

STIMA DELLA RADIAZIONE SOLARE ULTRAVIOLETTA PER MEZZO DI UN MODELLO NEURALE

ULTRAVIOLET SOLAR RADIATION BY NEURAL NETWORK

Fabrizio Benincasa¹, Matteo De Vincenzi^{1*}, Alessandro Materassi²

¹ CNR-IBIMET (Istituto di Biometeorologia) Sede di Sassari traversa la Crucca 3, Località Baldinca, 07100 Li Punti Sassari

² CNR-IBIMET (Istituto di Biometeorologia) Laboratorio di Eletttronica, via di Brozzi 164b, 50145 Firenze

* Corresponding author tel. 079 2841508-1, fax 0792841598 email m.devincenzi@ibimet.cnr.it

Riassunto

Negli ultimi anni l'aumento della radiazione ultravioletta (UV), che raggiunge la superficie terrestre, ha portato molti autori a effettuare studi sugli effetti biologici che tale fenomeno comporta sugli ecosistemi e sugli esseri umani. In particolare, per la salvaguardia della salute dei lavoratori all'aperto, è di basilare importanza avere una stima della radiazione UV al fine di poter stabilire i tempi di massima esposizione. Sebbene l'importanza di questo problema sia rilevante, la radiazione UV non è quasi mai misurata nelle stazioni meteorologiche standard.

Lo scopo di questa ricerca è stato quello di progettare e realizzare un modello neurale per la stima della radiazione UV, a partire dai valori delle grandezze meteorologiche più comunemente misurate, in siti sprovvisti di sensori per la misura diretta di questa grandezza.

Uno degli obiettivi del lavoro è anche quello di stimare l'UV col minimo numero dei sensori; ciò allo scopo di ottenere un sistema di misura di costo decisamente inferiore al costo di un sensore per la misura diretta dell'UV. L'analisi condotta ci ha portato a considerare per la stima dell'UV due grandezze misurate (radiazione solare globale e temperatura dell'aria) e due grandezze calcolate (radiazione solare teorica e altezza del Sole sull'orizzonte). Il basso costo dei due soli sensori utilizzati, di norma complessivamente inferiore al costo di un sensore per l'UV, rendono il sistema proposto utile per realizzare più punti di misura a costo contenuto.

I risultati ottenuti nei siti sperimentali hanno evidenziato che il modello ha buone capacità di stima della radiazione ultravioletta. Nel periodo dell'anno di maggiore interesse (primavera-estate), la precisione statistica degli scostamenti fra valori di UV calcolati dal modello e valori misurati dagli strumenti (normalizzati al valore massimo misurato) è migliore dello 0.2 %. Per questo motivo il modello neurale proposto può essere utilizzato efficacemente come alternativa ad altri modelli, ugualmente a "basso costo", laddove questi non diano risultati soddisfacenti.

Parole chiave: Reti neurali, modelli, flussi radiativi.

Abstract

In the last years the increase of ultraviolet (UV) radiation, that reaches the earth surface, has induced many authors to bring studies on the biological effects that this phenomenon can have on ecosystems and on human beings. In particular, for safeguard health of outdoor workers, an estimate of UV radiation has basic importance to establish maximum time of exposure. Although this problem is important, UV radiation is almost never measured in standard weather stations.

The aim of present research has been to plan and to develop a neural model able to estimate UV radiation using meteorological data available in standard weather stations without apposite UV sensors.

An objective of this work is, also, to estimate the UV with a minimum number of sensors. This allows to obtain a measurement system with markedly inferior cost with respect to a sensor for a direct measure of the UV. Our analysis brought us to consider, for UV estimation, two measured quantities (global solar radiation and air temperature) and two calculated quantities (theoretical solar radiation and solar elevation from horizon). The low cost of the only two used sensors, normally on the whole inferior to a UV sensor, makes the proposed system useful to carry out various measure points with reasonable costs.

The obtained results in the experimental sites have shown that the neural model provides good capacity to estimate UV radiation. In the period of higher interest (spring-summer), the statistical precision of the difference between calculated values of UV (by the model) and measured values (by the instruments), normalized to the maximum measured value, is better than 0.2 %. For this reason the proposed neural model can be effectively utilised as an alternative for the models, alike "low cost", where these do not give satisfactory results.

Keywords: Neural networks, models, radiative fluxes.

Introduzione

Negli ultimi venticinque anni sono state effettuate molte ricerche sulla diminuzione dell'ozono nella stratosfera ed è ormai dimostrato che tale riduzione provoca l'aumento della radiazione ultravioletta (UV), che raggiunge la superficie terrestre. In questo periodo si sono intensificati

gli studi sugli effetti biologici prodotti dai raggi UV sugli ecosistemi e sugli esseri umani.

A fronte di un problema così importante, si osserva che la radiazione ultravioletta, rilevata in stazioni meteorologiche che costituiscono una rete internazionale per la misura dell'UV, è raramente misurata nelle stazioni meteo-

rologiche standard [WMO n.8, WMO n.134, WMO n.544] e praticamente mai laddove vi sono attività lavorative o ricreative all'aperto. Scopo della ricerca è quello di definire un modello matematico in grado di stimare l'intensità della radiazione UV, a partire dalla misura di un numero minimo di grandezze comunemente rilevate nelle stazioni meteorologiche, e comunque facilmente misurabili anche al di fuori di queste.

L'indagine bibliografica, propedeutica a questo lavoro, ha chiarito che la pelle umana è sensibile alla radiazione solare ultravioletta che va da 250 nm a 400 nm, ma solo le gamme 280 ÷ 315 nm (UV B) e 315 ÷ 400 nm (UV A) hanno al suolo una intensità significativa. In particolare nella gamma dell'UV B solare si ha l'85 % degli eritemi da UV; mentre esponendosi alla sola gamma UV A, di intensità pari a quella solare, non si hanno eritemi, a meno che la persona non sia affetta da un'eccessiva fotosensibilità [WMO n.8; Diffey *et al.*, 1998; Diffey, 2002] e in ogni caso gli eritemi da UV A non superano il 10 % degli eritemi da UV [Long *et al.*, 1995; Parisi *et al.*, 2006; Vecchia *et al.*, 2007].

