

# Dati climatici “G.DE GIORGIO”

## Introduzione

Nella progettazione dei sistemi di conversione e utilizzazione dell'energia solare, sia attivi che passivi, così come nella valutazione energetica del sistema edificio o edificio impianto, occorre disporre dei dati orari delle grandezze meteorologiche per il sito geografico in esame.

Le grandezze necessarie sono la radiazione solare, nelle sue componenti diretta e diffusa sul piano orizzontale, la temperatura, l'umidità relativa e la velocità dell'aria.

Perché tali valutazioni energetiche siano significative le distribuzioni orarie delle grandezze meteorologiche devono rappresentare le sequenze temporali più probabili. Per ottenere ciò occorre costruire un anno tipo utilizzando serie statistiche di dati climatici su base possibilmente ventennale.

## Dati climatici del Progetto Finalizzato Energetica

La costruzione di sequenze orarie di dati climatici più probabili, e quindi dell'anno tipo, per vari siti in Italia è stata affrontata nel Progetto Finalizzato Energetica nel 1979 [1] [2] dall'IFA (Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNR) nel seguente modo. Utilizzando i dati provenienti dalle stazioni del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (68 stazioni sparse in modo piuttosto omogeneo sul territorio nazionale), raccolti in maniera praticamente continua nel periodo 1951-1970, sono state calcolate, per ogni stazione, il valore medio e varianza della temperatura dell'aria per ogni mese dell'anno sull'intera popolazione. La stessa operazione è stata poi ripetuta per ogni singolo mese di ogni singolo anno. È stato quindi selezionato quale mese tipo più rappresentativo quello con valore medio e varianza della temperatura dell'aria più prossimi ai valori calcolati per quel mese sull'intera popolazione. L'anno tipo è stato infine costruito come composizione dei mesi tipo.

Generato così l'anno tipo, che è costituito da una sequenza di mesi reali (cioè effettivamente verificatisi) provenienti da anni diversi, sono stati estratti dall'insieme dei dati e aggiunti alla temperatura dell'aria (dati orari ottenuti per interpolazione dai dati triorari) le altre grandezze meteorologiche:

- la velocità del vento a 10 metri dal suolo (data dalla media aritmetica calcolata nei 10 minuti centrati intorno all'ora sinottica a cui il valore si riferisce);
- l'umidità relativa dell'aria al suolo;
- il numero di ore e di decimi di ora di sole verificatisi nell'intera giornata.

A tali dati, disponibili per ognuna delle 68 stazioni è stata aggiunta quando disponibile (30 stazioni) la irradiazione solare totale giornaliera sul piano orizzontale (dato rilevato a partire dal 1958).

Tali anni tipo sono stati registrati su un nastro magnetico la cui reperibilità e disponibilità è risultata sempre più problematica.

