

## GSRAD, UN COMPONENTE SOFTWARE PER LA STIMA DELLA RADIAZIONE SOLARE

### *GSRAD, A SOFTWARE COMPONENT TO ESTIMATE SOLAR RADIATION*

Marcello Donatelli\*, Laura Carlini, Gianni Bellocchi

*Istituto Sperimentale per le Colture Industriali (ISCI), via di Corticella 133, 40128 Bologna*

#### **Riassunto**

GSRad è un componente *software* utilizzabile in applicazioni che richiedano la stima della radiazione solare in ambiente Windows, indipendentemente dal linguaggio di programmazione usato purché compatibile con la piattaforma .NET o il modello COM. Il componente contiene metodi per il calcolo dei valori giornalieri della radiazione potenziale e per la stima, su base giornaliera e oraria, della radiazione globale al suolo. Per le stime al suolo sono disponibili modelli a base fisica il cui *input* è rappresentato dalla temperatura dell'aria o dalle ore di insolazione. In aggiunta, è disponibile un metodo per la generazione della radiazione utilizzando parametri statistici. Il componente implementa inoltre un metodo per il calcolo dei valori di inclinazione e orientamento delle superfici captanti non orizzontali a partire dai valori di altimetria circostanti la superficie in esame.

**Parole chiave:** radiazione solare, slope, aspect, .NET, componenti software

#### **Abstract**

*GSRad is a cross-language, COM and .NET compatible, software component to be used into Windows-based applications for estimating global solar radiation. The component implements methods to calculate values of both extra-terrestrial and ground-level solar radiation. Daily and hourly data of solar radiation over horizontal or sloped surfaces are estimated according to equations relating atmospheric radiation to either air temperature or sunshine duration. A statistical based approach is also offered as an option to generate global solar radiation at ground level. Finally, a method is implemented to compute slope and aspect parameters of non-horizontal surfaces using a digital elevation model as a basis.*

**Keywords** solar radiation, slope, aspect, .NET, software components

#### **Introduzione**

Lo sviluppo di componenti *software* per la realizzazione di applicazioni nel settore della modellistica agrometeorologica costituisce una delle principali attività scientifiche in corso presso la sezione di Tecniche Colturali dell'ISCI di Bologna (Fila *et al.*, 2002), per corrispondere ai moderni paradigmi di sviluppo *software*. Anche nell'ambito della modellazione agro-ambientale le architetture software di applicazioni stanno infatti evolvendo verso una implementazione che utilizza componenti, cioè verso entità discrete di *software* progettate per essere sostituibili senza dover modificare l'applicazione che le utilizza, e riutilizzabili in altri software (Szyperki, 2002). In questo contesto è stato affrontato lo sviluppo di un componente per la stima della radiazione solare giornaliera a partire da variabili meteorologiche facilmente reperibili. La radiazione solare, infatti, costituendo la sorgente energetica per la fotosintesi e l'evapotraspirazione, rappresenta un *input* basilare per i modelli di simulazione della crescita delle colture. A

fronte di tale importanza, risulta ancora limitato il numero delle stazioni che rilevano questa variabile climatica, in rapporto a quelle che registrano temperatura aerea e piovosità (Thornton e Running, 1999; Rivington *et al.*, 2002). Inoltre, le stazioni abilitate alla registrazione della radiazione solare frequentemente manifestano irregolarità nel funzionamento. Tali condizioni costituiscono una grave limitazione per molti studi agronomici e ambientali e impongono la necessità di stime accurate di radiazione solare laddove le misure siano assenti o di scarsa qualità. L'utilizzo di immagini da satellite per la stima della radiazione al suolo rimane ancora una possibilità limitata, dati i vincoli tecnici e le risorse economiche richieste (e.g., Iehlé *et al.*, 1997). Oltre agli approcci usati per generare la radiazione solare su base statistica (e.g., Richardson, 1981; 1982), la ricerca ha prodotto e valutato numerosi modelli per la stima della radiazione solare che utilizzano relazioni fisiche tra questa e altre variabili meteorologiche (e.g. Bristow and Campbell, 1984; Donatelli and Bellocchi, 2001; Weiss *et al.*, 2001; Ball *et al.*, 2004). In particolare, i modelli che utilizzano dati di temperatura aerea o il numero di ore di luce assicurano stime di radiazione sufficientemente accurate (e.g., Ri-

\*Corresponding author: tel. +39 051 6316843  
e-mail: m.donatelli@isci.it (M.Donatelli).