La Fig. 1 [McKinlay *et al.*, 1987] mostra (ordinata di destra e curva a tratto marcato) il peso standard, delle diverse lunghezze d'onda, sull'effetto eritemale della radiazione UV, adottato dalla *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE, 1998) per rappresentare la risposta media della pelle alla radiazione UV nelle gamme A e B. Nella stessa figura, ordinata di sinistra e curva a tratto sottile, è riportata l'irradianza solare al suolo nella gamma 290 ÷ 400 nm al solstizio d'estate a 40° N al mezzogiorno solare con una colonna di ozono¹ di 3 mm.

In Fig. 2 si mostra il prodotto spettrale delle due funzioni tracciate in Fig. 1. La curva ottenuta evidenzia l'intensità dell'effetto eritemale della radiazione solare nella gamma 290 ÷ 400 nm. Si nota subito che per lunghezze d'onda superiori a 320 nm l'effetto eritemale si riduce drasticamente; ovvero la gamma da indagare con maggiore attenzione è quella dell'UV B [WMO n.8]. La Fig. 2 mostra un picco su 308 nm che è fortemente sensibile al tasso di ozono: cresce (diminuisce) al diminuire (al crescere) di questo gas.

Materiali e metodi

Al fine di avere situazioni meteorologiche differenziate, lo studio è stato condotto utilizzando i dati di quattro stazioni meteorologiche standard [WMO n.8, WMO n.134, WMO n.544]:

- **Stazione meteorologica isola dell'Asinara:** lat. 40° 59' 17" N; long. 8° 14' 23" E; fra gli altri sensori standard, fin dal 2005, è dotata di radiometri per la misura dell'UV (radiometri EKO Instruments: MS212A per l'UV A e MS212W per l'UV B)².
- **Stazione meteorologica di Capo Caccia:** lat. 40° 36' 19" N; long. 08° 09' 07" E.
- **Stazione meteorologica IBIMET Sede di Sassari:** lat. 40° 43' 53" N; long. 8° 31' 08" E.

¹ È lo spessore di ozono che si avrebbe se, eliminati tutti gli altri gas, l'ozono fosse compresso fino alla pressione di 1 bar, alla temperatura di 0 °C. In letteratura si trova più usualmente espresso in unità dobson (1 mm ≡ 100 DU).

² La citazione della ditta e del modello non vogliono suggerire nessuna preferenza per questi strumenti, rispetto ad altri, da parte degli autori.

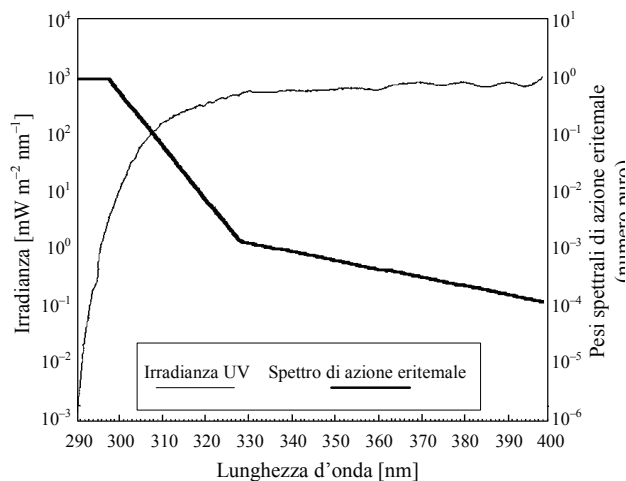


Fig. 1 – Linea marcata, ordinata di destra, peso standard delle diverse lunghezze d'onda sull'effetto eritemale della radiazione UV. Linea sottile, ordinata di sinistra, irradianza al suolo, al solstizio d'estate a 40° N, al mezzogiorno solare, con una colonna di ozono di 3 mm [da McKinlay *et al.*, 1987].

Fig. 1 – Bold line, with ordinate on the right: standard weight, of the various wavelengths, on the erythemal action spectrum of UV radiation; fine line, with ordinate on the left: irradiation at the ground at summer solstice at 40° N latitude at solar noon with an ozone column of 3 mm [from McKinlay *et al.*, 1987].

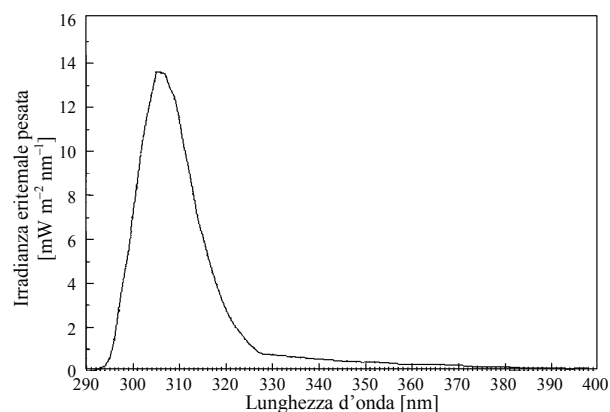


Fig. 2 – Prodotto fra la curva delle irradianze spettrali e quella dell'effetto eritemale. Il grafico mostra un picco su 308 nm. L'effetto eritemale si riduce fortemente per lunghezze d'onda superiori a 320 nm.

Fig. 2 – Product of the spectral irradiances and the erythemal action spectrum is plotted. Note that the peak occurs close to 308 nm. The erythemal action spectrum greatly reduces with wavelengths above 320 nm.

- **Stazione meteorologica IBIMET Sede di Firenze:** lat. 43° 47' 40" N; long. 11° 10' 38" E.

Nel gennaio 2008, per la finalità dello studio, i sensori di radiazione ultravioletta sono stati installati anche nelle tre stazioni meteorologiche che ne erano sprovviste (radiometri Delta Ohm: LPUVA02 per l'UV A e LPUVB02 per l'UV B)². Da febbraio a novembre 2008 i dati della radiazione ultravioletta e degli altri parametri meteorolo-

gici sono stati acquisiti, in continuo, nei quattro siti sperimentali.

