



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Elaborazioni di dati e indici climatici per le
valutazioni energetiche e la previsione della
producibilità da fonti rinnovabili.
Parte seconda

F. Spinelli, I. Balog, G. Caputo,
D. Iatauro, P. Signoretti

Report RdS/PTR2020/118

ELABORAZIONI DI DATI E INDICI CLIMATICI PER LE VALUTAZIONI ENERGETICHE E LA PREVISIONE DELLA PRODUCIBILITÀ DA FONTI RINNOVABILI. PARTE SECONDA

F. Spinelli, I. Balog, G. Caputo, D. Iatauro, P. Signoretti (ENEA)

Con il contributo di: A. Benedetti, G. Canneto, C. Felici, R. Siviero

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.24 - Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili – Annualità 2*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO / SUMMARY	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 I DATI CLIMATICI NEL CALCOLO DEI FABBISOGNI ENERGETICI: RICHIAMI NORMATIVI	5
1.2 OBIETTIVI DELLA SECONDA ANNUALITÀ	6
2 LE GRANDEZZE METEOCLIMATICHE	8
3 METODI DI <i>DOWNSCALING</i> TEMPORALE.....	10
3.1 INTERPOLAZIONE ATTRAVERSO LE FUNZIONI <i>SPLINES</i> (CENNI).....	10
3.1.1 <i>Funzioni splines lineari</i>	11
3.1.2 <i>Funzioni splines quadratiche</i>	12
3.1.3 <i>Funzioni splines cubiche</i>	14
3.1.4 <i>Funzioni splines di Hermite</i>	14
3.2 METODI DI FITTING ED INTERPOLAZIONE DATI IN AMBIENTE MATLAB.....	15
3.3 METODI D'INTERPOLAZIONE PER LE IRRADIANZE.....	20
4 VALIDAZIONE DELLE METODOLOGIE INDIVIDUATE.....	31
4.1 DESCRIZIONE DELLA FONTE DEI DATI E LORO TIPOLOGIA.....	31
4.2 IPOTESI DI RICOSTRUZIONE DEI <i>MISSING VALUES</i> DI TEMPERATURA, PRESSIONE E UMIDITÀ.....	31
4.3 VALIDAZIONE DELLE METODOLOGIE UTILIZZATE.....	34
4.3.1 <i>Procedura seguita e richiami sugli indicatori statistici di accostamento utilizzati</i>	34
4.3.2 <i>Temperatura</i>	35
4.3.3 <i>Umidità massica</i>	37
4.3.4 <i>Irradianze</i>	38
5 <i>DOWNSCALING</i> TEMPORALE DELL'ANNO METEOROLOGICO TIPICO.....	45
6 PRODUZIONE DEGLI ANNI METEOROLOGICI TIPICI SUB-ORARI.....	47
6.1 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA.....	47
6.2 GRAFICI DI SINTESI DELLE GRANDEZZE SUB-ORARIE ELABORATE PER I CAPOLUOGHI DI REGIONE ITALIANI.....	52
6.2.1 <i>Temperature e umidità</i>	53
6.2.2 <i>Irradianze</i>	74
7 CONCLUSIONI.....	116
APPENDICE. DESCRIZIONE DELL'ANNO METEOROLOGICO TIPICO (CENNO).....	118
SIGLE, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA	119
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA / <i>REFERENCES</i>	122

Sommario / Summary

L'attività svolta è finalizzata all'elaborazione di grandezze climatiche a ridotta scala temporale da utilizzare nell'analisi energetica degli edifici ad alta efficienza. Le normative tecniche nazionali, UNI 10349-1-2-3, adottate in ambito delle Direttive Europee EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*), forniscono dati climatici a livello mensile e orario per le principali grandezze che influiscono nel bilancio energetico degli edifici, ma non rendono disponibili, ad oggi, grandezze climatiche a scala sub-oraria. L'evoluzione dei metodi di calcolo per il fabbisogno energetico degli edifici, verso metodi più accurati, quali quelli di tipo dinamico, rende necessaria una maggior accuratezza anche nei dati di input utilizzati nelle simulazioni termoenergetiche.

In quest'ottica, la disponibilità di dati climatici a scala temporale ridotta consentirebbe di utilizzare al meglio i sistemi di calcolo più fini, in crescente diffusione. E sarebbe particolarmente rilevante nel caso in cui siano installati impianti basati sull'utilizzo di fonti rinnovabili quali: pompe di calore, pannelli solari termici, moduli fotovoltaici, ecc. il cui rendimento dipende strettamente dalle variazioni climatiche del sito in cui l'edificio si trova.