vington *et al.*, 2002). Sebbene l'implementazione di tali modelli in *software* non commerciali (e.g., RadEst, Donatelli *et al.*, 2003) abbia permesso di supportare studi di modellazione a livello di sistemi colturali (e.g. Mavromatis *et al.*, 2002; Bellocchi *et al.* 2003; Ferrari *et al.* 2003; Lyon *et al.*, 2003), lo sviluppo di un componente *software* specifico (GSRad, *Global Solar Radiation*) intende mettere a disposizione degli utenti una libreria di funzioni per la stima della radiazione solare, riutilizzabili entro nuove applicazioni. Scopo dell'articolo è la presentazione delle funzionalità e della struttura del componente in rapporto alle potenzialità d'uso in *software* dedicato.

**Stima della radiazione solare**

Il componente consente, per ciascuna latitudine e per ogni giorno dell'anno, di calcolare la radiazione solare potenziale (radiazione solare al di fuori dell'atmosfera terrestre) e di eseguire stime della radiazione alla superficie del suolo. Funzionalità sono inoltre previste per il calcolo dei parametri di orientamento ( $\gamma$ ) e inclinazione ( $\alpha$ ) della superficie captante a partire da modelli digitali di elevazione (*digital elevation model* o *digital terrain model*).

**Radiazione solare potenziale** Il calcolo della radiazione potenziale giornaliera incidente su superfici orizzontali,  $RadP_i$  ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ), è derivato da *routine* basate sui concetti generali della geometria solare (costante solare, declinazione solare, durata del giorno) (Spitters *et al.*, 1986; Pickering *et al.*, 1994). Una generalizzazione per superfici non orizzontali,  $RadP_i(\alpha, \gamma)$ , è stata realizzata introducendo la dipendenza dall'orientamento e dall'inclinazione della superficie captante (Stine e Horgan, 1985):

$$RadP_i(\alpha, \gamma) = RadP_i \cdot \cos(\alpha) + cRadP_i \cdot \sin(\alpha) \tag{1}$$

Per i dettagli vedere Tab. 1 e Tab. 2.

**Radiazione solare al suolo**

Metodi alternativi sono disponibili per la stima al suolo della radiazione solare,  $Rad_i(\alpha, \gamma)$ , ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ), basati sull'eliofanìa o sull'escursione termica giornaliera (dettagli in Tab. 1 e Tab. 2). La stima in funzione delle ore di luce deriva da una implementazione (Rivington *et al.*, 2002) del modello di Johnson-Woodward (Johnson *et al.*, 1995; Woodward *et al.*, 2001):

$$Rad_i(\alpha, \gamma) = SSD_i \cdot RadS_i + H_i \cdot \frac{RadP_i}{RadP_i(\alpha, \gamma)} \cdot RadD_i \cdot (f_{blue} \cdot (1 - c_i) + f_{cloud} \cdot c_i) \tag{2}$$

Stime al suolo in funzione della temperatura aerea sono derivate dal prodotto della radiazione potenziale per un coefficiente di trasmissività dell'atmosfera ( $tt_i$ ):

$$Rad_i(\alpha, \gamma) = RadP_i(\alpha, \gamma) \cdot tt_i \tag{3}$$

Il coefficiente di trasmissività è stimato dai valori termici

giornalieri utilizzando tre modelli alternativi (dettagli in Tab. 1 e Tab. 2):

- modello Bristow-Campbell (Bristow e Campbell, 1984)

$$tt_i = \tau \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T_i^2}{\Delta T_m}\right) \right] \tag{4}$$

- modello Campbell-Donatelli (Donatelli e Campbell, 1998)

$$tt_i = \tau \cdot [1 - \exp(-b \cdot f(T_{avg}) \cdot \Delta T_i^2 \cdot f(T_{min}))] \tag{5}$$

- Donatelli-Bellocchi (Donatelli e Bellocchi, 2001).

$$tt_i = \tau \cdot \left[ 1 + c1 \cdot \left( \sin\left(i_r \cdot \frac{\pi}{180} \cdot c2\right) + \cos\left(i_r \cdot \frac{\pi}{180} \cdot f(c2)\right) \right) \right] \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T_i^2}{\Delta T_w}\right) \right] \tag{6}$$

La radiazione solare può essere generata in base all'approccio di Richardson (1981), per cui i valori giornalieri di temperatura aerea massima e minima e di radiazione solare sono determinati come parte di un processo stocastico multivariato. La dipendenza tra le tre variabili è descritta in Richardson (1982).