Attività propedeutica

In attesa dell'installazione dei radiometri UV nelle stazioni che ne erano sprovviste, si è iniziato ad analizzare i dati della stazione dell'Asinara alla luce dei modelli esistenti.

a) Modellistica esistente

A fronte di un problema così importante, la scarsità di modelli matematici esistenti indica la difficoltà di ottenere una misura analitica indiretta della radiazione UV. Considerando i lavori prodotti negli ultimi dieci anni, si trovano essenzialmente modelli ottenuti tramite due procedure di studio:

- Valutazione della radiazione UV al suolo, in assenza di atmosfera, e successiva correzione dei valori tenendo conto di questa, o tramite modelli semi-empirici o tramite modelli spettrali [Foyo-Moreno et al., 1998; Murillo et al., 2003].
- Correlazione fra radiazione UV e radiazione solare globale al suolo, in questo caso si considera l'effetto dell'atmosfera uguale per entrambe le grandezze [Kudish et al., 2000].

Nel primo caso si ha la necessità di calcolare analiticamente l'irradianza solare extraterrestre, nella gamma di interesse, e poi correggerla in relazione a una grande quantità di parametri relativi alle condizioni della colonna d'aria del sito considerato (pressione, temperatura, umidità, quantità di ozono, nuvolosità, ecc.) con un dettaglio temporale di circa 30 minuti per ottenere una valutazione media oraria dell'UV al suolo.

Nel secondo caso si determinano curve di regressione, quadratica per l'UV B e lineare per l'UV A [Kudish et al., 2000], per ogni mese dell'anno fra i valori medi orari della radiazione globale e quelli della radiazione UV. Un pregio di questo metodo è che richiede la sola misura della radiazione globale, un limite è che considera l'effetto dell'atmosfera su radiazione globale e su radiazione UV uguale per entrambe le grandezze. In ogni caso, come per tutti i modelli totalmente empirici, le regressioni ottenute sono applicabili solo per i siti per le quali sono state elaborate.

L'analisi di questi modelli e la loro valutazione per l'Asinara ha chiarito tre punti fondamentali:

1. periodo dell'anno in cui le misure di UV sono significative;
2. tipologia di modello matematico da realizzare;
3. individuazione di parametri meteorologici da utilizzare nella stima della radiazione UV.

In relazione al primo punto, come vedremo nei Risultati, per le finalità dello studio, non ha senso valutare l'UV nel periodo invernale perché i livelli sono assolutamente modesti e scarse sono le attività lavorative o ludiche all'aperto che, in ogni caso, si svolgono con una sufficiente copertura della persona.

In riferimento al secondo punto abbiamo escluso la prima tipologia di modelli perché l'eccessivo numero di parametri, che devono essere coinvolti, non consente la realizzazione di un sistema di stima dell'UV semplice e di basso costo, come da noi ricercato. La seconda tipologia

di modelli è estremamente semplice e in sintonia con le nostre finalità ma, come tutti i modelli totalmente empirici, non è utilizzabile ovunque anche con una ridefinizione dei coefficienti numerici che vi compaiono. Abbiamo pertanto optato per un modello neurale, un po' più complesso, che possa sostituire i modelli formulistici laddove essi presentano una insufficiente funzionalità. Il modello neurale, inoltre, per le sue caratteristiche intrinseche, non necessita né della conoscenza dei legami funzionali fra le grandezze di influenza (parametri in ingresso) e il misurando (nel nostro specifico la radiazione UV A e la radiazione UV B), né di misure molto accurate delle suddette grandezze. Negli ultimi anni, queste caratteristiche delle reti neurali hanno indotto alcuni ricercatori ad applicarle nella modellizzazione dei fenomeni fisico-ambientali e in particolare nello studio dei flussi radiativi [Arca et al., 1998; Alados et al., 2004; Soares et al., 2004]. Nel nostro caso le reti sono state realizzate con il pacchetto *Neural Networks* di Matlab 2008a™, per ciascuno dei quattro siti sperimentali le reti neurali progettate sono di tipo *feedforward* con algoritmo *backpropagation* [Rumelhart et al.; 1986].

A riguardo del terzo punto è subito emerso che doveva essere studiata, e quantificata, l'importanza della radiazione diffusa nella stima neurale della radiazione UV. Ciò in conseguenza del fatto che un sensore di radiazione diffusa, che per i motivi che ora vedremo non è sempre presente nelle stazioni meteorologiche, oltre all'assidua manutenzione che richiede (in prossimità degli equinozi la fascia ombreggiante va regolata giornalmente³) ha un costo confrontabile, se non superiore, a un sensore UV. Allora, per quanto sopra, se per una misura indiretta della radiazione UV si deve installare un sensore di radiazione diffusa, è preferibile evitare quest'ultimo sensore e misurare direttamente l'UV con un sensore specifico. La sperimentazione ha mostrato, come vedremo nei Risultati, l'inutilità della misura della radiazione diffusa nella stima neurale della radiazione UV.

In definitiva le grandezze misurate e calcolate, nei siti sperimentali, che di fatto si sono dimostrate utili per la stima dell'UV col modello neurale da noi realizzato, risultano:

— misurate

- Radiazione solare globale al suolo (Rg);
- Temperatura dell'aria a 2 m dal suolo (Ta);

— calcolate

- Radiazione solare globale al suolo in assenza di atmosfera, detta anche radiazione teorica (Rteo)⁴;
- Altezza del Sole sull'orizzonte (h).

Poiché, come detto poco sopra, i modelli neurali non evidenziano i legami funzionali fra le grandezze implicate è difficile dare una spiegazione analitica al perché della importanza prevalente di queste quattro grandezze. A fronte dei buoni risultati ottenuti, che di per sé giustificano il metodo, possiamo darne una interpretazione:

- la radiazione solare globale al suolo ha in sé la componente UV, il rapporto fra questa radiazione solare e

³ Recentemente sono stati posti in commercio, sensori per radiazione diffusa con schermo "sagomato" fisso.

⁴ Questo parametro dipende dalla declinazione del Sole, dalla latitudine, dall'ora del giorno e dalla costante solare [Benincasa et al. 1991, Benincasa et al. 1985].

quella che si avrebbe in assenza di atmosfera, insieme alla temperatura, tengono conto della "qualità" dell'aria (densità, ozono, umidità, nuvolosità, ecc.);

- l'altezza del Sole sull'orizzonte tiene conto dello spessore d'aria attraversato e quindi dell'interazione di questa con la radiazione UV.