Nel corso della seconda annualità, descritta nel presente report, i modelli di *downscaling*, individuati in precedenza, sono stati applicati per ricavare grandezze climatiche sub-orarie partendo dai corrispondenti valori a scala oraria della UNI 10349. In particolare, metodologie di interpolazione di tipo *spline* sono state utilizzate per la *temperatura* e l'*umidità* mentre modelli di elaborazione basati su parametri fisici, sono stati applicati per la radiazione solare che dipende dalle differenti condizioni di cielo. Le grandezze ricavate, validate con le misure al minuto relative alla città di Roma, sono state riportate per tutti i capoluoghi di regione a tre differenti scale sub-orarie.

Gli anni-tipo (*Typical Meteorological Years, TMYs*), potranno in seguito essere ricavati per tutti i comuni italiani ed essere inseriti nel database climatico Solaritaly sviluppato da ENEA.

Summary

This study is aimed at statistical downscaling of climatic quantities to be used in the energy analysis of high efficiency buildings. The national technical standards, UNI 10349-1-2-3, used in the EPBD framework (*Energy Performance of Buildings Directive*), provide monthly climate data and cumulative indicators (*Heating Degree Day, Climate Severity Index, etc*) for the main quantities that affect the energy balance of the buildings, but no climatic quantities are available at moment on a sub-hourly scale.

The application of advanced calculation methods for the energy needs of buildings, such as dynamic methods, requires more accurate input data for thermo-energy simulations. In this perspective, the availability of climate data on a lower time scale would allow the best use of the finest calculation systems, which are becoming increasingly popular. This aspect is also particularly relevant if plants based on the use of renewable sources are installed such as: heat pumps, photovoltaic modules, solar systems, etc. whose performance are strictly linked at the climatic variations of the site where the building is located.

During the second year, as reported in this report, the previously identified downscaling models were applied to derive sub-hourly climatic quantities, starting from the corresponding hourly scale values of UNI 10349. In particular, *spline* interpolation methodologies have been used for temperature and humidity while calculation models, based on physical parameters, have been applied for solar radiation which depends on different sky conditions.

The quantities obtained, validated with the minute measurements for the city of Rome, were reported for all the Italian regional capitals at three different sub-hourly scales. Subsequently it will be possible to obtain the TRY (Typical reference years, TRY) for all Italian municipalities and extend the Solaritaly climate database, developed by ENEA.

*“I dettagli fanno la perfezione e la perfezione non è un dettaglio”
(Leonardo da Vinci)*

1 Introduzione

1.1 I dati climatici nel calcolo dei fabbisogni energetici: richiami normativi

La disponibilità di dati climatici, a opportuna scala temporale, è essenziale nelle valutazioni del fabbisogno energetico degli edifici, in quanto, come noto, l'energia necessaria per la climatizzazione che essi richiedono dipende fortemente dal contesto climatico in cui questi si trovano.

Nel corso degli anni, il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici è stato basato prevalentemente su metodi di calcolo semi-stazionari, in cui sono utilizzati i dati climatici forniti dalla norma UNI 10349/94, che consentivano di ricavare, per le varie località, i valori mensili delle variabili climatiche che maggiormente influenzano il bilancio energetico degli edifici: *temperatura, pressione di vapore, umidità specifica, irradiazione solare, velocità del vento.*

D'altra parte, le variabili climatiche, e in particolare la temperatura, sono alla base della zonizzazione climatica del territorio nazionale prevista dalle attuali normative sull'efficienza energetica nel settore degli edifici. I requisiti minimi per l'involucro edilizio, in caso di nuove costruzioni o riqualificazioni (DM 26/6 2015), sono infatti fissati proprio in funzione della classe climatica di appartenenza della località in cui l'edificio si trova.

La classificazione del territorio nazionale è stata effettuata nei primi anni Novanta (Dlgs. 412/93) ed è basata sui Gradi-Giorno (GG), indicatore climatico ricavato dalle serie temporali di temperatura raccolte nei decenni precedenti. In base alla zonizzazione eseguita, il territorio italiano è stato suddiviso in 6 fasce climatiche, dalla A alla F, per le quali è stato inoltre fissato anche il periodo di climatizzazione invernale.