La stima oraria dei valori di radiazione,  $Rad_i(\alpha, \gamma)_{-hr}$ , è fatta ridistribuendo il dato giornaliero in base alla variazione oraria dell'angolo zenitale espresso in radianti ( $\Psi_{hr}$ ):

$$Rad_i(\alpha, \gamma)_{-hr} = Rad_i(\alpha, \gamma) \cdot \frac{\cos(\Psi_{hr})}{\sum_{hr(sr_i)} \cos(\Psi_{hr})} \tag{7}$$

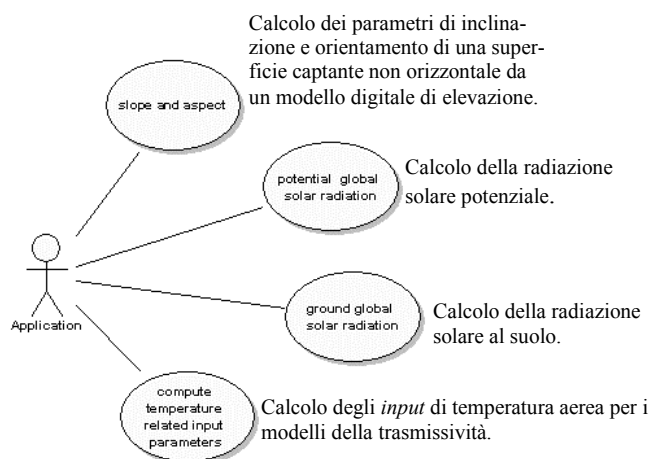
I termini  $sr_i$  e  $ss_i$  rappresentano l'ora dell'alba e del tramonto rispettivamente. Il coseno dell'angolo zenitale è ricavato dalle formule della geometria solare da cui è derivata la radiazione potenziale.

**Calcolo dei parametri di inclinazione e orientamento** La quantità di radiazione incidente su una superficie non orizzontale è influenzata dalle caratteristiche del pendio. L'angolo di incidenza è definito dalla pendenza, mentre l'orientamento della superficie e la latitudine determinano l'insolazione. Il componente implementa *routine* per il calcolo dei parametri di inclinazione e orientamento della superficie captante, derivate dall'approccio ESRI (<http://www.esri.com>) e basate sull'utilizzo di dati di elevazione ( $z_{i,j}$ ) da un *grid* 3x3 di celle equidistanti ( $Z_{i,j}$ ):

$$Z_{i,j} = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & z_{1,3} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & z_{2,3} \\ z_{3,1} & z_{3,2} & z_{3,3} \end{pmatrix} \tag{8}$$

Tale approccio permette il calcolo dei parametri  $\alpha$  e  $\gamma$  per un punto tenendo conto dei dati degli otto punti più vicini (Tab. 3).

Tutte le metodologie di calcolo sono descritte in dettaglio nel file di help del componente.



**Fig. 1** – Diagramma UML dei casi d'uso.

*Fig. 1* – UML use cases diagram.

## Architettura del componente

Il componente è stato sviluppato nei linguaggi di programmazione Visual Basic 6 e C#, seguendo il paradigma della programmazione orientata ad oggetti (OOP: *Object-Oriented Programming*), facendo riferimento alle specifiche della programmazione orientata a componenti (Löwy, 2003), e utilizzando la notazione standard UML (*Unified Modeling Language*) per sviluppare e documentarne l'architettura. Inoltre, l'approccio *design by contract* è stato adottato per spiegare l'insieme delle richieste e delle aspettative del componente.

### Diagrammi UML

Lo sforzo di progettazione è illustrato mediante i diagrammi UML dei casi d'uso (*Use Cases*) (Fig. 1) e delle attività (*Activity*) (Fig. 2).