I parametri meteorologici che sono stati acquisiti corrispondono al loro valore medio nell'intervallo di scansione:

- 30 minuti per l'Asinara;
- 20 minuti per Sassari;
- 60 minuti per Capo Caccia;
- 20 minuti per Firenze.

Pertanto anche il dato di UV stimato, nelle diverse stazioni, va interpretato come valor medio nell'intervallo di scansione.

La diversa scansione temporale nelle diverse stazioni è risultata utile a mostrare che la qualità della stima dell'UV, fatta dalla rete neurale, è praticamente indipendente dall'intervallo di acquisizione dei dati meteorologici.

b) Disegno sperimentale

Acquisite le coppie necessarie di sensori UV A e UV B sono state montate nelle tre stazioni meteorologiche prescelte che ne erano sprovviste.

Al fine di stabilire l'influenza della radiazione diffusa nella stima della radiazione UV, nei primi modelli neurali realizzati, abbiamo tenuto conto di questo parametro e poi lo abbiamo trascurato. Il confronto dei risultati ottenuti ci ha consentito di quantificare l'importanza di questa grandezza nella stima dell'UV (vedi Risultati) e di stabilire il numero di misure degli altri parametri, necessario per compensarne l'esclusione.

I dati provenienti dai sensori meteo e dai sensori UV sono stati presi in ogni situazione meteorologica possibile, nei periodi in cui la radiazione ultravioletta è significativa (primavera, estate, inizio autunno). Il 70 % dei dati rilevati (parametri di influenza e radiazione UV) è stato utilizzato per istruire la rete neurale, mentre i rimanenti sono serviti per verificarne la capacità di stima.

Per quanto riguarda la misura della radiazione solare ultravioletta è necessario ricordare quanto ampiamente trattato in letteratura [Larason *et al.*, 2001]. In sintesi: attualmente non esiste uno standard internazionale per la taratura dei radiometri UV, pertanto il valore del coefficiente di taratura (cioè il valore numerico che consente di passare dal valore del segnale elettrico fornito dal sensore, espresso in volt, al valore della radiazione, espressa in watt al metro quadro) ha senso se è specificato il metodo con cui tale valore è stato ottenuto. Da ciò si capisce che uno stesso radiometro, tarato con procedure diverse, avrà coefficienti di taratura diversi e, in modo complementare, sottoponendo alla stessa radiazione UV radiometri tarati con procedure diverse, si ottengono indicazioni, sul valore di radiazione, diverse.

Per quanto sopra, poiché i sensori UV utilizzati (sensori DeltaOhm per Sassari, Firenze, Capocaccia ed Eko Instruments per l'Asinara) non sono tutti uguali, per rendere i dati delle quattro stazioni confrontabili fra loro, secondo una procedura oramai consolidata, in ogni periodo considerato, sia i valori di tensione (volt) forniti dai sen-

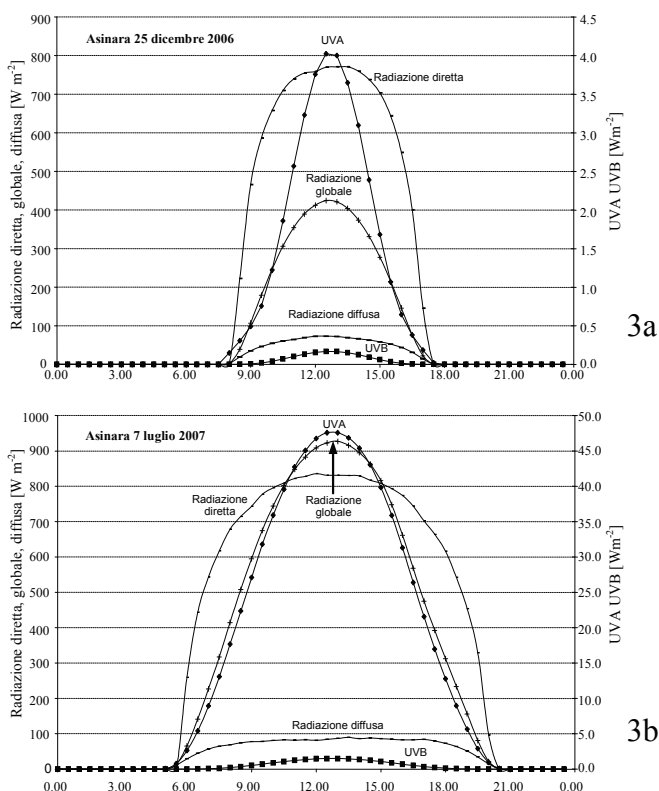


Fig. 3 – Andamento dei flussi radiativi solari: globale, diretta, diffusa (ordinata di sinistra), ultravioletti A e B (ordinata di destra), in una giornata invernale (fig. 3a) e in una estiva (fig. 3b), con cielo estremamente limpido nella stazione meteorologica. Valori misurati nella stazione meteorologica dell'Isola dell'Asinara.

Fig. 3 – Trend of solar radiative fluxes: global, direct, diffuse (ordinate on the left), ultraviolet A and B (ordinate on the right) on a winter (Fig. 3a) and summer (Fig. 3b) day with extremely clear skies. Measured values in the weather station of Asinara Island.

sori di UV sia i valori calcolati dalla rete neurale sono stati divisi per il valore massimo rilevato da ciascun sensore, in quel periodo in ciascun sito. Così facendo sono stati ottenuti valori adimensionali, compresi fra zero e uno per tutti i radiometri UV utilizzati, indipendentemente dal loro coefficiente di taratura.

La procedura, svincolandoci dal metodo di calibrazione dei sensori, dà maggiore generalità ai risultati ottenuti. Ovviamente, laddove il coefficiente di taratura (volt/watt m⁻²) del sensore UV sia ben definito, è immediata la conversione dei dati relativi (adimensionali) a dati assoluti di radiazione (watt m⁻²) ultravioletta.

Risultati

In Fig. 3a riportiamo il grafico dell'andamento temporale dei flussi radiativi solari (radiazione globale, diretta, diffusa, UV A e UV B) misurati⁵ in una giornata assolata nell'isola dell'Asinara (25 dicembre 2006). Si noti come, con cielo

⁵ Gli strumenti che hanno fornito i dati di radiazione globale, diretta e diffusa sono quelli previsti dal WMO per una stazione meteorologica standard. Si ricordi altresì che per definizione la radiazione globale e quella diffusa si misurano sul piano orizzontale, quella diretta si misura su un piano ortogonale alla direzione di provenienza dei raggi solari [WMO n.8, WMO n. 134, Benincasa *et al.* 1991].