Nelle attuali normative UNI 10349-1-2-3, aggiornate nel 2016, le principali grandezze climatiche sono state ricalcolate, a partire da dati orari, secondo la metodologia degli *anni meteorologici tipici* (AMT)¹, in accordo alla norma internazionale EN ISO 15927-4, recepita in ambito UNI.

In particolare, le norme 10349 sono così articolate:

- **UNI 10349-1**
Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termoenergetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradiazione solare oraria nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradiazione solare su di una superficie inclinata.
- **UNI 10349-2**
Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 2: Dati di progetto.
- **UNI 10349-3**
Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici.

La UNI 10349-1 fornisce le medie mensili e gli anni-tipo delle principali grandezze climatiche da utilizzare per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici relative a 110 località italiane, in cui si trovano le stazioni di rilevamento dei dati (spesso, ma non sempre, le località coincidono con i capoluoghi di provincia). Sono inoltre riportati in appendice:

¹ Anche, brevemente: *anni-tipo*. In inglese: *Typical Meteorological Year (TMY)* [dicitura americana] o *Test Reference Year (TRY)* [nella versione europea].

- La metodologia per la ripartizione dell'irradianza solare oraria (componenti: globale, diretta e diffusa su di una superficie comunque inclinata ed orientata (modello di cielo isotropo));
- Il calcolo dell'irradianza solare su di una superficie comunque inclinata ed orientata con modello di cielo di Perez (non isotropo);
- La metodologia di calcolo dell'irradiazione solare media mensile ricevuta da una superficie fissa comunque inclinata ed orientata.

La UNI/TR 10349-2 fornisce invece, per le stesse grandezze, i valori di riferimento da utilizzare per la progettazione degli impianti di climatizzazione degli edifici. Tali valori sono quindi quelli necessari per far fronte ai valori di picco delle variabili climatiche esterne, e quindi per un corretto dimensionamento dei generatori.

La UNI 10349-3 fornisce valori di riferimento e i metodi di calcolo di alcuni di indicatori climatici caratteristici per le località in esame, quali: *Differenze di temperature cumulate a livello orario, per il periodo invernale ed estivo (Gradi Giorno invernali ed estivi)*, *Differenza di umidità massica cumulata*, *Radiazione solare cumulata*, *Indice di Severità Climatica*.

Tali indicatori possono essere utilizzati sia per valutazioni di massima legate al consumo energetico degli edifici, sia per la zonizzazione del territorio.

È importante sottolineare che l'attuale classificazione climatica italiana è quella definita dal D.P.R. n. 412/1993, come precedentemente detto. L'eventuale rimodulazione in base a indicatori climatici aggiornati, e le possibili implicazioni sul piano delle prescrizioni normative fissate per il settore edifici, saranno oggetto di studio della terza annualità del presente lavoro.

1.2 Obiettivi della seconda annualità

Le attività del presente report sono un'applicazione dei modelli per il *downscaling* temporale delle grandezze climatiche temperatura, umidità specifica e irradianza solare individuati nella precedente annualità. Lo sviluppo dei modelli realizzati è derivato dallo studio della variabilità di queste grandezze climatiche, attraverso l'analisi statistica dei dati sperimentali misurati dalle centraline installate nel C.R. ENEA della Casaccia (Roma).

Sono due i principali obiettivi che ci si propone:

- 1) messa a punto, validazione e implementazione di una metodologia d'interpolazione sub-oraria, fino al minuto, applicabile a dati meteorologici già disponibili con frequenza oraria. La procedura generale deve potersi applicare a serie temporali di qualsivoglia lunghezza: giornaliera, mensile, annua, pluriennale o di qualunque altro intervallo o estremi di inizio o fine;
- 2) applicazione della nuova metodologia alla costruzione di anni-tipo con differenti frequenze sub-orarie — ovvero a 10, 15 e 20 minuti — riferiti a un numero di località adeguato a rappresentare l'intero territorio nazionale, a partire dagli "Anni tipo climatici per applicazioni termotecniche" predisposti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) su base oraria, nell'ambito della propria attività di normazione [1,2,3,4,5].