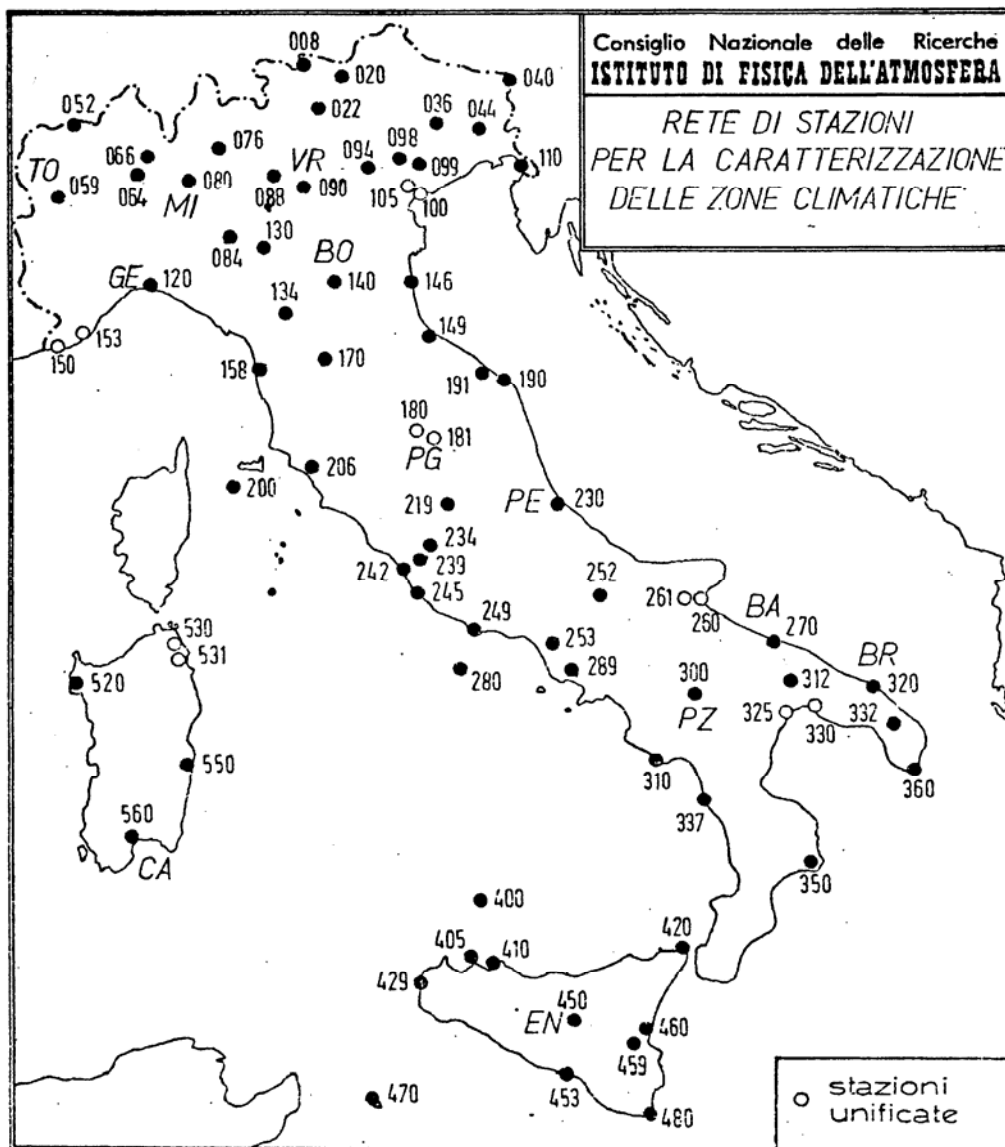
## Archivi anno tipo del CRTN

Uno degli Enti coinvolti nella definizione degli anni tipo per il PFE è stato il Centro di Ricerca Termica e Nucleare dell'ENEL (CRTN). Il CRTN ha conservato e successivamente rielaborato nel 1984 [3] tali dati climatici, attribuendo alle 38 stazioni prive di valori di irradiazione solare totale giornaliera i valori delle stazioni più prossime secondo lo schema riportato in [3].

Il CRTN ha poi generato un nuovo nastro con anni tipo decomponendo l'irradiazione solare totale giornaliera sul piano orizzontale nelle componenti diretta e diffusa e ripartendo tali componenti, ora per ora, sulla durata del giorno. A tale scopo è stato utilizzato un metodo proprio, descritto in [3] è basato sul numero di ore di sole giornaliere.