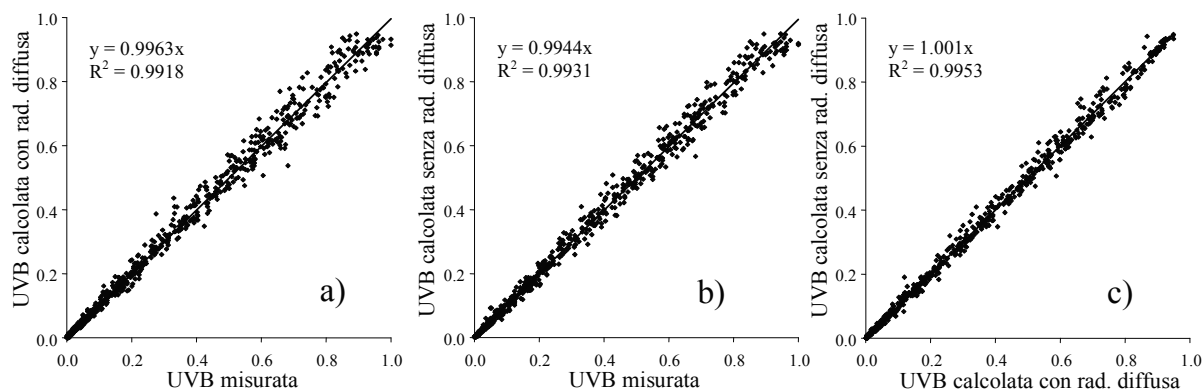


Fig. 4 – a) In ascissa valori normalizzati di radiazione UV B misurati nel periodo 1 maggio-10 luglio 2008 nella stazione di Sassari; in ordinata i valori normalizzati di radiazione UV B stimati (stesso periodo e stesso sito) con la rete neurale avente come ingresso anche la radiazione diffusa. **b)** Come in a) ma senza la radiazione diffusa. **c)** Confronto tra i risultati ottenuti con le due reti neurali.

Fig. 4 – a) In ascissa, normalized values of UV B radiation measured from 1 May to 10 July 2008 at the Sassari station; in ordinate, the normalized values of UV B radiation estimated (for the same period and same site) with the neural network having diffuse radiation as part of the input. **b)** Same as in a) but without the diffuse radiation component. **c)** Comparison of the results obtained with the two neural networks.

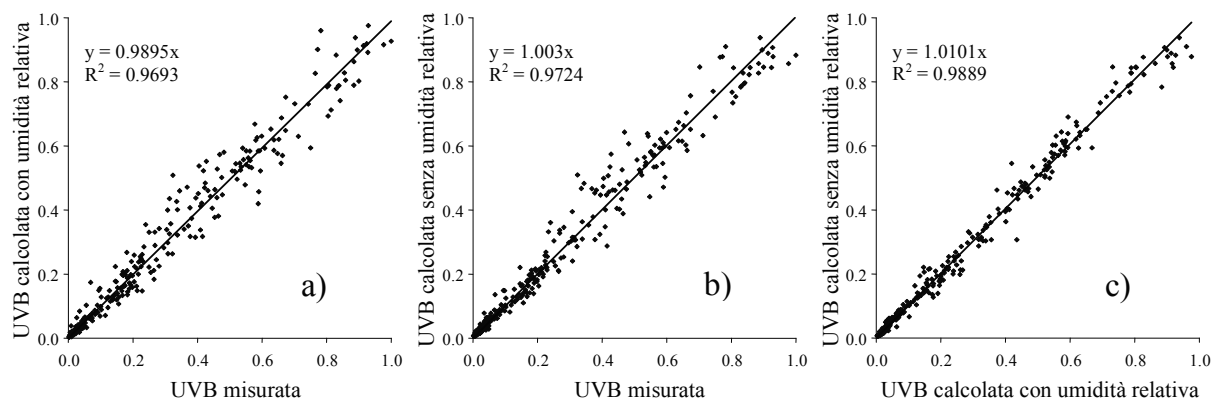


Fig. 5 – a) In ascissa valori normalizzati di radiazione UV B misurati nel periodo 6 marzo-26 maggio 2008 nella stazione di Capo Caccia; in ordinata i valori normalizzati di radiazione UV B stimati (stesso periodo e stesso sito) con la rete neurale avente come ingresso anche l'umidità relativa dell'aria. **b)** Come in a) ma senza l'umidità relativa dell'aria. **c)** Confronto tra i risultati ottenuti con le due reti neurali.

Fig. 5 – a) In ascissa, normalized values of UV B radiation measured from 6 March to 26 May 2008 at the Capo Caccia station; in ordinate, the normalized values of UV B radiation estimated (for the same period and same site) with the neural network having relative humidity of the air as part of the input. **b)** Same as in a) but without the relative humidity of the air. **c)** Comparison of the results obtained with the two neural networks.

molto limpido, a fronte di un massimo di 424 W m^{-2} di radiazione globale (ore 12:30) si hanno solamente 4.02 W m^{-2} di UV A e 0.17 W m^{-2} di UV B. In Fig. 3b è rappresentata una giornata estiva, con cielo estremamente limpido, con radiazione globale di 923 W m^{-2} , UV A di 47.56 W m^{-2} e UV B di 1.49 W m^{-2} . Confrontando le Fig. 3 si può osservare che al raddoppiare (circa) della radiazione globale, decuplicano (circa) l'UV A e l'UV B.

Ovviamente in caso di cielo coperto e di pioggia con l'attenuarsi della radiazione globale si riduce anche la componente UV. Questi risultati propedeutici (la Fig. 3 è solo un esempio di un comportamento generale) ci hanno consentito di escludere, dalla nostra analisi, i dati di UV rilevati nei mesi invernali e nelle giornate con cielo completamente coperto o piovoso.

Come già accennato, il primo aspetto che abbiamo studiato e quantificato è stata l'influenza della radiazione

diffusa sulla radiazione UV.

