



VI Convegno nazionale  
*Il Controllo degli Agenti fisici: ambiente, salute e qualità della vita*  
*Alessandria– 6-8 giugno 2016*

## **La taratura dei radiometri solari effettuata dal Laboratorio di Ottica di ARPA Piemonte:metodo e risultati**

*Stefania Saudino Fusette*  
ARPA Piemonte, Dipartimento Tematico Radiazioni



## Misure di radiazione UV solare a terra

Cosa vogliamo?



Il valore di irradianza  
solare UV in  $Wm^{-2}$

Chi garantisce che i W siano Watt e che i m siano metri?

Servono:

1. la riferibilità metrologica del risultato di misura al sistema internazionale di misura ovvero *il risultato di misura è posto in relazione ad un riferimento mediante una documentata catena ininterrotta di tarature.*
2. L'incertezza con il suo livello di confidenza



## Misura della radiazione solare UV con radiometri



### Sensibilità spettrale:

- UVB (280 - 315nm)
- UVA (315 - 400nm)
- Eritemale
- .....

La taratura di questi strumenti è fondamentale per convertire il segnale in uscita in V in  $W/m^2$  pesati rispetto allo spettro ad azione voluto. Ad esempio per convertire i Volt in Irradianza solare eritemale



Nel laboratorio di ottica di Arpa Piemonte si esegue la taratura dei radiometri UV solari.

**Per la procedura di taratura dei radiometri UV solari è stato richiesto l'accreditamento**



**L'accreditamento è garanzia di riferibilità metrologica**

**Cosa significa nella pratica riferibilità metrologica :**

- Una catena ininterrotta di misure di confronto a partire dal campione fino all'oggetto in taratura
- Incertezza di misura calcolata o stimata e dichiarata per ogni step della catena di riferibilità
- Procedure scritte da seguire per ogni step della catena di riferibilità
- Prova di competenza del laboratorio: il laboratorio tramite confronti deve dare evidenza delle competenze tecniche



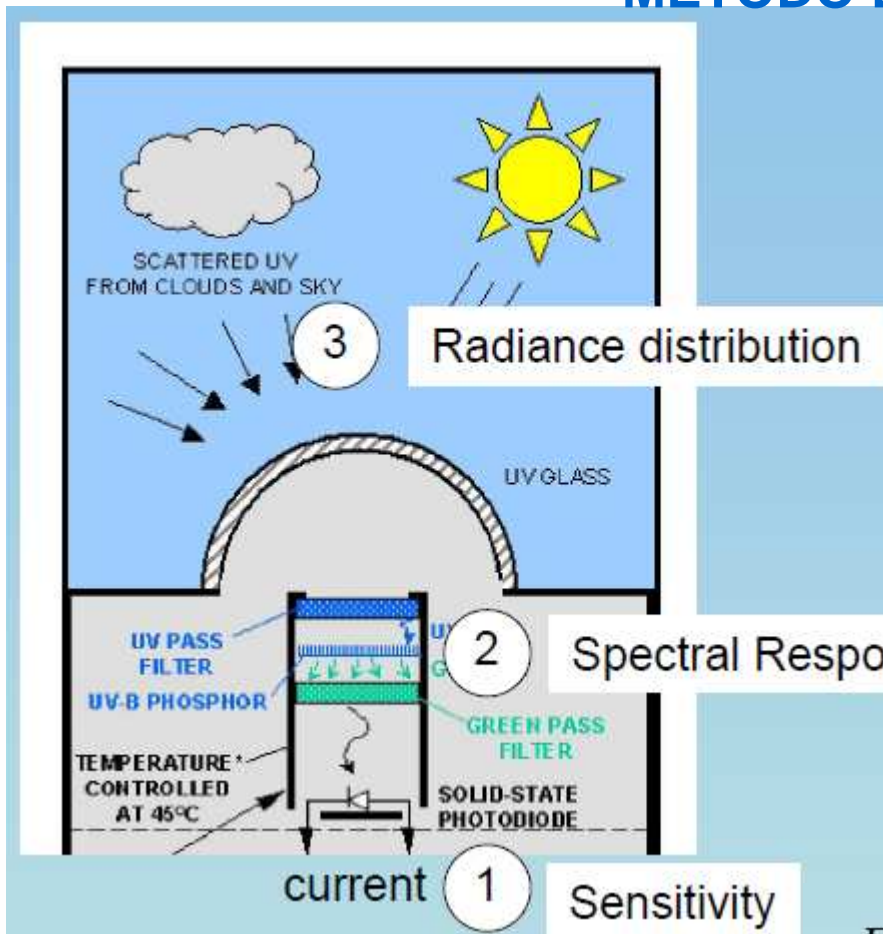
Scopo di questo lavoro è presentare i risultati del confronto sui risultati della taratura di un radiometro solare Kipp & Zonen UVS-AE-T eseguita dal nostro laboratorio e dal PMOD-WRC di Davos attuale riferimento per queste tarature



1. Introduzione sul metodo di taratura
2. Confronto sulla caratterizzazione della risposta in lunghezza d'onda
3. Confronto sulla caratterizzazione della risposta angolare
4. Confronto sulle matrici di taratura



## METODO DI TARATURA



La taratura dei radiometri UVE per la misura della radiazione solare (radiometri UVE solari) richiede la determinazione di una matrice di coefficienti che dipendono dai due parametri ambientali: angolo solare zenitale,  $\theta$ , e ozono colonnare,  $O_3$