Alle grandezze climatiche della temperatura e dell'umidità specifica, caratterizzate da una minore variabilità temporale, saranno applicati come modelli per il *downscaling temporale*, i metodi di interpolazione di tipo *spline*. Per questo tipo di interpolazione, saranno preliminarmente confrontate, in ambiente MATLAB, differenti metodologie (*spline cubica*, *spline lineare*, *PCHIP*), al fine di individuare un approccio che garantisca la maggior accuratezza ai dati sub-orari elaborati. Tali aspetti saranno meglio esposti nel capitolo 3, nel quale sono riportati anche dei richiami della teoria matematica alla base delle metodologie individuate.

Diversamente dalla temperatura e umidità, la radiazione solare presenta una variabilità irregolare tale da non lasciarsi modellare soddisfacentemente con meri metodi matematici (*splines*). Per questo motivo, per le tre irradianze solari — globale, diretta e diffusa — sarà proposto un nuovo modello che tenga in esplicito conto degli aspetti fisici dei fenomeni atmosferici, e tale modello sarà messo a confronto con quelli reperiti in letteratura e studiati nel corso dell'annualità precedente.

2 Le grandezze meteoclimatiche

Le grandezze meteoclimatiche considerate in questo lavoro di *downscaling* da orario a sub-orario, e che influenzano maggiormente il bilancio energetico degli edifici o le prestazioni degli impianti di potenza, sono le seguenti:

- la temperatura dell'aria,
- l'umidità specifica (o massica) e
- l'irradianza solare al suolo.

L'umidità specifica X non viene misurata direttamente ma calcolata a partire dall'umidità relativa φ , dalla pressione atmosferica p e dalla temperatura dell'aria T [6]. La formula per il calcolo è la seguente:

$$X \left[\frac{g_{acqua}}{kg_{aria}} \right] = \begin{cases} \frac{622 \times \varphi}{\left(\frac{p}{610} e^{-\frac{17.269 \times T}{237.3+T}} \right) - \varphi} & \text{per } T \geq 0^\circ \\ \frac{622 \times \varphi}{\left(\frac{p}{610} e^{-\frac{21.875 \times T}{265.6+T}} \right) - \varphi} & \text{per } T < 0^\circ \end{cases} \quad (1)$$

A sua volta, l'irradianza solare misurata al suolo dipende dalla giacitura (orientamento) della superficie ricevente e si compone di una parte diretta e una diffusa. La somma è l'irradianza globale. Con riferimento alla superficie orizzontale, avremo pertanto:

- l'irradianza orizzontale globale (*Global Horizontal Irradiance*, acronimo GHI, simbolo I);
- l'irradianza orizzontale diretta (acronimo DrHI, simbolo I_b);
- l'irradianza orizzontale diffusa (acronimo DfHI, simbolo I_d).

Per come sono state definite, le tre irradianze solari orizzontali sono legate dalla relazione:

$$I = I_b + I_d \quad (2)$$

Come si è detto, i valori d'irradianza dipendono dall'orientamento della superficie captante; la (2), in particolare, è scritta con riferimento alla superficie del piano orizzontale. Negli impianti di potenza a concentrazione, in cui si sfrutta esclusivamente la componente diretta, le prestazioni d'impianto sono tanto più elevate quanto più la direzione di provenienza dei raggi solari è perpendicolare agli specchi captanti e pertanto, compatibilmente con i vincoli costruttivi, si cerca di avvicinarsi il più possibile a questa situazione ottimale². Per questo motivo viene normalmente definita anche l'irradianza solare diretta che incide la superficie captante disposta perpendicolarmente ai raggi solari, usualmente detta irradianza solare diretta normale (*Direct Normal Irradiance*, acronimo DNI, simbolo I_{bn}). La relazione fra DNI e DrHI è la seguente:

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos \vartheta_z} \quad (3)$$

da cui anche:

$$I = I_{bn} \cdot \cos \vartheta_z + I_d \quad (4)$$

² Va da sé che, poiché la posizione del Sole si sposta nel cielo durante il giorno, gli specchi che captano l'irradianza solare diretta, dovendo "inseguire" la posizione dell'astro, devono alloggiare su dispositivi dotati di movimento.

Nelle formule precedenti, con ϑ_z è stato indicato l'angolo zenitale, ovvero l'angolo fra la verticale (= asse perpendicolare piano orizzontale) e la direzione continuamente variabile nel tempo dei raggi solari.