Al tal fine i modelli neurali da noi sviluppati sono stati realizzati in duplice versione: una che prevede l'utilizzo della radiazione diffusa e una, identica alla precedente, che non lo prevede.

Il confronto tra i dati ottenuti dalle due tipologie di reti neurali ci ha portato a concludere che la radiazione diffusa è ininfluenza sulla risposta della rete neurale. In Fig. 4 si riporta, come esempio, la risposta della rete neurale per la misura dell'UV B con e senza radiazione diffusa (nell'ordine 4a e 4b) nel periodo 1 maggio – 10 luglio 2008 nella stazione di Sassari; si nota subito la forte correlazione esistente fra i valori misurati dal sensore di UV B e i valori stimati dalle due reti. Si nota altresì l'esatta corrispondenza tra i valori elaborati dalla rete con radiazione diffusa e quelli elaborati dalla rete senza questo parametro (Fig. 4c).

Risultati analoghi si sono ottenuti in tutti i siti sperimentali per tutte le condizioni di irraggiamento solare.

I dati sperimentali mostrano quindi che la stima della radiazione ultravioletta per gli scopi dello studio, non richiede l'utilizzo del dato di radiazione diffusa. Questo ci consente allora di stimare con sufficiente accuratezza l'irradianza UV in tutte le stazioni che siano equipaggiate con sensori di radiazione globale e di temperatura dell'aria.

Le stesse considerazioni sono risultate valide anche per il dato di umidità relativa dell'aria: la sua presenza o assenza, come ingresso nella rete neurale, non modifica il risultato fornito dal modello (Fig. 5).

Una rapida verifica, fatta per l'UV A, ci ha portato alla conclusione che anche per stimare, con una rete neurale, questo flusso radiativo solare sono sufficienti i dati di radiazione globale e di temperatura dell'aria.

Il modello neurale

La difficoltà di ottenere misure indirette di radiazione UV ovvero di costruire modelli che legano analiticamente la radiazione UV alle grandezze meteo-ambientali che la influenzano, ci ha suggerito la realizzazione di un modello neurale [Golden, 1996; Kasabov, 1996; AA.VV., 1999]. Le reti neurali realizzate hanno: quattro neuroni in ingresso (che ricevono i valori di R_g , T_a , R_{teo} e h), da nove a venticinque neuroni⁶ nello strato intermedio, e un neurone nello strato di uscita (che fornisce una stima dell'UV B).

I parametri meteorologici forniti alla rete (e conseguentemente il valore di UV B ottenuto in uscita) corrispondono al valore medio nell'intervallo di scansione.

Dopo aver effettuato i controlli formali e statistici sulla congruità intrinseca dei dati sperimentali e avere eliminato, per ogni singolo periodo e per ogni sito, sia i giorni piovosi sia quelli troppo nuvolosi, i dati sono stati suddivisi in due insiemi.

I dati del primo insieme sono stati così utilizzati: il 70 % per la fase di apprendimento, il 15 % per la validazione (al fine di evitare i fenomeni di *overtraining* ovvero per evitare che il modello avesse una bassa capacità di generalizzazione) e il rimanente 15 % per il test (necessario per controllare la capacità del modello di generalizzare i risultati).

I dati del secondo insieme, con i pesi delle sinapsi calcolati durante il processo di apprendimento, sono stati utilizzati per verificare la capacità del modello di stimare il valore, peraltro misurato, di UV B a partire dai dati meteorologici forniti.

Per ogni sito abbiamo costruito, per coprire tutto il periodo di cui si voleva stimare l'UV B, quattro modelli, strutturalmente identici, ma con coefficienti numerici (pesi delle sinapsi) diversi per bimestri, che grosso modo possono essere identificati come: marzo-aprile, maggio-giugno, luglio-agosto, settembre-ottobre. Per i diversi siti i modelli sono strutturalmente identici, ma cambiano i

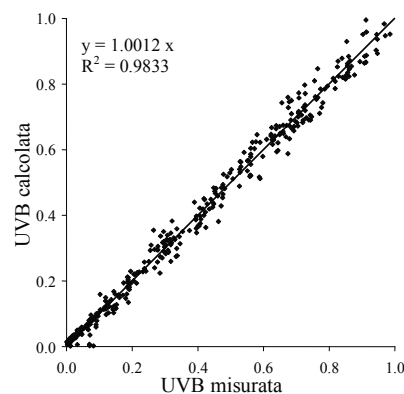


Fig. 6 – In ascissa valori normalizzati di radiazione UV B misurati nel periodo 1 maggio-30 giugno 2008 nella stazione dell'Asinara; in ordinata i valori normalizzati di radiazione UV B stimati (stesso periodo e stesso sito) con la rete neurale.

Fig. 6 – In ascissa, normalized values of UV B measured during the period 1 May-30 June 2008 at the Asinara station; in ordinate, the normalized values of UV B estimated by the neural network (same period and same site).

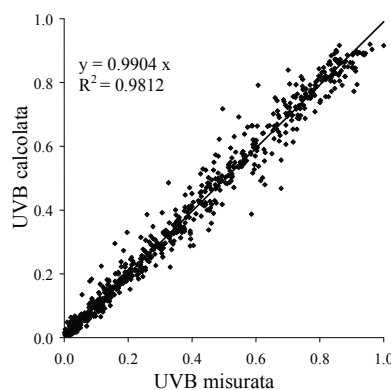


Fig. 7 – Come nella figura 6, ma per la stazione di Firenze nel periodo 1 giugno-31 luglio 2008.

Fig. 7 – Same as in Figure 6, but for the Firenze station during the 1 June-31 July 2008 period.

pesi delle sinapsi. In altre parole come tutti i modelli non analitici, ovvero che hanno in sé coefficienti numerici dipendenti dalla località, anche quelli da noi elaborati sono validi, nei limiti dei loro errori, per le località per le quali sono stati elaborati.

