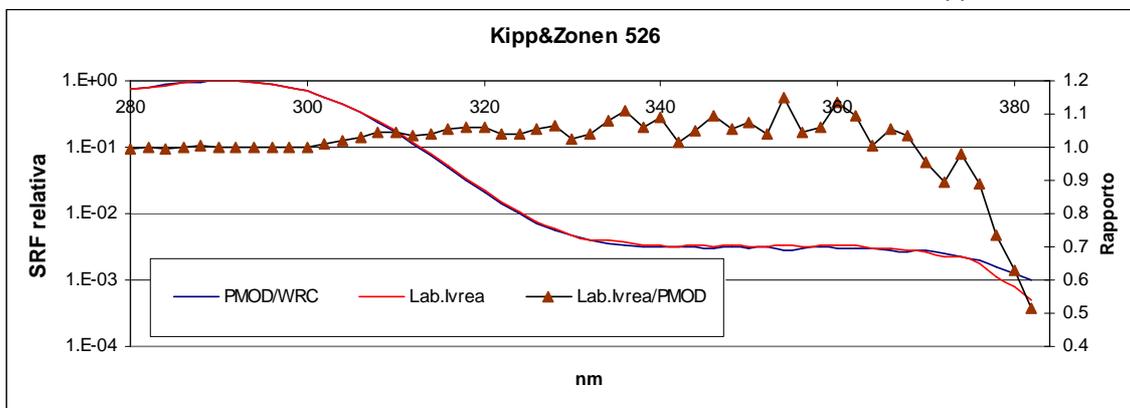
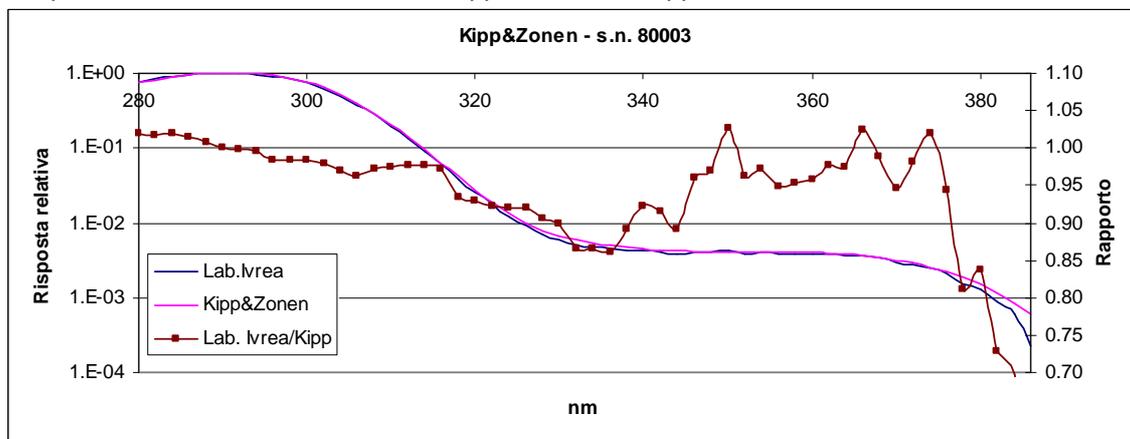


Figura 6 – Confronto tra la SRF ottenute dal PMOD/WRC e il Laboratorio di Arpa Piemonte dopo il riallineamento: Sono riportate le SRF del radiometro misurato dal laboratorio di Arpa Piemonte, dopo aver corretto il disallineamento, e dal Centro di riferimento PMOD/WRC e il rapporto tra le stesse.



In merito all'interconfronto effettuato con la curva fornita dal produttore Kipp&Zonen, in fig.7 sono riportati i risultati in termini del rapporto tra la SRF ottenuta dal Laboratorio di Arpa Piemonte e quella prodotta da Kipp&Zonen. Le differenze sono risultate sempre inferiori al 15% nell'intervallo spettrale 280-370 nm e sono riconducibili alla differente FWHM del segnale in uscita al monocromatore e all'incertezza sull'allineamento.

Figura 7 – Confronto tra la SRF ottenute dal Laboratorio di Arpa Piemonte e dal Laboratorio di Kipp&Zonen. Sono riportate le SRF del radiometro Kipp&Zonen 80003 misurata dal Laboratorio di Arpa Piemonte e dal Laboratorio di Kipp&Zonen e il rapporto tra le stesse.



Al fine di valutare quanto le differenze ottenute nella misura delle SRF influiscano sulla matrice di taratura e quindi sui valori di Indice UV misurati dai radiometri, si sono valutati i rapporti tra i coefficienti delle medesime ottenibili partendo dalle tarature del Laboratorio di Arpa Piemonte e dal quelle del Laboratorio PMOD/WRC e di Kipp&Zonen. Per la valutazione del rapporto tra i coefficienti di taratura assoluta si sono utilizzati gli spettri misurati da Arpa Valle d'Aosta ad Aosta dal 16/06/2011 al 27/06/2011, durante le operazioni di taratura dei radiometri. In tab.2 si riportano i valori minimi massimi e medi dei rapporti tra i coefficienti di taratura assoluta, tra i coefficienti della matrice correttiva e tra i coefficienti della matrice di taratura, ottenuti utilizzando le SRF misurate dal Laboratorio di Arpa Piemonte e dal Laboratorio di confronto, sulla base degli spettri solari misurati da Arpa Valle d'Aosta.