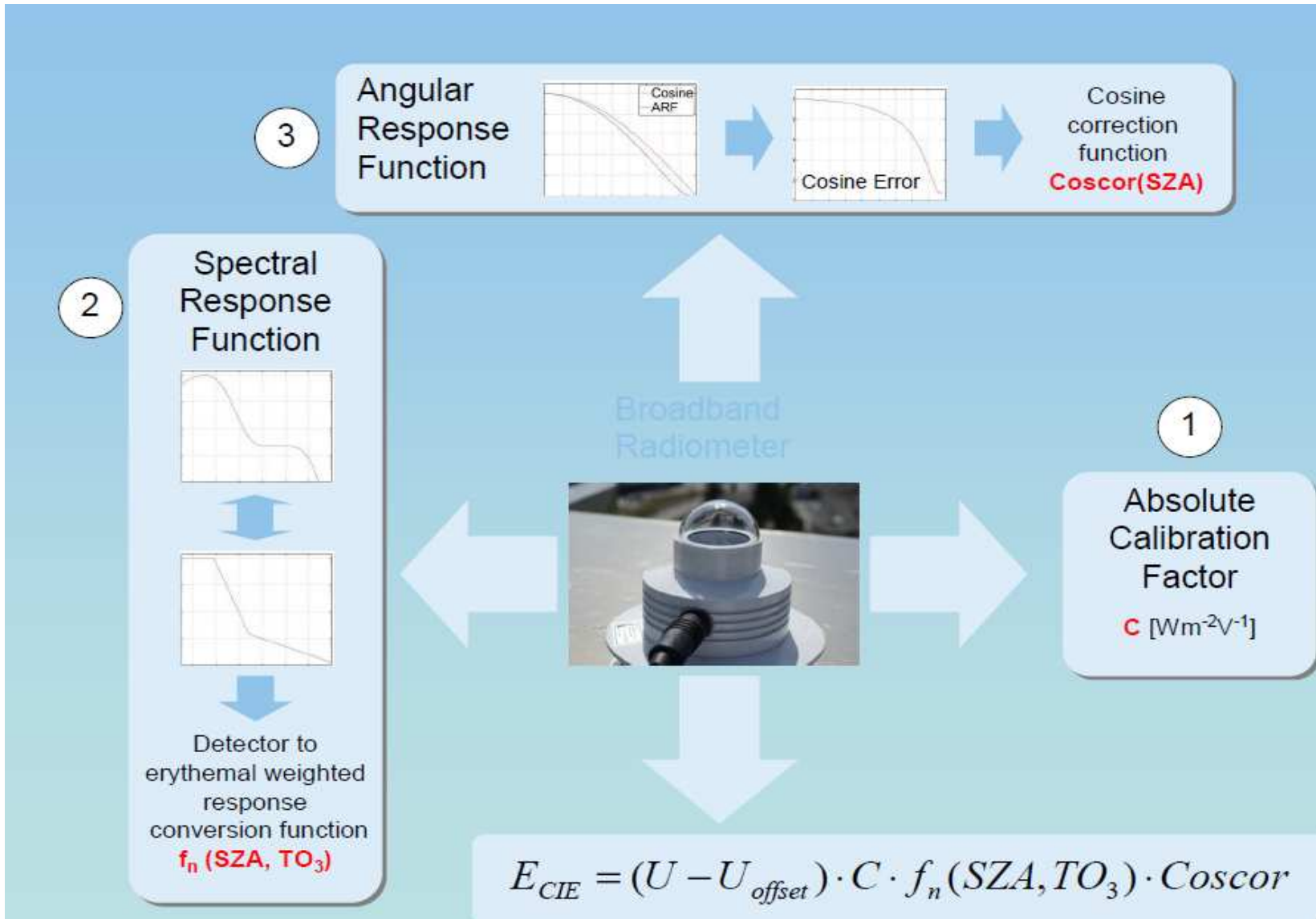
Il metodo di taratura è basato sulla seguente equazione

$$E_{CIE} = (U - U_{offset}) \cdot C \cdot f_n(SZA, TO_3) \cdot C_{oscor}$$

↑  
 1

↑  
 2

↑  
 3





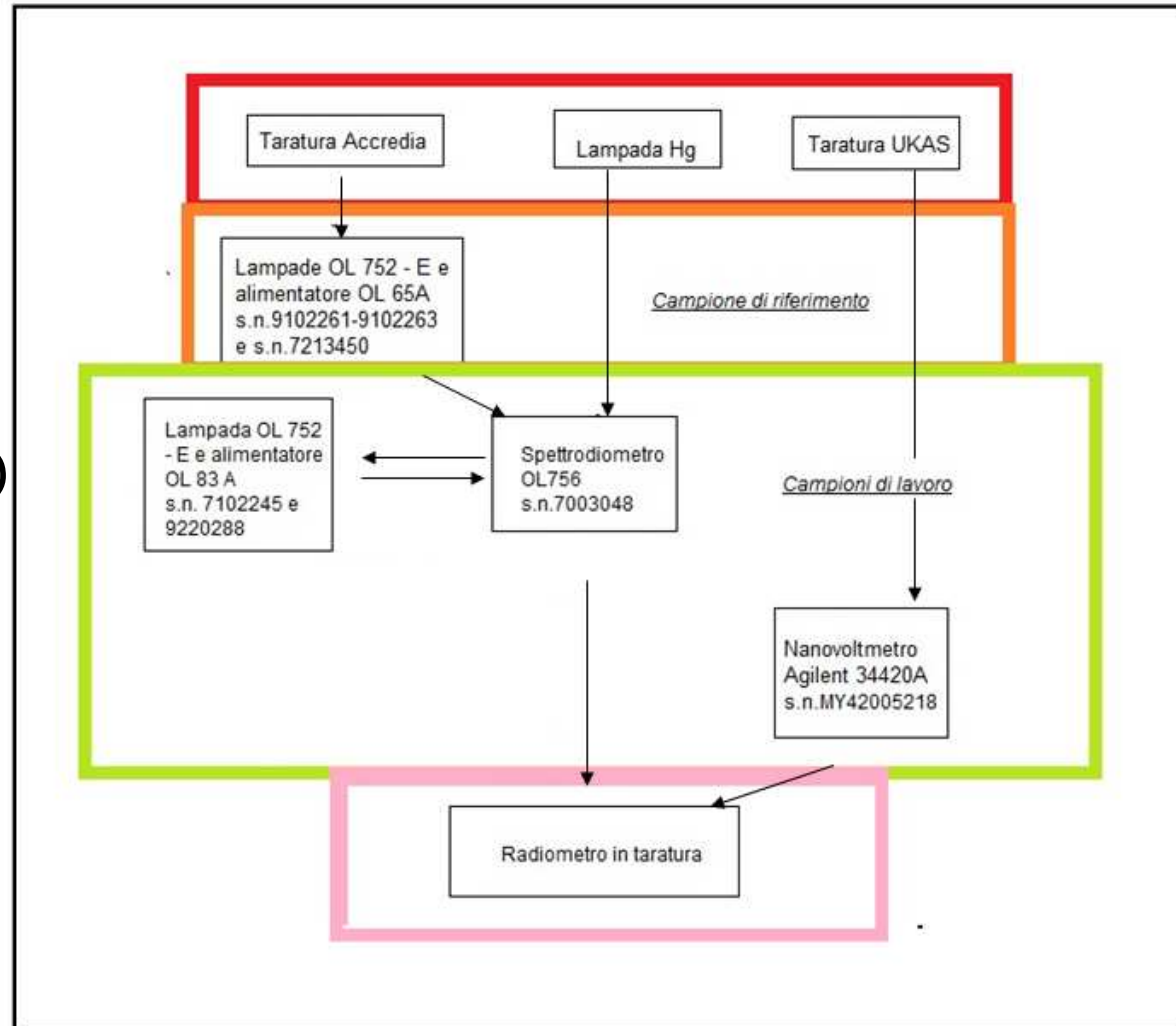
Il coefficiente di taratura assoluto  $C$  corrisponde al rapporto tra l'irradianza solare misurata con lo spettroradiometro di riferimento ponderata per la risposta spettrale normalizzata al valore massimo del radiometro in taratura ( $E_D$ ) e il segnale elettrico rilevato dal radiometro,  $U$  a cui viene sottratto il fondo.