STAZIONI	ANNI RILEVAMENT I	Latitudine	Longitud.	Altez. s.l.m.	Cod.	N. File
PASSO RESIA		46° 45'	10° 32'	1459	008	1
BOLZANO	1951-1970	46° 28'	11° 20'	241	020	2
PAGANELLA	1965-1970	46° 09'	11° 02'	2129	022	3
AVIANO	1965-1970	46° 02'	12° 36'	128	036	4
TARVISIO	1951-1967	46° 30'	13° 35'	778	040	5
UDINE	1966-1970	46° 02'	13° 11'	92	044	6
PIAN ROSA'	1952-1970	45° 56'	7° 42'	3488	052	7
TORINO	1951-1970	45° 11'	7° 39'	282	059	8
NOVARA CAMERI		45° 39'	8° 40'	178	064	9
MILANO MALPENSA	1951-1970	45° 37'	8° 44'	211	066	10
BERGAMO		45° 40'	9° 42'	238	076	11
MILANO LINATE	1951-1970	45° 26'	9° 17'	103	080	12
PIACENZA	1967-1975	44° 55'	9° 44'	134	084	13
BRESCIA	1970-1975	45° 25'	10° 17'	102	088	14
VERONA	1951-1967	45° 23'	10° 52'	68	090	15
VICENZA		45° 34'	11° 31'	39	094	16
TREVISIO ISTRANA		45° 41'	12° 06'	45	098	17
TREVISIO S.ANGELO		45° 39'	12° 11'	18	099	18
VENEZIA	1951-1970	45° 30'	12° 20'	10	105B	19
TRIESTE	1951-1970	45° 39'	13° 45'	20	110	20
GENOVA	1951-1970	44° 25'	8° 51'	3	120	21
PARMA	1968-1975				130	22
MONTE CIMONE	1951-1970	44° 12'	10° 42'	2137	134	23
BOLOGNA	1968-1975	44° 32'	11° 18'	49	140	24
MARINA DI RAVENNA	1968-1975	44° 28'	12° 17'	2	146	25
RIMINI	1960-1970	44° 02'	12° 37'	13	149	26
SANREMO	1951-1970	43° 57'	08° 10'	221	153B	27
PISA	1956-1970	43° 40'	10° 23'	1	158	28
FIRENZE	1951-1970	43° 48'	11° 12'	38	170	29
PERUGIA	1951-1970	43° 05'	12° 30'	213	181B	30

STAZIONI	ANNI RILEVAMENT I	Latitudine	Longitud.	Altez. s.l.m.	Cod.	N. File
ANCONA	1951-1970	43° 37'	13° 31'	105	190	31
ANCONA FALCONARA		43° 37'	13° 22'	12	191	32
PIANOSA	1951-1970	42° 35'	10° 06'	27	200	33
GROSSETO	1951-1970	42° 45'	11° 04'	7	206	34
MONTE TERMINILLO	1951-1970	42° 28'	12° 59'	1875	219	35
PESCARA	1959-1970	42° 51'	14° 12'	16	230	36
ROMA CIAMPINO	1951-1970	41° 48'	12° 35'	131	239	37
ROMA FIUMICINO	1951-1970	41° 48'	12° 14'	3	242	38
PRATICA DI MARE		41° 39'	12° 36'	6	245	39
CAMPOBASSO		41° 34'	14° 39'	793	252	40
FOGGIA	1951-1970	41° 25'	15° 32'	80	261B	41
BARI	1951-1970	41° 08'	16° 47'	49	270	42
PONZA	1951-1970	40° 55'	12° 57'	185	280	43
NAPOLI	1951-1970	40° 51'	14° 18'	72	289	44
POTENZA	1951-1970	40° 38'	15° 48'	843	300	45
CAPO PALINURO	1951-1970	40° 01'	15° 17'	185	310	46
GIOIA DEL COLLE		40° 46'	16° 56'	345	312	47
BRINDISI	1951-1970	40° 39'	17° 57'	10	320	48
TARANTO	1951-1967	40° 26'	16° 53'	12	325B	49
LECCE		40° 14'	18° 09'	48	332	50
BONIFATI		39° 35'	15° 53'	484	337	51
CROTONE	1951-1967	39° 04'	17° 04'	158	350	52
S.MARIA DI LEUCA	1951-1970	39° 39'	18° 21'	112	350	53
USTICA	1951-1970	38° 42'	13° 11'	251	400	54
PALERMO P.RAISI	1966-1970	38° 11'	13° 06'	21	405	55
PALERMO BOCCA F.	1966-1970	38° 11'	13° 06'	21	410	56
MESSINA		38° 12'	15° 33'	59	420	57
TRAPANI BIRGI		37° 55'	12° 30'	7	429	58
ENNA	1951-1970	37° 34'	14° 17'	965	450	59
GELA		37° 05'	14° 13'	11	453	60
CATANIA SIGONELLA		37° 24'	14° 55'	22	459	61
CATANIA FONTANAR.	1951-1970	37° 28'	15° 03'	17	460	62
PATELLERIA	1951-1970	36° 49'	11° 58'	170	470	63
COZZO SPADARO	1951-1970	36° 41'	15° 08'	51	480	64
ALGHERO	1951-1970	40° 38'	08° 17'	40	520	65
OLBIA	1051-1970	40° 56,	08° 30'	10	531B	66
CAPO BELLAVISTA	1951-1970	39° 56'	09° 43'	156	550	67
CAGLIARI	1951-1970	39° 15'	09° 03'	18	560	68



### Creazione dati climatici "Giovanni De Giorgio"

Un confronto tra le distribuzioni orarie di irradiazione solare diretta e diffusa, così come fornita dagli archivi CRTN, e quelle ottenibili a partire dallo stesso dato di irradiazione totale giornaliera e utilizzando le più note e affidabili correlazioni reperibili in letteratura [4] [5] [6] [7] [8] [9], ha mostrato come il metodo utilizzato dal CRTN comporta una sovrastima sistematica piuttosto consistente della radiazione diretta ( %).