Il diagramma *Use Cases* mostra l'utente del componente, ovvero l'applicazione, e l'insieme delle connessioni con le funzionalità che il componente dovrà realizzare all'interno dell'applicazione. Il diagramma *Activity* mostra il flusso di attività svolte dal componente per il calcolo della radiazione globale al suolo. Nel diagramma si ritrovano gli elementi decisionali e condizionali del componente. Ad esempio, il calcolo dei parametri di orientamento e inclinazione di una superficie captante generica costituisce una attività opzionale. La radiazione al suolo può essere stimata con il modello JW che fa uso dell'eliofania (SSD: *sunshine duration*), con i modelli della trasmissività BC, CD, DB, o con il metodo di Richardson. Tutti i modelli a base fisica richiedono il calcolo della radiazione potenziale. È possibile utilizzare i tre metodi pubblici del componente per la stima degli *input*, dipendenti dalla temperatura aerea, dei modelli BC, CD e DB. Le classi accessibili dalle applicazioni che usano il componente sono distinte in due tipologie fondamentali: tipi dati (*RadData* e *RadDataTemp*) e classi che contengono i metodi pubblici (*GSRad* e *info*). *GSRad* è l'interfaccia del componente e contiene quindi i metodi pubblici per il calcolo dei parametri di orientamento e inclinazione di superfici non orizzontali,

*SlopeAspect(RadData)*, della radiazione potenziale, *PotentialRadiation(RadData)*, e della radiazione globale al suolo, *GroundRadiation(RadData)*, usando uno dei modelli previsti (quattro a base fisica e uno a base statistica). La chiamata dei metodi avviene passando un riferimento a un oggetto, che è un'istanza della classe *RadData*. L'oggetto *RadData* contiene sia gli *input* che gli *output* scritti dal metodo una volta eseguito. L'interfaccia implementa inoltre tre metodi pubblici per il calcolo dei valori di *input* dei modelli in cui sono richiesti i dati di temperatura aerea: media mensile, *MonthlyMeans(RadTempData)*; media mobile su un periodo di sette giorni, *MobileWeekMeans(RadTempData)*; escursione termica giornaliera, *DailyDeltaT(RadTempData)*. Questi metodi possono essere ignorati nel caso in cui si disponga di questi valori. Esempi di uso in C# e Visual Basic 6 sono commentati nel file di help e resi disponibili come esempi di applicazioni (applicazioni in C# ed Excel).

### Design by contract

Il componente segue l'approccio *design by contract* (Meyer, 1997), per cui l'integrità degli oggetti viene regolarmente esercitata tramite la verifica di pre-condizioni e post-condizioni. Queste garanzie pubbliche rendono trasparente l'uso degli oggetti, chiarendo i limiti di applicazione. Nei metodi sono specificate le condizioni da soddisfare prima dell'esecuzione del metodo, garantite le quali sono specificate anche quelle che seguono l'esecuzione. Il mancato rispetto delle pre-condizioni rende imprevedibile il comportamento del componente. Pertanto, l'applicazione che utilizza il componente deve esercitare una verifica affinché i dati in *input* necessari all'esecuzione di ciascun metodo rispettino le pre-condizioni. Le pre-condizioni e le post-condizioni sono riportate nel manuale d'uso del componente.

## Conclusioni

I componenti riutilizzabili, oltre a favorire la trasparenza del *know-how* inerente agli applicativi sviluppati, accrescono sensibilmente le capacità di lavoro dei modellisti, favorendone la finalizzazione al *problem solving* e limitando i notevoli sforzi tradizionalmente riservati alla fase di programmazione. Il componente per il calcolo dei valori potenziali e al suolo della radiazione solare è uno strumento utile a supportare collaborazioni tra diversi ricercatori impegnati nella creazione di modelli per l'agronomia e l'agrometeorologia entro il paradigma *object-oriented*. In particolare, GSRad è parte di una vasta azione scientifica (progetto SIPEAA, sito <http://www.sipeaa.it>) indirizzata verso la realizzazione di una architettura a componenti e lo sviluppo di applicazioni in cui le funzioni, l'ambiente di esecuzione e la rappresentazione dei dati sono mantenuti separati. Le tecnologie COM e .NET su cui è basato offre agli sviluppatori ampie possibilità di utilizzo del componente in applicazioni scritte con diversi linguaggi (e.g., Delphi, C++, VB.NET, C#). Una versione scritta in linguaggio Java, utilizzabile anche su sistemi operativi Linux è in fase di sviluppo. Questo componente sarà utilizzato nella nuova versione del software RadEst, e come sub-

componente dei componenti CLIMA e RadMap, tutti in sviluppo presso ISCI. Il package per l'installazione, che comprende il manuale d'uso ed esempi di applicazione del componente all'interno dell'editor VBA di MS Excel e in C#, è distribuito gratuitamente per scopi non commerciali tramite il sito <http://www.sipeaa.it/tools>.