$$C_i = \frac{E_D}{U_D - U_{offset}}$$

dove

$$E_D = \sum E(\lambda) \times SRF_n(\lambda)$$

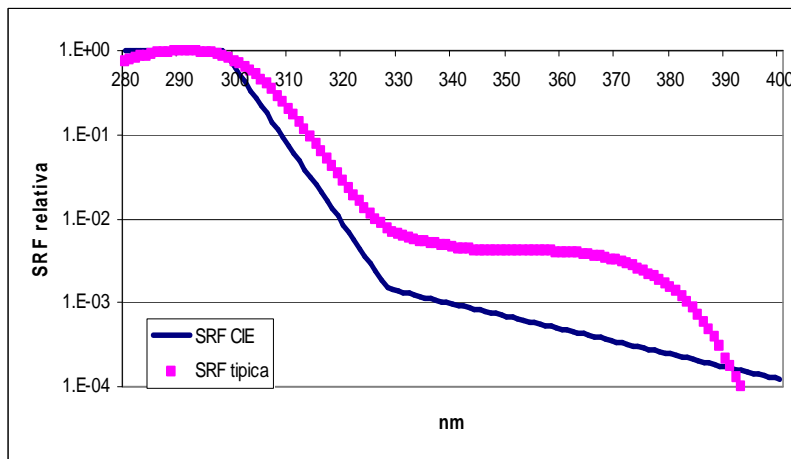
Dove  $SRF_n(\lambda)$  è la risposta spettrale del radiometro in taratura





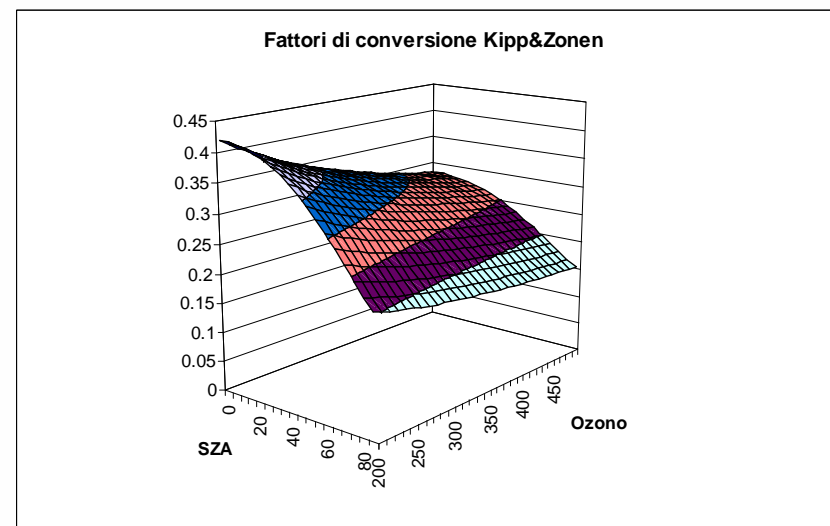
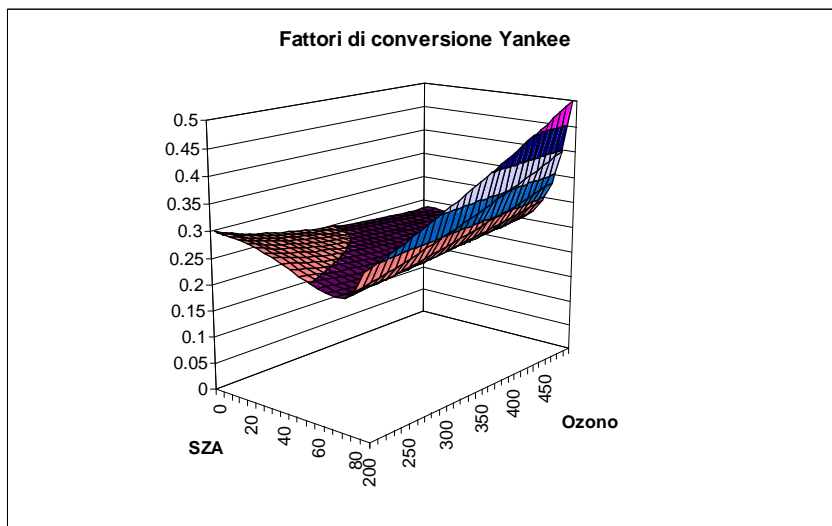


La curva di risposta dei radiometri,  $SRF(\lambda)$ , non coincide esattamente con la curva eritemale,  $CIE(\lambda)$ . Questo comporta un errore che dipende dalla forma dello spettro solare. Essendo tale forma variabile anche l'errore risulta variabile. I due parametri che maggiormente influenzano la forma dello spettro sono l'angolo zenitale ( $\theta$ ) e dall'ozono colonnare ( $O_3$ ). Per questo si calcola una matrice di fattori correttivi  $f$  in funzione di questi 2 parametri.



$$f_{SZA, O_3} = \frac{\sum_{290}^{400} S_{SZA, O_3}(\lambda) \times CIE(\lambda)}{\sum_{290}^{400} S_{SZA, O_3}(\lambda) \times SRF_n(\lambda)}$$