Si è quindi ricostruito l'intero insieme degli anni tipo per ogni stazione sostituendo ai valori di irradiazione oraria diretta e diffusa calcolati dal CRTN i nuovi valori ricalcolati utilizzando le seguenti correlazioni:

1. Erbs [9] per la stima del rapporto tra irradiazione diffusa e totale giornaliera,  $K_T$ ;
2. Liu-Jordan [4] *modificata* per la stima del fattore di ripartizione della irradiazione diffusa giornaliera in irradiazione diffusa oraria,  $r_d$ ;
3. Collares-Pereira e Rabl [8] *modificata* per la stima del fattore di ripartizione della irradiazione totale giornaliera in irradiazione totale oraria,  $r_t$ .

In particolare sono stati costruiti due diversi insiemi di anni tipo per le 67 stazioni disponibili (i dati di una stazione sono risultati incompleti sul nastro originario del CRTN), uno con dati riferiti al tempo

standard, uno con i dati riferiti al tempo solare. In quest'ultimo caso i dati di temperatura, umidità e velocità dell'aria sono stati traslati utilizzando una interpolazione con spline cubica.

### Irradiazione oraria diffusa in funzione della irradiazione diffusa giornaliera

Un metodo di derivazione della distribuzione della radiazione lungo l'arco della giornata a partire dalla irradiazione giornaliera è stato sviluppato da Liu-Jordan [4] sull'ipotesi che il rapporto tra l'irradiazione solare oraria diffusa sul piano orizzontale,  $I_{d,h}$ , e l'irradiazione diffusa giornaliera,  $H_{d,h}$ , sia approssimabile con il rapporto tra l'irradianza su un piano orizzontale *in assenza* dell'atmosfera (*irradianza solare orizzontale in assenza di atmosfera*,  $G_o$ ) in un certo istante considerata costante per un ora e l'irradiazione giornaliera sullo stesso piano (*irradiazione solare giornaliera orizzontale in assenza di atmosfera*,  $H_o$ ):

$$r_d = \frac{I_{d,h}}{H_{d,h}} \cong \frac{G_o \cdot 3600}{H_o} \quad 1)$$

Da

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad 2)$$

e per

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad 3)$$

dove  $\omega_s$  è l'angolo orario di alba e tramonto, si ottiene:

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s) \quad 4)$$

Integrando tra l'alba e il tramonto si ottiene:

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \quad 5)$$

per

$$\omega = (t - 12) \cdot 15 \frac{\pi}{180} = \frac{\pi}{12} (t - 12) \quad [\text{rad}] \quad \text{con } t \text{ in ore} \quad 6)$$

Il rapporto tra la 4) e la 6) rappresenta il coefficiente  $r_d$  così come definito da Liu e Jordan:

$$r_d = \frac{\pi \cos \omega - \cos \omega_s}{24 \sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad 7)$$

dove  $\omega$  viene assunto essere il valore medio aritmetico tra gli estremi del periodo temporale considerato (es.  $r_d$  alle ore 11 è calcolato con  $\omega = (\omega_1 + \omega_0)/2$ ).

La 7) rappresenta un rapporto tra un integrale orario, rappresentato, tramite il teorema della media, dal valore medio dell'integrando nel periodo considerato per l'intervallo di integrazione,  $I_o = G_o \cdot 3600$  (dove quindi  $G_o$  rappresenta il valore medio sull'ora) e un'integrazione sull'intero giorno,  $H_o$ . Essendo poi  $G_o$  funzione trascendente di  $\omega$ , non è sufficiente assumere per  $\omega$  la sua media aritmetica per ottenere il valore medio di  $G_o$  sull'ora.