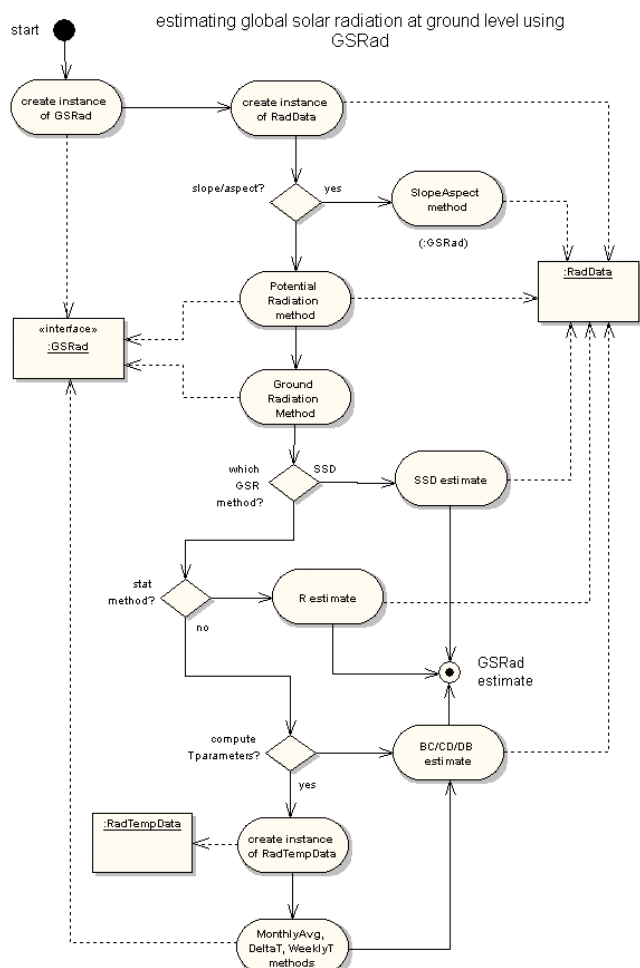


Fig. 2 – Diagramma UML delle attività.  
Fig. 2 – UML activity diagram.

## Ringraziamenti

Ricerca svolta nell'ambito del Progetto SIPEAA (Strumenti Informatici per la Pianificazione Eco-compatibile delle Aziende Agrarie) finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, pubblicazione n. 26.

## Bibliografia

- Ball, R.A., Purcell, L.C., Carey, S.K., 2004. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agron. J.*, 96, 391-397.
- Bellocchi, G., Donatelli, M., Fila, G., 2003. Calculating reference evapotranspiration and crop biomass using estimated radiation inputs. *Ital J. Agron.*, 7, 95-102.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agr. Forest Meteorol.*, 31, 159-166.

Donatelli, M., Bellocchi, G., 2001. Estimates of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst3.00. *Proc. 2nd Int. Symp. Modelling Cropping Syst.*, 16-18 July, Florence, Italy, 213-214.

Donatelli, M., Bellocchi, G., Fontana, F., 2003. RadEst3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *Eur. J. Agron.*, 18, 369-372.

Donatelli, M., Campbell, G.S., 1998. A simple model to estimate global solar radiation. *Proc. 5th Eur. Soc. for Agron. Congr.*, 28 June-2 July, Nitra, Slovak Republic, 2, 133-134.

Ferrari, F., Trevisan, M., Capri, E., 2003. Predicting and measuring environmental concentration of pesticides in air after soil application. *J. Environ. Qual.*, 32, 1623-1633.

Fila, G., Donatelli, M., Bellocchi, G., 2002. Developing dynamic link libraries for agrometeorology and agricultural modelling. *Proc. 7th Eur. Soc. for Agron. Congr.*, 15-18 July, Cordoba, Spain, 285-286.

Iehlé, A., Lefèvre, M., Bauer, O., Martinoli, M., Wald, L., 1997. *Meteosat: a valuable tool for agro-meteorology. Study report, Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.*

Johnson, I.R., Riha, S.J., and D.S. Wilks. 1995. Modelling daily net canopy photosynthesis and its adaptation to irradiance and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Agric. Syst.*, 50, 1-35.

Lyon, D.J., Hammer, G.L., McLean, G.B., Blumenthal, J.M., 2003. Simulation supplements field studies to determine no-till dryland corn population recommendations for semiarid Western Nebraska. *Agron. J.*, 95, 884-891.

Löwy, J., 2003. *Programming .NET components.* O'Reilly & Associates, California, CA, USA.