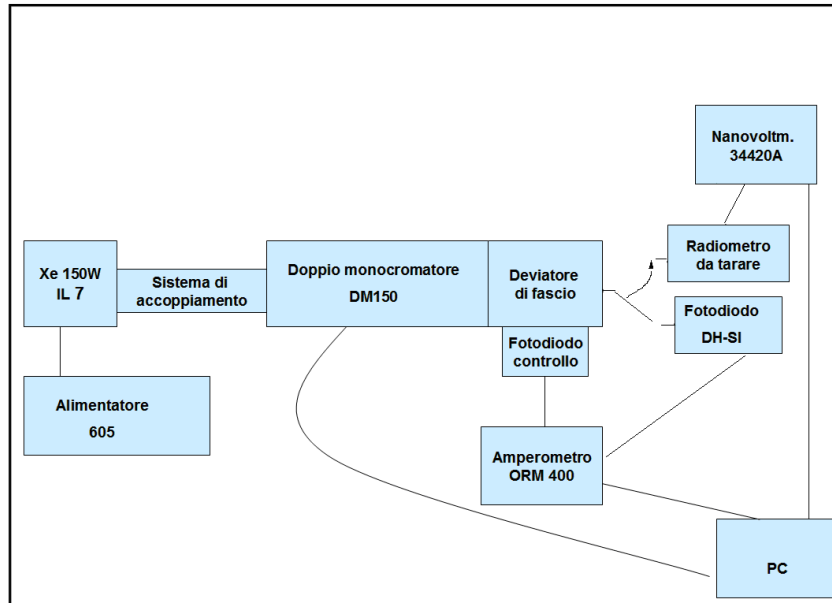
Dove  $S_{O_3, SZA}$  sono gli spettri solari teorici al suolo da 290 a 400 nm a passo di 1 nm, per i diversi valori di angolo zenitale (da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  a passo di  $5^\circ$ ) e ozono colonnare (da 200 DU a 480 DU a passo di 20 DU) per i quali si vuole determinare la matrice di taratura.





# MISURA DELLA RISPOSTA SPETTRALE (SRF)

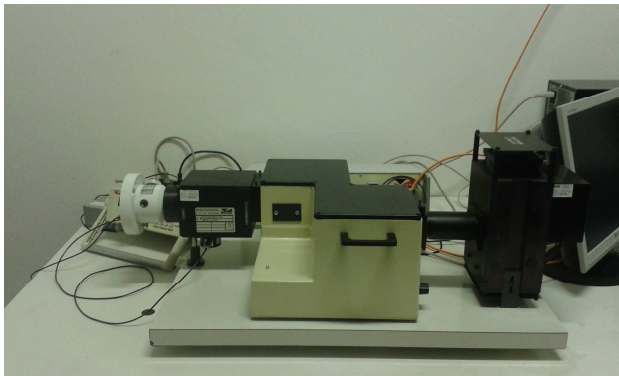
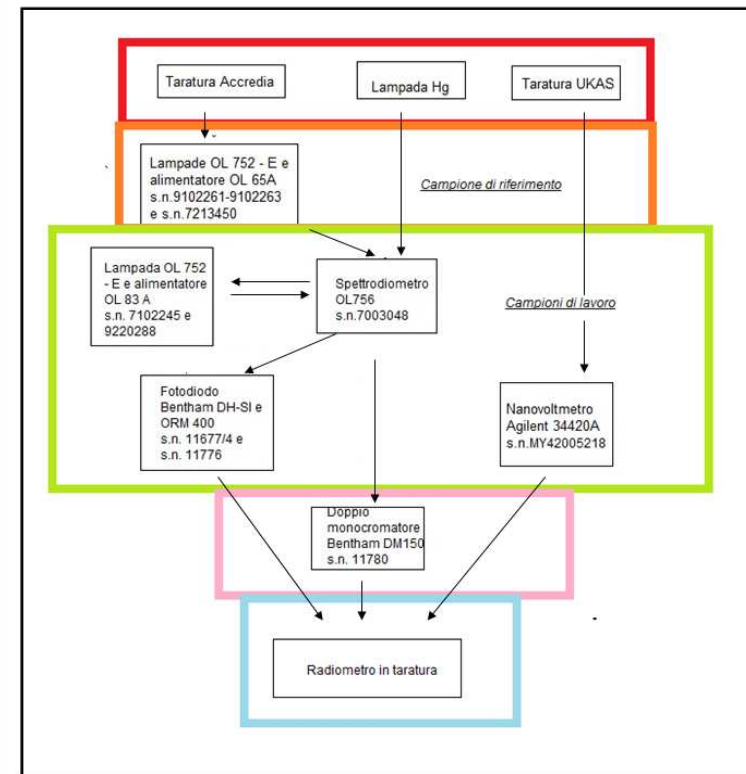
## Sistema sperimentale



$$SRF(\lambda) = \frac{U(\lambda) - U_{offset}}{P(\lambda)}$$

Normalizzata al valore massimo

## Schema riferibilità

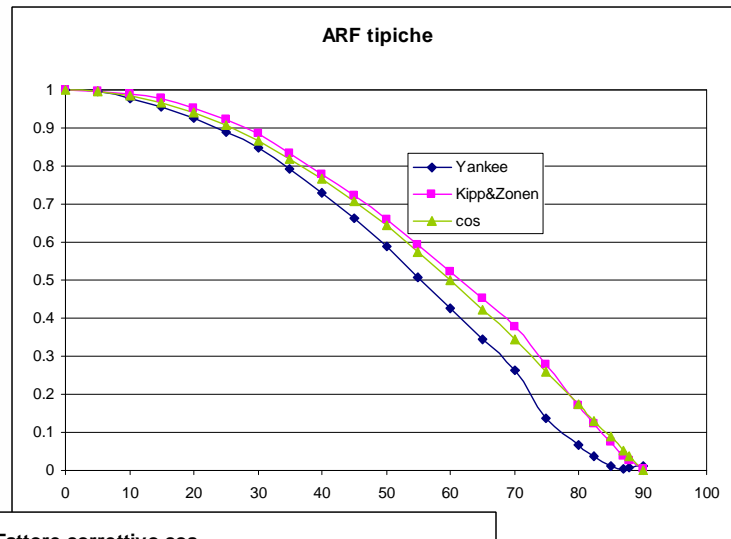




La non perfetta corrispondenza tra la risposta angolare del radiometro (ARF) ed il coseno introduce un errore nella misura che varia al variare delle condizioni geometriche della radiazione incidente