Analizzando i risultati ottenuti con le varie reti, per le diverse stazioni, si è osservata una forte correlazione, fra i valori misurati dai sensori UV B e i valori stimati dalla rete. Nelle Fig.: 4b (Sassari maggio-giugno 2008), 5b (Capo Caccia marzo-maggio 2008), 6 (L'Asinara maggio-giugno 2008), e 7 (Firenze giugno-luglio 2008) sono riportati alcuni esempi della capacità delle reti neurali da noi realizzate di fornire buone stime della radiazione UV B. Analizzando questi grafici si osserva che le correlazioni tra i valori misurati e quelli ottenuti dalle reti neurali risultano altamente significative ovvero con R^2 superiore a 0.97. Inoltre, la pendenza della retta di

⁶ Il numero dei neuroni dello strato intermedio varia sia in base al numero di ingressi e di uscite, sia in base al numero di esempi forniti alla rete, sia in base alla capacità della rete di generalizzare i risultati e di minimizzare l'errore.

Tab. 1 – Indici statistici dei valori stimati dalla rete neurale nei quattro siti sperimentali (primavera-estate 2008).**Tab. 1** – Statistical indexes of the values estimated by the neural network in the four experimental sites (spring-summer 2008).

Indici statistici	Asinara	Sassari	Firenze	Capo Caccia
σ (deviazione standard)	0.031	0.020	0.030	0.036
δ (precisione statistica)	0.002	0.001	0.002	0.002

correlazione è molto vicina a 1 (valori compresi tra 0.99 e 1.00); ciò indica che nei periodi considerati i modelli neurali sottostimano, al massimo dell'1 %, i valori indicati dagli strumenti.

Un altro modo per evidenziare i buoni risultati forniti dalle reti neurali è quello di considerare la differenza fra i valori calcolati dalle reti e i valori misurati dagli strumenti (normalizzati al valore massimo misurato). A tal fine in Tab. 1, come esempio, sono riportati due indici statistici che evidenziano quanto sopra; in particolare vengono indicati [Benincasa, 1988]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|\Delta V_i| - \overline{\Delta V})^2}{n-1}};$$

deviazione standard delle differenze fra valori calcolati dal modello e valori misurati dagli strumenti;

con $|\Delta V_i|$: differenza, in valore assoluto, tra l'i-esimo valore misurato e l'i-esimo valore calcolato;

$\overline{\Delta V}$: media delle differenze;

n : numero delle differenze;

$$\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

precisione statistica delle differenze fra valori misurati e valori calcolati.

Per il periodo di maggiore interesse (primavera-estate) la precisione statistica (Tab. 1) è migliore dello 0.2 %.

Conclusioni

Il principale risultato ottenuto in questa ricerca può essere così sintetizzato: progettazione e realizzazione di un modello neurale, a basso costo di applicazione, per la stima della radiazione ultravioletta (UV), a partire da dati meteorologici, in siti sprovvisti di appositi sensori, finalizzata alla tutela della salute delle persone che per vari motivi si intrattengono sotto al Sole.

A questo proposito possiamo precisare:

- si possono costruire modelli neurali tenendo conto di due grandezze misurate, radiazione solare globale e temperatura dell'aria, e di due grandezze calcolate, radiazione solare teorica e altezza del Sole sull'orizzonte;
- i modelli sono applicabili nel periodo primavera-estate-autunno in giornate che non siano né di cielo completamente coperto né piovose;
- in uno stesso sito il periodo indicato viene coperto da quattro modelli, strutturalmente identici, ma con co-

efficienti numerici (pesi delle sinapsi) diversi per bimestri, che grosso modo possono essere identificati come: marzo-aprile, maggio-giugno, luglio-agosto, settembre-ottobre;

- per i diversi siti i modelli sono strutturalmente identici, ma cambiano i pesi delle sinapsi. In altre parole come tutti i modelli non analitici, ovvero che hanno in sé coefficienti numerici dipendenti dalla località, anche quelli da noi elaborati sono validi, nei limiti dei loro errori, per la località per la quale sono stati elaborati.

Il metodo proposto può essere una valida alternativa in siti dove i modelli empirici, sia pure ricalibrati nel sito, non danno risultati soddisfacenti. Anche questo metodo, come tutti i modelli non analitici, implica che per ogni nuovo sito i coefficienti numerici vadano ricalcolati. Nel caso della stima della radiazione UV, per potere avere più siti di misura, si dovrà procedere all'installazione, oltre che di un sensore di radiazione solare globale e uno di temperatura dell'aria (radiazione solare extraterrestre e altezza del Sole sull'orizzonte si ottengono per via analitica), di un sensore di radiazione UV per almeno un intero periodo (marzo-ottobre) e ottenere così i pesi delle sinapsi per le quattro reti relative a quel sito. Ciò fatto la radiazione UV si otterrà, per quel sito, tramite il modello neurale e il sensore potrà essere utilizzato per calibrare il modello in altro sito.

Appendice

Le reti neurali sono costituite da unità elementari di calcolo dotate di una piccola quantità di memoria (neuroni) che sono connesse tra loro da canali di comunicazione (sinapsi). In generale, i neuroni sono organizzati in strati: alcuni di essi ricevono segnali dall'esterno (neuroni dello strato di ingresso), altri hanno solamente compiti di elaborazione (neuroni degli strati intermedi) e infine altri ancora hanno il compito di fornire all'esterno (neuroni dello strato di uscita) i valori di una data grandezza, funzione delle grandezze in ingresso (vedi Fig. 8). Ogni neurone di uno strato è collegato, tramite sinapsi, almeno a tutti quelli dello strato immediatamente precedente.

Prima di essere implementata su un circuito elettronico, una rete neurale è simulata con un computer per via software. In una prima fase (detta di apprendimento) sono forniti alla rete degli esempi (*pattern*) costituiti dai valori realmente misurati delle grandezze di ingresso con i relativi valori realmente misurati della grandezza di uscita (*target*). Basandosi sugli esempi forniti, la rete riesce a costruire un modello interno⁷ delle relazioni tra le grandezze che partecipano a un dato fenomeno. Questa caratteristica consente di evitare la definizione a priori di un modello analitico da adattare ai dati sperimentali⁸. Successivamente con un insieme di esempi, diverso da quello utilizzato nella fase di apprendimento, viene

⁷ Intendiamo con ciò sottolineare che, a differenza di altri tipi di modelli, nei modelli neurali non è possibile conoscere la relazione funzionale che la rete stabilisce fra grandezze di ingresso e grandezza di uscita.