Mavromatis, T., Jagtap, S.S., Jones, J.W., 2002. El Niño-Southern Oscillation effects on peanut yield and nitrogen leaching. *Climate Res.*, 22, 129-140.

Meyer, B., 1997. *Object-oriented software construction (2nd ed.).* Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

Pickering, N.B., Hansen, J.W., Jones, J.V., Wells, C.M., Chen, V.K., Godwin, D.C., 1994. *WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data.* *Agron. J.*, 86, 332-337.

Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17, 182-190.

Richardson, C.W., 1982. Dependence structure of daily temperature and solar radiation. *Trans. of ASAE*, 25, 735-739.

Rivington, M., Matthews, K.B., Buchan, K., 2002. A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. *Proc. 1st biennial meeting of the Int. Environ. Modell. and Software Soc.*, 24-27 June, Lugano, Switzerland, 3, 193-198.

Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M., Goudriaan, J., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. *Agric. For. Meteorol.*, 38, 217-229.

Stine, W.B., Harrigan, R.W., 1985. *Solar energy systems design.* John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.

Szyperski, C., 2002. *Component software (2nd ed.).* Addison-Wesley, UK, 589 pp.

Thornton, P.E., Running, S.W., 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agr. Forest Meteorol.*, 93, 211-228.

Weiss, A., Hays, C.J., Hu, Q., Easterling, W.E., 2001. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. *Agron. J.*, 83, 1321-1326.

Woodward, S.J.R., Barker, D.J., and R.F. Zyskowski. 2001. A practical model for predicting soil water deficit in New Zealand pastures. *New Zeal. J. Agr. Res.*, 44, 91-109.

**Tab. 1** - Variabili di *input* e *output* del componente. Per ciascun *input*, un numero identificativo (*ID output*) elenca gli *output* calcolati usando quello specifico *input*.

*Tab. 1 - Input and output variables of GSRad. For each input, the outputs calculated using that specific input are listed as ID output.*

Variabile	Unità	Modello§	Output <u>Output calcolato (ID)</u>
<b>Input</b>			
<i>i</i> , giorno giuliano	-	BC, CD, DB, JW	1, 2, 5, 6, 7
$\lambda'$ , latitudine	°	BC, CD, DB, JW	1, 2
$\tau$ , trasmissività del cielo sereno	-	BC, CD, DB, JW	2
$\alpha'$ , inclinazione della superficie captante	°	BC, CD, DB, JW	1, 2
$\gamma'$ , orientamento in senso orario rispetto al sud della superficie captante	°	BC, CD, DB, JW	1, 2
$T_{max,i}$ , massima temperatura aerea giornaliera	°C	BC, CD, DB	2, 5, 6, 7
$T_{min,i}$ , minima temperatura aerea giornaliera	°C	BC, CD, DB	2, 5, 6, 7
$\Delta T_{i_s}$ , intervallo giornaliero delle temperature aeree§§	°C	BC, CD, DB	2
$\Delta T_m$ , media mensile dei $\Delta T_i'$ (media fissa)§§§	°C	BC	2
$\Delta T_{w,i_s}$ media settimanale dei $\Delta T_i'$ (media mobile)§§§§	°C	DB	2
$T_{avg,i}$ , media delle temperature aeree giornaliere	°C	CD	2
$T_{nc}$ , fattore delle temperature notturne estive	-	CD	2
$i_r$ , opzione di <i>reverse</i> (i or (361-i))	-	DB	2
$c1$ , primo parametro di stagionalità	-	DB	2
$c2$ , secondo parametro di stagionalità	-	DB	2
$b$ , parametro radiazione-temperatura	-	BC, CD, DB	2
$SSD_{i_s}$ , eliofania giornaliera	h	JW	2
$FF$ , fattore di ripartizione della intensità luminosa	-	JW	2
$Z_{i,j}$ , matrice delle altitudini da un modello digitale di elevazione§§§§§	m	BC, CD, DB, JW	1, 2, 3, 4
$s$ , dimensione delle celle della matrice $Z_{i,j}$	m	BC, CD, DB, JW	1, 2, 3, 4
$A$ , matrice di funzioni di correlazione 3x3 tra i residui di radiazione e temperatura aerea massima e minima	-	R	2
$B$ , matrice di funzioni di correlazione 3x3, ritardata di un giorno, tra i residui di radiazione e temperatura aerea massima e minima	-	R	2
<b><u>ID output</u></b>			
$RadP_i(\alpha, \gamma)$ , radiazione potenziale giornaliera	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>		1
$Rad_i(\alpha, \gamma)$ , radiazione solare giornaliera al suolo	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>		2
$\alpha'$ , inclinazione della superficie captante (da un modello digitale di elevazione)	°		3
$\gamma'$ , orientamento della superficie captante (da un modello digitale di elevazione)	°		4
$\Delta T_{i_s}$ intervallo giornaliero delle temperature aeree	°C		5
$\Delta T_m$ , media mensile dei $\Delta T_i'$ (media fissa)	°C		6
$\Delta T_{w,i_s}$ media settimanale dei $\Delta T_i'$ (media mobile)	°C		7