Conoscendo la ARF del radiometro si determina il fattore correttivo  $\alpha(\theta)$



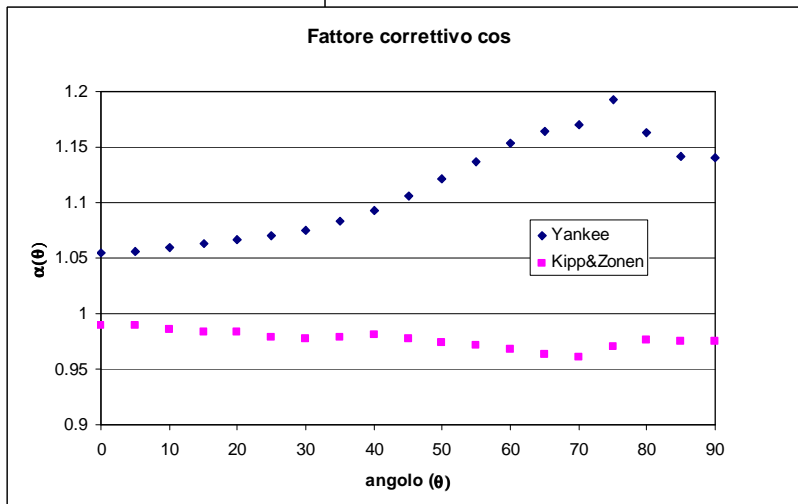
$$\alpha(\theta) = \frac{1}{f_{dir}(\theta) \times P_{dir}(\theta) + f_{diff} \times P_{diff}(\theta)}$$

dove

$$f_{dir}(\theta) = \frac{ARF(\theta)}{\cos(\theta)}$$

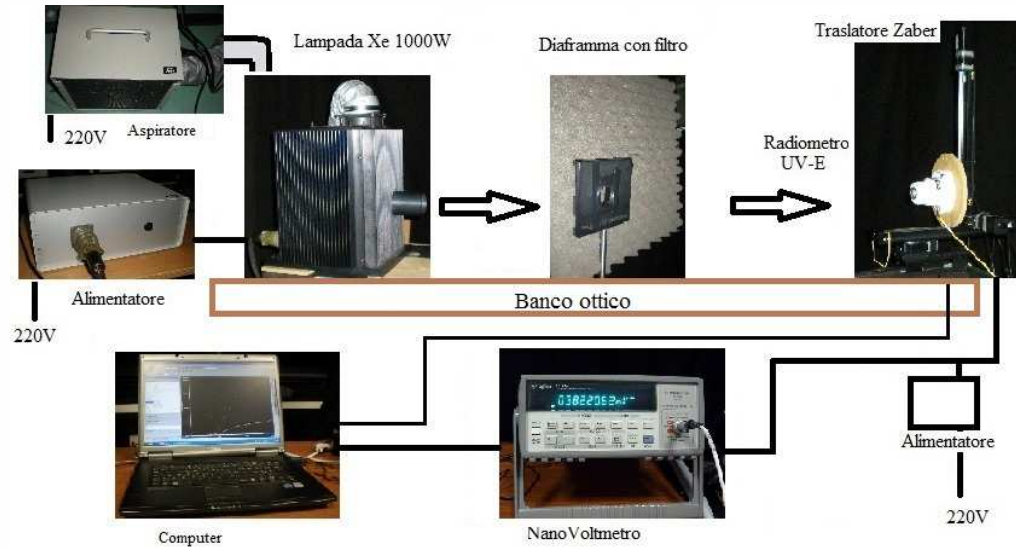
$$f_{diff} = 2 \times \sum_0^{90} ARF(\theta) \times \sin(\theta) \Delta\theta$$

avendo indicato con  $P_{dir}(\theta)$  la percentuale di radiazione diretta e  $P_{diff}(\theta)$  la percentuale di radiazione diffusa, percentuali desumibili dai dati in uscita al Libratran





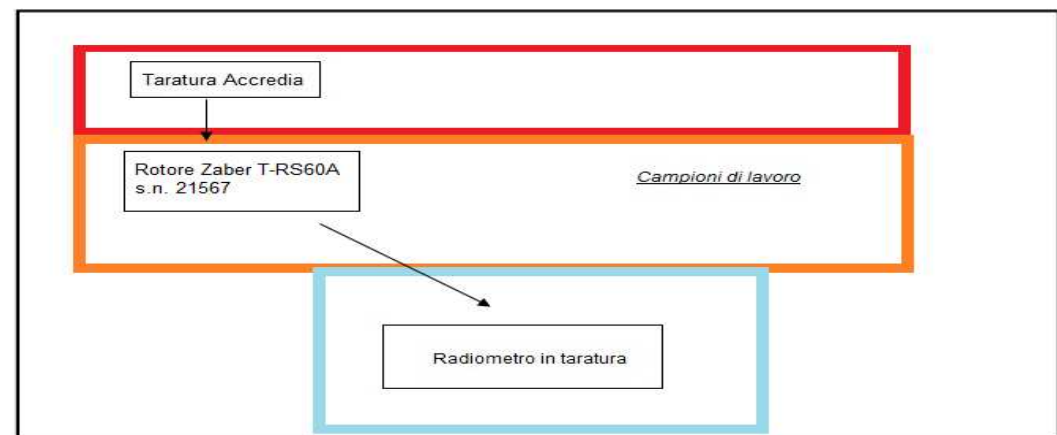
## Sistema sperimentale



$$ARF(\theta) = \frac{\overline{U(\theta)}}{\overline{U(0^\circ)}}$$

- Caratterizzata su 2 assi Nord-Sud ed Est-Ovest
- Disuniformità del campo in un cubo di spigolo 20mm entro il 3%

## Schema riferibilità





**Per garantire la competenza del laboratorio di ottica dell'ARPA Piemonte nell'eseguire le tarature dei radiometri UV solari è stato eseguito un confronto con il centro di riferimento PMOD-WRC di Davos sulla taratura di un radiometro solare kipp&Zonen UV-S-AE-T relativamente ai canali UVE ed UVA**