La diretta conseguenza della formulazione 7) del rapporto  $r_d$  è che la sua *somma* tra l'ora d'alba e tramonto *non risulta mai unitaria* come dovrebbe essere:

$$\sum_{-\omega_s}^{\omega_s} r_d^{eq.7)}(\omega) \neq 1 \quad 8)$$

introducendo quindi un errore nella costruzione della irradiazione oraria diffusa a partire dalla irradiazione diffusa giornaliera.

Per eliminare tale errore è sufficiente sostituire al valore medio per l'intervallo d'integrazione l'effettiva integrazione della irradianza solare sull'ora.

Integrando su un ora la 4) si ottiene:

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1 - (\omega_2 - \omega_1) \cos \omega_s) \quad 9)$$

dove  $\omega_2$  e  $\omega_1$  sono gli angoli orari agli estremi dell'intervallo di un ora.

Approssimando quindi il rapporto  $r_d$  come:

$$r_d = \frac{I_{d,h}}{H_{d,h}} \cong \frac{I_o}{H_o} \quad 10)$$

si ottiene:

$$r_d = \frac{1}{2} \frac{\sin \omega_2 - \sin \omega_1 - (\omega_2 - \omega_1) \cdot \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (11)$$

equazione che rispetta a pieno la condizione:

$$\sum_{-\omega_s}^{\omega_s} r_d^{eq.11}(\omega) = 1 \quad (12)$$

avendo l'accortezza di prendere all'alba  $\omega_1 = -\omega_s$  e al tramonto  $\omega_2 = \omega_s$ .

## Irradiazione oraria totale in funzione della irradiazione totale giornaliera

Basandosi su un'analisi statistica della distribuzione temporale sull'arco della giornata della irradiazione totale giornaliera dei dati di Whillier [5, 6] e Hottel e Whillier [7], Liu e Jordan [4] hanno poi prodotto dei grafici che rappresentano il rapporto tra l'irradiazione totale oraria e la totale giornaliera su un piano orizzontale,  $r_t$ , in funzione dell'ora del giorno. Tali grafici sono basati sull'ipotesi di assumere la distribuzione giornaliera simmetrica rispetto al mezzogiorno solare e di riferire l'angolo orario alla mezzora antecedente il valore nominale del tempo (es. il valore attribuito alle 14 è riferito l'angolo orario delle 13 e 30').

Collares-Pereira e Rabl [8] hanno successivamente esplicitato una forma analitica di tali grafici sperimentali, come segue:

$$r_t = \frac{I_h}{H_h} \cong \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} = (a + b \cos \omega) \frac{G_o \cdot 3600}{H_o} \quad (13)$$

dove  $\omega$  va calcolato come valore medio aritmetico tra gli estremi del periodo temporale considerato (es.  $r_d$  alle ore 11 è calcolato con  $\omega = (\omega_{11} + \omega_{10})/2$ ) e con

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - \pi/3) \quad (14)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - \pi/3) \quad (16)$$

Essi hanno effettuato un "curve fitting" assumendo come forma funzionale base  $r_d(\omega)$ , così come definito dall'equazione 7), moltiplicato per una funzione lineare di  $\cos \omega$ . La conseguenza di tale scelta è, anche per quanto visto in precedenza, che il rapporto  $r_t$  non rispetta la condizione:

$$\sum_{-\omega_s}^{\omega_s} r_t^{eq.13}(\omega) = 1 \quad (17)$$

introducendo quindi un errore nella costruzione della irradiazione oraria totale a partire dalla irradiazione totale giornaliera.

Il problema può essere risolto, in modo analogo al caso, precedente sostituendo quello che può essere interpretato come il valore medio dell'irradianza totale sul piano orizzontale per l'intervallo d'integrazione con il suo integrale orario.

Nell'ipotesi di assumere che il numeratore della 13) sia *proporzionale* all'irradianza totale sul piano orizzontale, si ha:

$$G_h \propto (a + b \cos \omega) \cdot G_o = (a + b \cos \omega) \cdot G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s) \quad (18)$$

integrando su un'ora si ottiene:

$$I_h \propto \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot \left\{ a \cdot [\sin \omega_2 - \sin \omega_1 - (\omega_2 - \omega_1) \cos \omega_s] + \right. \\ \left. + b \cdot \left[ \frac{1}{2} (\omega_2 - \omega_1) + \frac{1}{4} (\sin 2\omega_2 - \sin 2\omega_1) - (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \cos \omega_s \right] \right\} \quad (19)$$

Perché la normalizzazione si poi completa occorre ricalcolare il valore dell'irradiazione giornaliera che compare a denominatore di  $r_t$ .