§ *BC*, modello Bristow-Campbell della trasmissività; *CD*, modello Campbell-Donatelli della trasmissività; *DB*, modello Donatelli-Bellocchi della trasmissività; *JW*, modello Johnson-Woodward della radiazione solare al suolo; *R*, modello Richardson della generazione stocastica di radiazione solare al suolo.

§§  $\Delta T_i = T_{max,i} - 0.5 \cdot (T_{min,i} + T_{min,i+1})$

§§§  $\Delta T_m = \sum_{i=i_{0,m}}^{i_{f,m}} \frac{\Delta T_i'}{i_{f,m} - i_{0,m} + 1}$ , dove  $m$  è un mese dell'anno,  $0$  è il giorno iniziale del mese,  $f$  è il giorno finale del mese,  $\Delta T_i' = T_{max,i} - T_{min,i}$

§§§§  $\Delta T_{w,i} = \sum_{j=i-3}^{i+3} \frac{\Delta T_i'(j)}{7}$ , dove  $j$  è un indice del periodo di 7 giorni

§§§§§  $Z_{i,j} = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & z_{1,3} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & z_{2,3} \\ z_{3,1} & z_{3,2} & z_{3,3} \end{pmatrix}$ , dove  $z_{i,j}$  sono i valori di altitudine sopra il livello del mare (m)

**Tab. 2** - Componenti per il calcolo della radiazione solare giornaliera,  $Rad_i(\alpha, \gamma)$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), per una superficie captante generica. Gli input richiesti sono riportati in Tab. 1.

Tab. 2 – Components of the solar radiation equations for a generic surface. See Tab.1 for the inputs required.

Variabile	Unità	Formulazione
$RadP_i$ , radiazione potenziale giornaliera incidente su una superficie orizzontale	$\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$	$RadP_i = C \cdot d_i \cdot \left( ss_i \cdot H_i + cc_i \cdot \frac{24}{\pi} \cdot (1 - x_2^2)^{0.5} \right)$
$C$ , costante solare	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$	4.921
$d_i$ , valore inverso della distanza relativa terra-sole	-	$d_i = 1 + 0.00334 \cdot \cos(0.01721 \cdot i - 0.0552)$
$ss_i$ , prodotto giornaliero seno declinazione-seno latitudine	-	$ss_i = \sin(\delta_i) \cdot \sin(\lambda)$
$\delta_i$ , declinazione solare giornaliera	rad	$\delta_i = 0.4093 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + i)\right)$
$\lambda$ , latitudine	rad	$\lambda = \lambda' \cdot (\pi/180)$
$H_i$ , durata del giorno	h	$H_i = 12 + \arcsin(x_2) \cdot \frac{24}{\pi}$
$x_2$ , secondo fattore della durata del giorno	-	$x_2 = \min(\max(x_1, -1), 1)$
$x_1$ , primo fattore della durata del giorno	-	$x_1 = \frac{ss_i}{cc_i}$
$cc_i$ , prodotto giornaliero coseno declinazione-coseno latitudine	-	$cc_i = \cos(\delta_i) \cdot \cos(\lambda)$
$cRadP_i$ , componente della radiazione potenziale dovuta all'orientamento della superficie captante	$\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$	$cRadP_i = C \cdot \frac{24}{\pi} \cdot d_i \cdot (asc_i \cdot \sin(\gamma - \pi) + acc_i \cdot \cos(\gamma - \pi))$
$\alpha$ , inclinazione della superficie captante	rad	$\alpha = \alpha' \cdot (\pi/180)$
$\gamma$ , orientamento della superficie captante	rad	$\gamma = \gamma' \cdot (\pi/180)$
$asc_i$ , componente giornaliera del seno dell'orientamento della superficie captante	-	$asc_i = -\cos(\delta_i) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{24} \cdot H_i\right)$
$acc_i$ , componente giornaliera del coseno dell'orientamento della superficie captante	-	$acc_i = \sin(\delta_i) \cdot \cos(\lambda) \cdot \frac{\pi}{24} \cdot H_i$
$RadS_i$ , componente diretta della radiazione solare giornaliera	$\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$	$RadS_i = C \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sin(h_i) \cdot \left(\tau^{1/\sin(h_i)}\right)$
$h_i$ , altezza del sole sull'orizzonte a mezzogiorno	rad	$h_i = \arcsin(\sin(\delta_i) \cdot \sin(\lambda) + \cos(\delta_i) \cdot \cos(\lambda))$
$RadD_i$ , componente diffusa della radiazione solare giornaliera	$\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$	$RadD_i = C \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sin(h_i) \cdot \left(1 + \tau^{1/\sin(h_i)}\right)$
$f_{blue}$ , intensità relativa della radiazione per cielo sereno	-	$f_{blue} = \frac{1 - \tau^{1/\sin(h_i)}}{1 + \tau^{1/\sin(h_i)}}$
$f_{cloud}$ , intensità relativa della radiazione per cielo coperto	-	$f_{cloud} = FF \cdot f_{blue}$
$c_i$ , frazione giornaliera della copertura nuvolosa	-	$c_i = 1 - \frac{SSD_i}{H_i}$
$f(Tavg)$ , funzione della media giornaliera delle temperature aeree	-	$f(Tavg) = 0.017 \cdot \exp[\exp(-0.053 \cdot Tavg_i)]$
$f(Tmin)$ , funzione della temperatura minima giornaliera	-	$f(Tmin) = \exp(Tmin_i/Tnc)$
$f(c2)$ , funzione del secondo parametro di stagionalità	-	$f(c2) = 1 - 1.90 \cdot c_3 + 3.83 \cdot c_3^2$ §