**Sono state confrontate separatamente :**

**-Le SRF**

**-Le ARF**

**-Le matrici dei coefficienti di taratura**

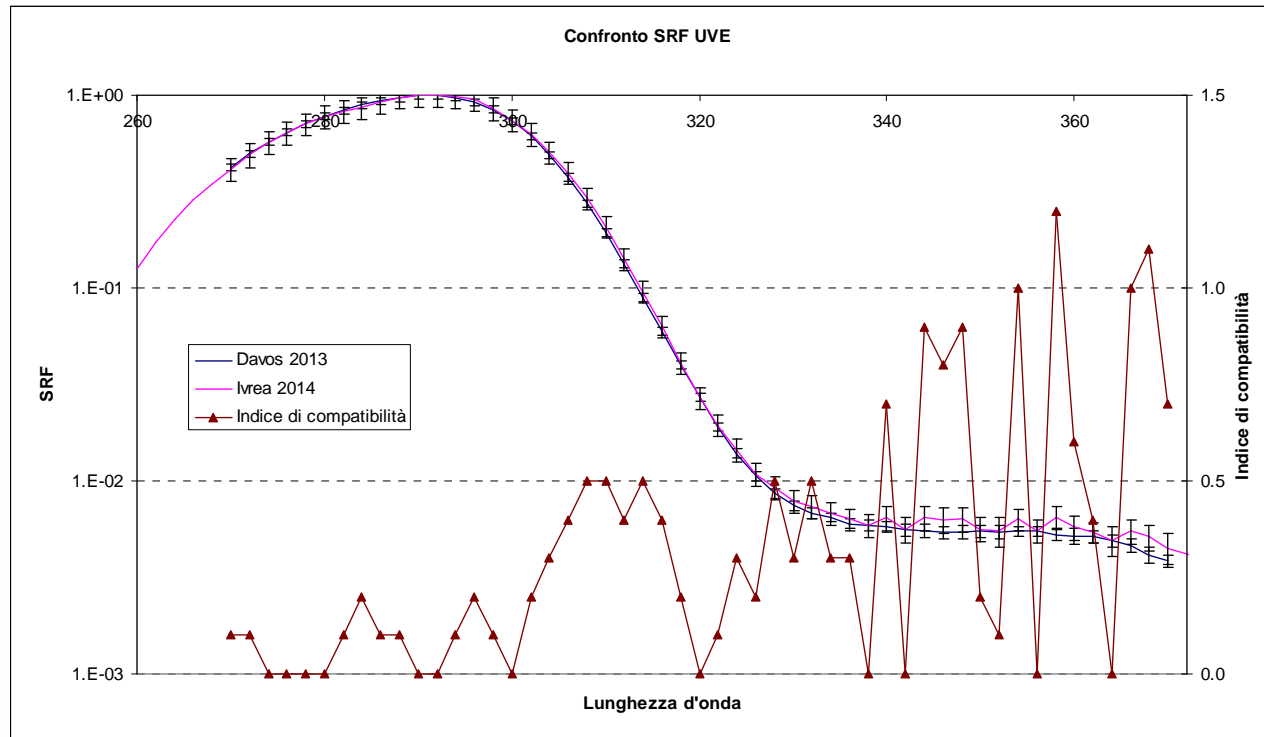
**Il confronto è stato effettuato calcolando l'indice di compatibilità IC**

$$IC_{SRF,ARF,K} = \left| \frac{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Davos}} - SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Ivrea}}}{\sqrt{U_{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Davos}}}^2 + U_{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Ivrea}}}^2}} \right| \leq 1$$



## SRF UVE

Si riportano nel grafico seguente le SRF, in scala logaritmica, ottenute dai due laboratori e l'indice di compatibilità valutato, a passo di 2 nm, nell'intervallo spettrale comune ai due laboratori (270-370 nm).

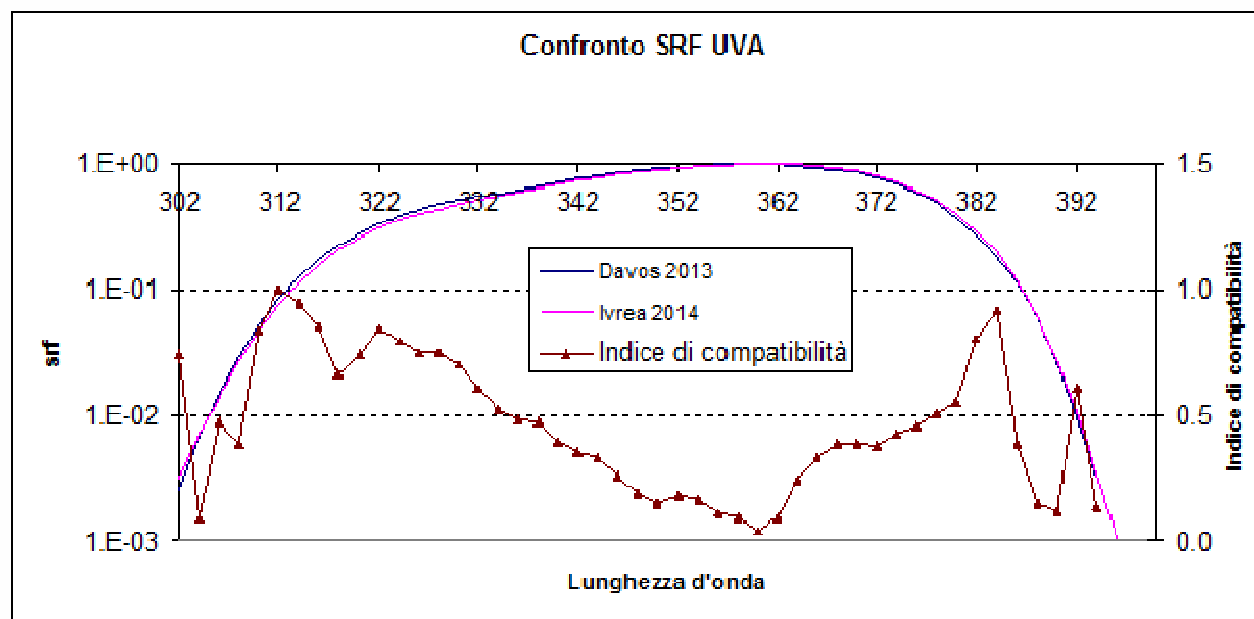


L'indice di compatibilità IC è sempre inferiore ad 1 ad eccezione di 2 punti situati all'estremo superiore dell'intervallo spettrale, caratterizzati da una SRF molto bassa del radiometro in taratura (ridotta di circa 3 ordini di grandezza rispetto alla massima risposta spettrale).