Tabella 2 – Confronto tra le matrici di taratura. Sono riportati i valori minimi, medi e massimi dei rapporti tra i valori del fattore di taratura assoluto (k), i coefficienti correttivi (C_{ij}) e i coefficienti della matrice di taratura (M_{ij})

Radiometro	$k_{\text{Lab.Arpa}}/k_{\text{Lab.confronto}}$			$C_{ij(\text{Lab.Arpa})}/C_{ij(\text{Lab.confronto})}$			$M_{ij(\text{Lab.Arpa})}/M_{ij(\text{Lab.confronto})}$		
	min	max	media	min	max	media	min	max	media
Kipp&Zonen s.n 526	1.02	1.04	1.025	0.96	0.98	0.97	0.98	1.015	0.99
Kipp&Zonen s.n.80003	0.95	0.97	0.97	1.04	1.07	1.05	0.99	1.04	1.02

Per entrambi i radiometri si ottengono delle differenze medie sui coefficienti della matrice di taratura entro il 2% con scarti non superiori al 5%, ad indicare il buon accordo tra le SRF ottenute ai fini delle operazioni di taratura. Le differenze tra le matrici sono significativamente minori rispetto a quelle ottenute tra le SRF. La riduzione è dovuta al fatto che lievi variazioni nella misura delle SRF non influiscono significativamente sui valori assunti dai coefficienti delle matrici, essendo tali variazioni molto minori rispetto alla differenza tra le SRF dei radiometri e lo spettro ad azione eritemale CIE.

CONCLUSIONI

L'impiego di radiometri a banda larga per la misura dell'Indice UV solare non può prescindere dalla conoscenza della loro SRF a fini di definirne la matrice di taratura. La rapida variazione della SRF in funzione della lunghezza d'onda rende la misura particolarmente complessa. L'elevato gradiente e la bassa sensibilità già per lunghezze d'onda superiori a 330 nm richiedono l'utilizzo di una strumentazione rigorosamente 'messa a punto'. L'accoppiamento lampada-monocromatore, l'allineamento e la slit function del monocromatore, la caratterizzazione del rumore di fondo del radiometro sono tutti parametri che influenzano l'esito della misura.

Le misure delle SRF di 4 radiometri (3 Kipp&Zonen UV-S-AE-T e uno Yankee UVB-1) sono state effettuate presso il Laboratorio di Arpa Piemonte e i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti per gli stessi radiometri dal Laboratorio PMOD/WRC di Davos e dal Laboratorio di Kipp&Zonen. Si sono ottenute differenze entro il 15% nell'intervallo spettrale compreso tra 280-370 nm per i radiometri Kipp&Zonen e nell'intervallo spettrale compreso tra 280-338 nm per il radiometro Yankee, nonostante le variazioni di 3 ordini di grandezza della SRF. Le differenze rientrano nell'incertezza sperimentale e sono riconducibili all'incertezza sull'allineamento e sulla tensione di fondo del radiometro e alla differente slit function. Per lunghezze d'onda maggiori le differenze risultano superiori a causa della bassa sensibilità del radiometro. Tali differenze comunque non influiscono significativamente sui valori assunti dalla matrice di taratura, come è stato evidenziato nel calcolo della matrice stessa, dove si sono registrati scarti non superiori al 5%.

Bibliografia

- Gröbner J, Schreder J, Kazadzis S, Bais AF, Blumthaler M, Gorts P, Tax R, Koskela T, Seckmeyer G, Webb AR, Rembges. *Traveling reference spectroradiometer for routine quality assurance of spectral solar ultraviolet irradiance measurements*. Applied Optics 2005
- Gröbner G, Hülsen G, Vuilleumier L, Blumthaler M, Vilaplana JM, Walker D, Gil JE. *Report of the PMOD/WRC-COST Calibration and intercomparison of erythemal radiometers*. 2006
- Hülsen G., Gröbner J, *Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance*. Applied Optics, 2007
- International Commission on Illumination (CIE). *Erythema reference action spectrum and standard erythema dose*. CIE S 007/E;1998.
- Schreder J, Gröbner J, Lox A, Blumthaler M. *Intercomparison of monochromatic source facilities for the determination of the relative spectral response of erythemal broadband filter radiometers*. Optics Letters 2004
- World Health Organization. *Global solar UV-Index. A practical guide*. Disponibile su http://www.unep.org/PDF/Solar_Index_Guide.pdf; 2002