Per completare questo sintetico *excursus* tassonomico sulle grandezze studiate, occorre aggiungere che è utile distinguere fra irradianza (= potenza per unità di superficie) e irradiazione (= energia per unità di superficie): così si hanno irradianze riferite a singoli istanti e irradiazioni riferite invece a un intervallo temporale finito: orario, giornaliero, mensile, annuo.³

³ Comprensibilmente, tutte le distinzioni classificatorie viste in precedenza (globale, diretta e diffusa; orizzontale o normale ecc.) si applicano indifferentemente e alle irradianze e alle irradiazioni.

3 Metodi di *downscaling* temporale

3.1 Interpolazione attraverso le funzioni *splines* (cenni)⁴

Il problema generale che si intende risolvere è quello di determinare un’espressione analitica del tipo

$$y = f(t)$$

per descrivere l’andamento temporale di una grandezza climatica esterna misurata (*temperatura, umidità, irradianza o irradiazione solare*) di cui conosciamo un numero finito di punti (Figura 1).

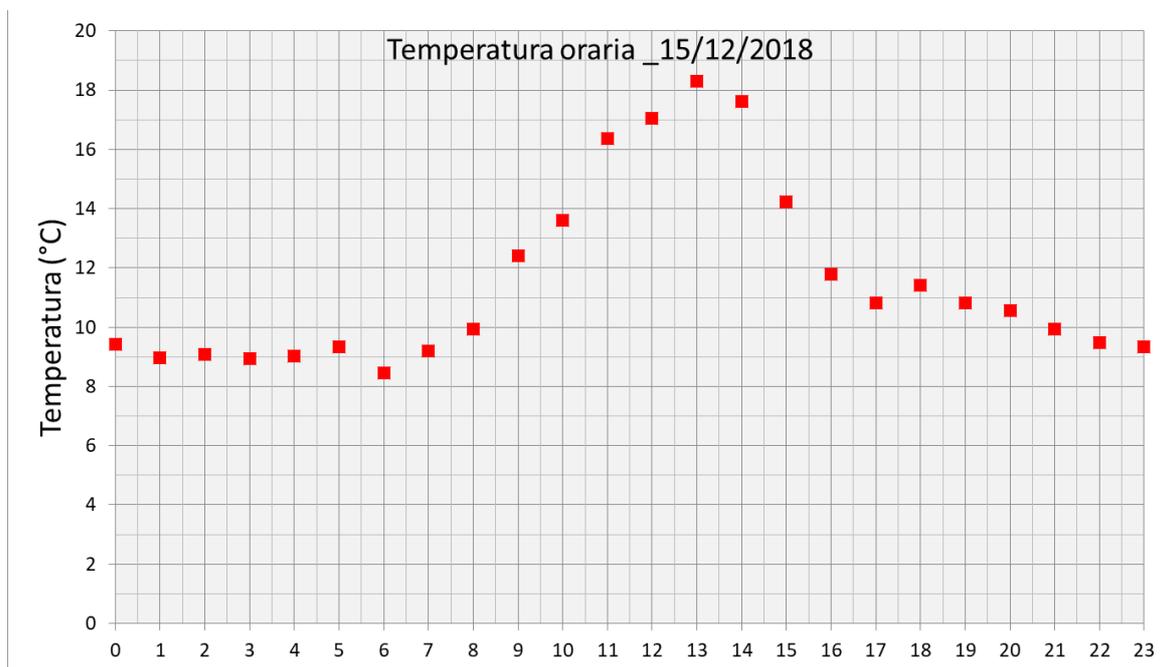


Figura 1

Una classe di funzioni molto utilizzata, per interpolare al meglio l’andamento discreto della grandezza misurata, è quella delle *funzioni splines* che consiste essenzialmente in un insieme di polinomi a tratti con specifica regolarità.

L’applicazione di questo tipo di funzioni prevede la suddivisione in sotto intervalli del campo di definizione della grandezza da interpolare $y=f(t)$, attraverso dei nodi detti di *nodi di spline*, e l’individuazione in ciascuno di questi sotto intervalli di una funzione polinomiale interpolante di grado n fissato.

La natura polinomiale dei singoli tratti della funzione interpolante $y = f(t)$ può comportare problemi di regolarità e di derivabilità della stessa funzione, in corrispondenza delle singolarità dei *nodi di spline*.

Per le finalità che ci siamo posti, utilizzeremo come nodi i punti misurati (valori orari), mentre come sotto intervalli quelli tra due punti consecutivi (valori orari consecutivi), che andremo ad interpolare con delle curve algebriche di tipo polinomiale di grado $n \leq 3$

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$$

⁴ Riferimenti bibliografici per questo paragrafo: [7,8,9].