## SRF UVA

Si riportano nel grafico seguente le SRF, in scala logaritmica, ottenute dai due laboratori e l'indice di compatibilità valutato, a passo di 2 nm, nell'intervallo spettrale comune ai due laboratori (302-394 nm).

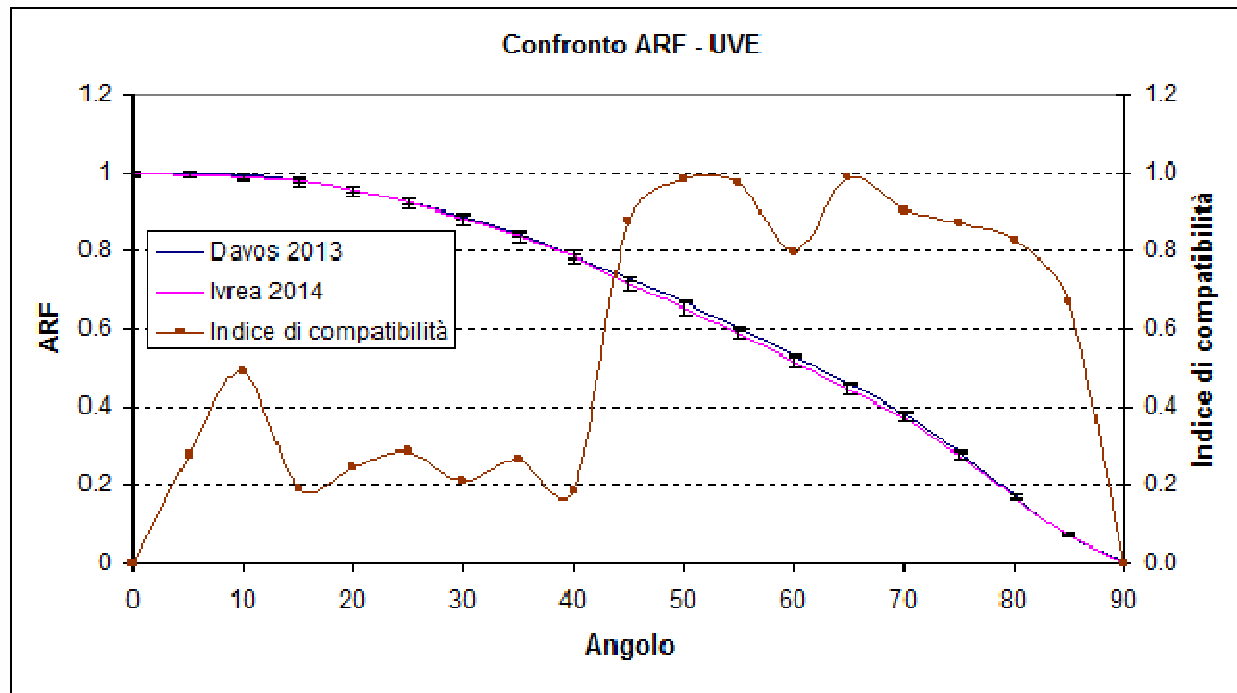


L'indice di compatibilità IC è sempre inferiore ad 1



## ARF UVE

Si riportano nel grafico sottostante, le ARF ottenute dai due laboratori e l'indice di compatibilità valutato per ogni angolo compreso tra 0° e 90° a passo di 5°.



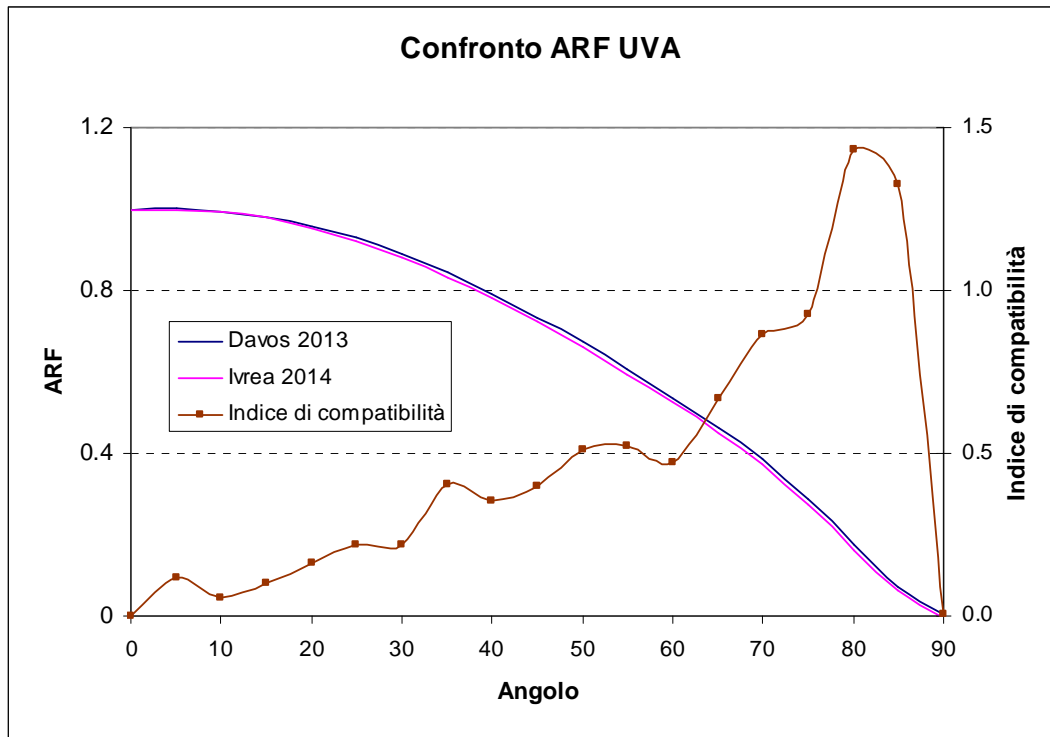
L'indice di compatibilità IC è sempre inferiore ad 1





## ARF UVA

Si riportano nel grafico sottostante, le ARF ottenute dai due laboratori e l'indice di compatibilità valutato per ogni angolo compreso tra 0° e 90° a passo di 5°.