⁸ Cosa che invece accade nei modelli empirici, nei quali è lo sperimentatore che, in base alla visione di insieme dei dati, magari riportati su un grafico, stabilisce la struttura analitica da dare al modello.

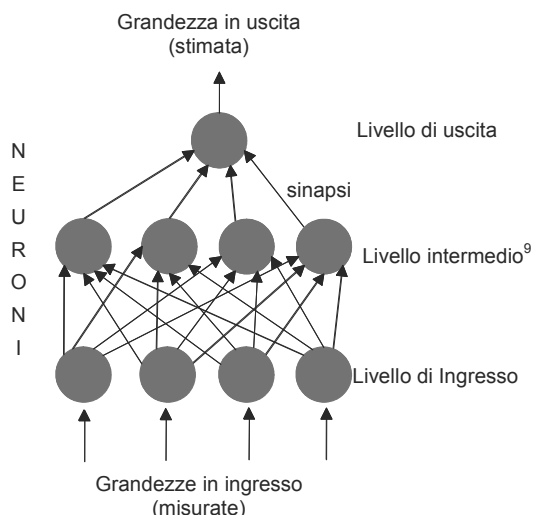


Fig. 8 – Esempio di rete neurale
Fig. 8 – Artificial neural network example

⁹Questi livelli possono essere più di uno.

controllata la capacità di generalizzare della rete neurale (fase di test). A tal fine si forniscono alla rete solo i valori realmente misurati delle grandezze di ingresso e le si fanno calcolare i relativi valori delle grandezze d'uscita, di cui conosciamo l'esatto valore perché precedentemente misurato. Se lo scostamento fra il valore misurato e quello calcolato è accettabile, per gli scopi prefissi, il modello si considera idoneo. In caso contrario si procede a una nuova fase di apprendimento con (per esempio) un numero maggiore di *pattern*, oppure con un numero diverso di neuroni nello strato intermedio, o variando i coefficienti dell'algoritmo di apprendimento. Terminate le fasi di apprendimento e di test è sufficiente introdurre i valori di input per ottenere i valori di output (fase operativa).

Bibliografia

- AA.VV., 1999. Geometria frattale e reti neurali nell'analisi dei sistemi naturali CNR-INAPA Quaderno n. 4, edito a cura di F. Benincasa - G. Maracchi, Firenze.
- Alados, I., Mellado, J. A., Ramos, F., Alados-Arboledas, L., 2004. Estimating UV Erythral Irradiance by Means of Neural Networks, *Photochemistry and Photobiology*, 80, 351-358.
- Arca, B., Benincasa, F., Bianchini, M., De Vincenzi, M., Gori, M., 1998. Le reti neurali nel calcolo dei flussi radiativi, *Riv. di Ing. Agr.* n. 1, 26-31.
- Benincasa, F., Tagliaferri, G., Vendramin, G. G., 1985. Radiazione naturale e artificiale per lo sviluppo e la crescita delle piante. *Quaderni I.P.R.A., Consiglio Nazionale delle Ricerche*.
- Benincasa, F., 1988. Elettronica per misure fisiche e biologiche. Vol. I, Calderini, Bologna.
- Benincasa, F., Maracchi, G., Rossi, P., 1991. Agrometeorologia, Patron Editore, Bologna.
- Diffey, B. L., Jansen, C.T., Urbach, F., Wulf, H.C., 1998. Joint ISO/CIE Standard ISO 17166:1999/CIE S007-1998 Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose (<http://www.cie.co.at/publ/abst/s007.html>). *Commission Internationale de l'Eclairage*.
- Diffey, B. L., 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods* n.28, 4-13.
- Foyo-Moreno, I., Vida, J., Alados-Arboleda, L., 1998. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290 ÷ 385 nm), *J. Appl. Meteor.* 38, 1020-6.
- Golden, R.M., 1996. *Mathematical Methods for Neural Networks Analysis and Design MIT Press Cambridge Massachusetts*.
- Kasabov, N.K., 1996. *Foundations of Neural Networks, Fuzzy systems and knowledge engineering, MIT Press Cambridge Massachusetts*.
- Kudish, A. I., Evseev, E., 2000. Statistical relationships between solar UVB and UVA radiation and global radiation measurements at two sites in Israel, *Int. J. Climatol* 20, 759-770.
- Larason, T.C., Cromer, C. L., 2001. Sources of Error in UV Radiation Measurements, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 106, n.4, 649-656 (<http://www.nist.gov/jres>)
- Long, C. S., Miller, A. J., Tien Lee, H., Wild, J. D., Przywarty, R. C., Hufford, D., 1996. Ultraviolet Index Forecasts Issued by the National Weather Service, *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 77, Issue 4, 729-748.
- McKinlay, F., Diffey, B. L., 1987. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin 83-87. In: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations. Edizioni Elsevier*
- Murillo, W., Canada, J., Pedrós, G., 2003. Correlation between global ultraviolet (290 ÷ 385 nm) and global irradiation in Valencia and Cordoba (Spain), *Renewable Energy* 28, 409-418.
- Parisi, A.V., Turnbull, D.J., Kimlin, M.G., 2006. Influence of solar UVA on erythral irradiances, *Physics in Medicine and Biology* vol. 51, 3241-3249.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., 1986. Learning Internal Representations by Error Propagation, in *Parallel Distributed Processing: exploration in the microstructure of cognition Vol. 1, Foundations, MIT Press, Cambridge*.
- Soares, J., Oliveira, A. P., Boznar, M. Z., Mlakar, P., Escobedo, J., Machado, A., 2004. Modelling hourly diffuse solar-radiation in the city of Sao Paulo using a neural-network technique, *Applied Energy* vol. 79, 201-214.
- Vecchia, P., Hietanen, M., Stuck, B. E., van Deventer, E., Niu, S., (editors), 2007. Protecting Workers from Ultraviolet Radiation. *Edizioni International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*.
- WMO, 1981 Guide to agricultural meteorological practices, WMO n.134, *World Meteorological Organization, Geneva, Suisse*.
- WMO, 1996 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO n.8, 6 ed. *World Meteorological Organization, Geneva, Suisse*.
- WMO, 2003. Manual on the Global Observing System – Volume I (Annex V to the WMO Technical Regulations), WMO n.544, *Secretariat of, World Meteorological Organization, Geneva, Suisse*