§ Il parametro  $c_3$  è pari alla parte decimale di  $c_2$

**Tab. 3** - Componenti per il calcolo dei parametri di inclinazione ( $\alpha$ ) e orientamento ( $\gamma$ ) della superficie captante. Gli *input* richiesti sono riportati in Tab. 1.

*Tab. 3 – Components of the slope ( $\alpha$ ) and aspect ( $\beta$ ) equations. See Tab. 1 for the inputs required.*

Variabile	Unità	Formulazione
$\alpha$ , inclinazione della superficie captante rispetto a una superficie orizzontale	rad	$\alpha = \arctan\sqrt{fx^2 + fy^2}$
$fx$ , primo fattore dell'inclinazione	-	$fx = \begin{cases} \frac{z_{2,1} - z_{2,3}}{2 \cdot s} & \text{if } z_{1,1} = z_{1,3} = z_{3,1} = z_{3,3} = 0 \\ \frac{z_{1,1} + 2 \cdot z_{2,1} + z_{3,1} - z_{1,3} - 2 \cdot z_{2,3} - z_{3,3}}{8 \cdot s} & \text{otherwise} \end{cases}$
$fy$ , secondo fattore dell'inclinazione	-	$fy = \begin{cases} \frac{z_{3,2} - z_{1,2}}{2 \cdot s} & \text{if } z_{1,1} = z_{1,3} = z_{3,1} = z_{3,3} = 0 \\ \frac{z_{3,1} + 2 \cdot z_{2,3} + z_{3,3} - z_{1,1} - 2 \cdot z_{1,2} - z_{1,3}}{8 \cdot s} & \text{otherwise} \end{cases}$
$\gamma_N$ , orientamento in senso orario rispetto al nord della superficie captante	rad	$\gamma_N = \begin{cases} \text{if } \alpha \neq 0 \\ \frac{\pi}{2} + c_a & \text{if } fx < 0 \\ \frac{3}{2} \cdot \pi + c_a & \text{if } fx > 0 \\ \pi & \text{if } fy > 0 \text{ and } fx = 0 \\ 0 & \text{if } fy < 0 \text{ and } fx = 0 \\ \text{if } \alpha = 0 \\ 0 & \end{cases}$
$\gamma$ , orientamento in senso orario rispetto al sud della superficie captante	rad	$\gamma = \begin{cases} \gamma_N - \pi & \text{if } \gamma_N \geq \pi \\ \gamma_N + \pi & \text{if } \gamma_N < \pi \end{cases}$
$c_a$ , coefficiente dei fattori di inclinazione	-	$c_a = -\arctan\left(\frac{fy}{fx}\right)$