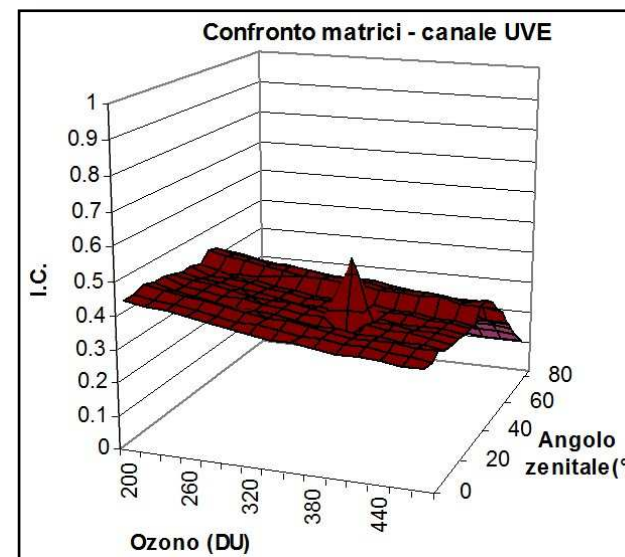
L'indice di compatibilità IC è superiore ad 1 per angoli superiori ad 80°, poco significativi dal punto di vista dell'esposizione



## MATRICE UVE

Nella tabella e seguente è riportato l'indice di compatibilità, in forma matriciale, tra le matrici di taratura calcolate da due laboratori

		OZONO COLONNARE (dU)														
		200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480
ANGOLO ZENITALE (°)	0	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38	0.37	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35
	5	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.35
	10	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36
	15	0.45	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34
	20	0.45	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38	0.32	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34
	25	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.54	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34
	30	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.35	0.34	0.34	0.34	0.33
	35	0.43	0.41	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33
	40	0.42	0.41	0.39	0.39	0.38	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32
	45	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.38	0.37	0.38	0.36	0.36
	50	0.44	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.35	0.36
	55	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34
	60	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30
	65	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27
	70	0.31	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22
	75	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18
80	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	
85	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	



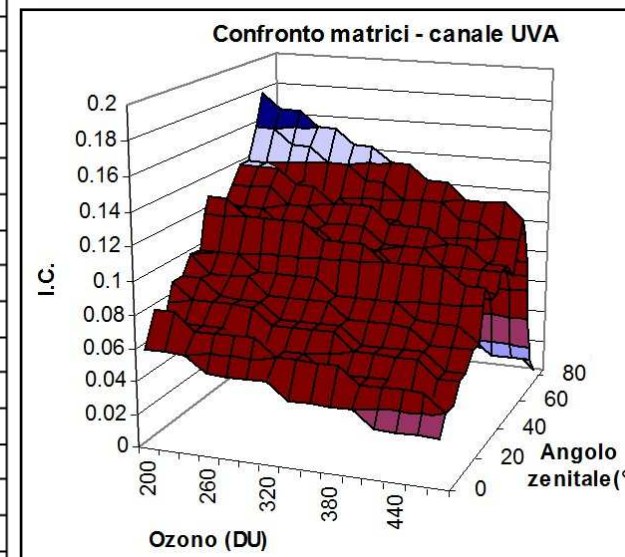
L'indice di compatibilità IC è sempre inferiore ad 1



## MATRICE UVA

Nella tabella e seguente è riportato l'indice di compatibilità, in forma matriciale, tra le matrici di taratura calcolate da due laboratori

		OZONO COLONNARE (dU)														
		200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480
ANGOLO ZENITALE (°)	0	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
	5	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
	10	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
	15	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
	20	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
	25	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
	30	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06
	35	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09
	40	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
	45	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
	50	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
	55	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09
	60	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08
	65	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
	70	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11
	75	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07
80	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	
85	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	



L'indice di compatibilità IC è sempre inferiore ad 1



Grandezza	Strumento in taratura		Campo di misura	Condizione di misura	Incertezza	
Irradiamento	Radiometri UVA Solari <sup>(0)</sup>	Risposta spettrale <sup>(1)</sup>	$10^{-4} - 1$	260-400 nm	260 – 349 nm	10%
					350-400 nm	8%
		Risposta angolare <sup>(2)</sup>	$10^{-2} - 1$	0-90°	2,8%	
	Matrice	$0-50 \text{ W/m}^2$ <sup>(3)</sup>	SZA 23°-75° <sup>(5)</sup> Ozono colonnare 200 – 480 DU	12%		
	Risposta spettrale <sup>(1)</sup>			$10^{-4} - 1$	260-400 nm	260-299 nm
	Radiometri UVE Solari <sup>(0)</sup>	Risposta angolare <sup>(2)</sup>	$10^{-2} - 1$			0-90°
Matrice		$0-0.25 \text{ W/m}^2$ <sup>(4)</sup>	SZA 23°-75° <sup>(5)</sup> Ozono colonnare 200 – 480 DU	13%		
Irradiamento spettrale	Radiometri UVA		$1-5 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$	365 nm <sup>(6)</sup>	9%	

- (0) il diametro massimo dell'area sensibile dei radiometri tarabili è pari a 4 cm
- (1) risposta spettrale normalizzata al valore massimo
- (2) risposta angolare normalizzata a 0°
- (3) massimo intervallo di valori di irradianza UVA utilizzato per la misura del coefficiente di taratura assoluto del radiometro, in funzione del periodo dell'anno in cui viene effettuata la taratura.
- (4) massimo intervallo di valori di irradianza UVE utilizzato per la misura del coefficiente di taratura assoluto del radiometro, in funzione del periodo dell'anno in cui viene effettuata la taratura.
- (5) Le tarature vengono eseguite a partire dal 1 marzo al 30 settembre
- (6) taratura effettuata con un fascio di radiazione centrato a 365 nm avente FWHM 16 nm.