Integrando allora la 18) tra l'ora d'alba e tramonto si ottiene:

$$H_h \propto \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta) \cdot \left\{ a \cdot [\sin \omega_s - \sin \omega_s \cos \omega_s] + \right. \\ \left. + b \cdot \left[ \frac{\omega_s}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\omega_s - \sin \omega_s \cos \omega_s \right] \right\} \quad (20)$$

Dividendo infine la 19) per la 20) si ottiene:

$$r_t = \frac{I_h}{H_h} \cong \frac{1}{2} \frac{a \cdot [\sin \omega_2 - \sin \omega_1 - (\omega_2 - \omega_1) \cos \omega_s] + b \cdot \left[ \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1) + \frac{1}{4}(\sin 2\omega_2 - \sin 2\omega_1) - \right.}{a \cdot [\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s] + b \cdot \left[ \frac{\omega_s}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\omega_s - \sin \omega_s \cos \omega_s \right]} \left. - (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \cos \omega_s \right] \quad 21)$$

un rapporto di ripartizione oraria della irradiazione totale giornaliera che rispetta la condizione

$$\sum_{-\omega_s}^{\omega_s} r_t^{eq.21)}(\omega) = 1 \quad 17)$$

avendo l'accortezza di prendere all'alba  $\omega_1 = -\omega_s$  e al tramonto  $\omega_2 = \omega_s$ .

## Formato archivi

I due distinti insiemi di archivi climatici, Wxx.dat, dati orari riferiti al tempo standard, e SWxx.dat, dati orari riferiti al tempo solare, (dove xx è il numero della stazione) sono dei files ASCII in cui ogni record (riga) è riferito ad una specifica ora di un certo giorno dell'anno.

I dati riportati in ogni record sono rispettivamente:

1. Numero del mese;
2. Numero del giorno nel mese;
3. Ora del giorno;
4. Irradiazione oraria diretta sul piano orizzontale in  $\text{kJ/m}^2$ ;
5. Irradiazione oraria diffusa sul piano orizzontale in  $\text{kJ/m}^2$ ;
6. Temperatura dell'aria in  $^{\circ}\text{C}$ ;
7. Velocità dell'aria in  $\text{m/s}$ ;
8. Umidità relativa in %.

Il formato di lettura, facendo riferimento alla codifica FORTRAN, è: I2,I2,I2,F7.2,F7.2,F5.1,F5.1,F5.1

## Bibliografia

- [1] M. Pagliarini, F. Parrini - Definizione delle zone climatiche - Atti del II seminario informativo - CNR - PFE - RERE - Milano 5-6/03/79
- [2] A. Lavagnini, M. Pagliarini, F. Parrini - Definizione delle zone climatiche - Atti del III seminario informativo - CNR - PFE - RERE - Milano 3-4/03/80
- [3] M. Alabiso, R. Sidri - Gestione archivi anni tipo - Rap. Interno E1/85/05 - Enel - DSR-CRTN - Milano - Agosto 1984
- [4] Liu, B. Y. H. e R. C. Jordan, *Solar Energy*, **4** (3),1 (1960). "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation"
- [5] Whillier, A., *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Series B, **7**, 197 (1956). "The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations."
- [6] Whillier, A., *Solar Energy*, **9**, 164 (1965). "Solar Radiation Graphs"
- [7] Hottel, H.C. and Whillier, A., in *Trans. On the Conference of Use of Solar Energy*, 2, 74, University of Arizona Press (1958). "Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance".

- [8] Collares-Pereira, M. e A. Rabl, *Solar Energy*, **22**, 175 (1979). “The Average Distribution of Solar Radiation- Correlation Between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values”
- [9] Erbs, D.G., S.A. Kein e J.A. Duffie, *Solar Energy*, **28**, 293 (1982). Estimation of the Diffuse Solar Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radioation”