Per le assunzioni fatte, i *nodi di spline* coincideranno con i nodi dell'interpolazione.

L'utilizzo di curve algebriche polinomiali di grado $n \leq 3$ consente l'applicazione di diverse interpolazioni di tipo *spline*:

- Funzioni *splines* lineari;
- Funzioni *splines* quadratiche;
- Funzioni *splines* cubiche;
- Funzioni *splines* di Hermite.

3.1.1 Funzioni *splines* lineari

Nelle funzioni *splines* lineari l'interpolazione tra due *valori orari consecutivi* viene realizzata attraverso una retta. Il polinomio corrispondente

$$f(x) = a + bx$$

ammette una soluzione univoca per ogni coppia di punti e la funzione complessiva (spezzata) è continua ma non derivabile in tutto l'intervallo.

In presenza di $N+1$ punti da interpolare $P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), \dots, P_N(x_N, y_N)$, si tratta di calcolare i coefficienti a_i e b_i , per ognuna delle N rette $f_i(x)$ tra le N coppie di punti consecutivi P_{i-1} e P_i ($i=1, 2, \dots, N$), attraverso le seguenti $2N$ relazioni:

$$a_i = \frac{x_i y_{i-1} - x_{i-1} y_i}{x_i - x_{i-1}} \quad b_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$

Esempio di *spline lineare* (Figura 2)

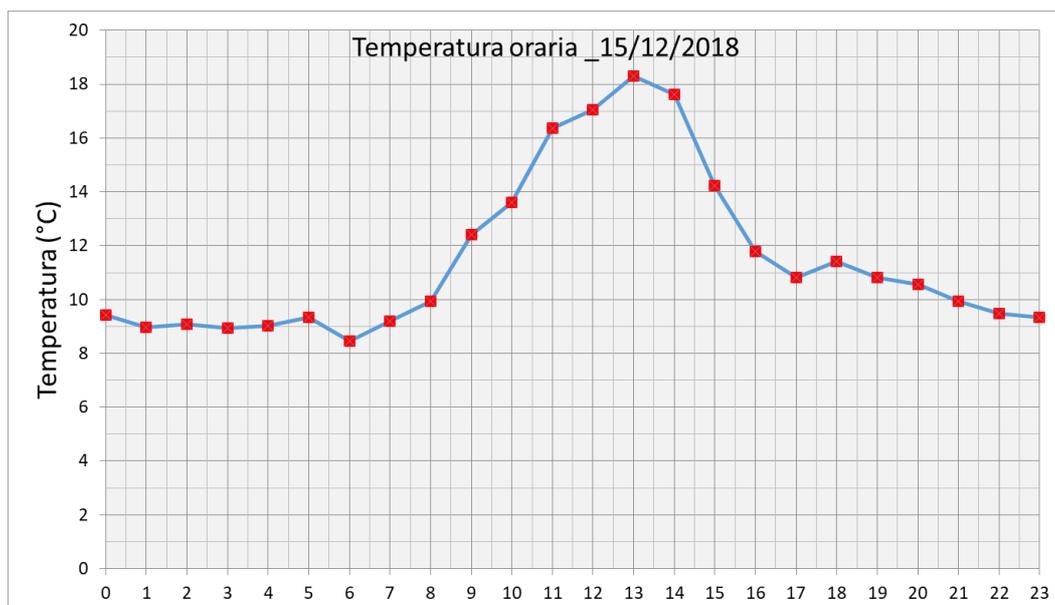


Figura 2

Nell'esempio proposto, l'equazione della generica retta interpolante, passante per due valori consecutivi della temperatura oraria nell'intervallo $(T_{i-1}$ e $T_i)$, $i=1 \div N$, può essere scritta nella forma:

$$T(t) = T_{i-1} + (T_i - T_{i-1}) \frac{t}{h} \quad \text{con } T_{i-1} \leq t \leq T_i$$

Il numero intero positivo h è variabile in funzione del valore sub-orario di temperatura che si vuole valutare (per *downscaling* pari a 1', 5' e 15' si ha rispettivamente $h = 60, 12, 4$)

3.1.2 Funzioni splines quadratiche

Nelle funzioni *splines* quadratiche l'interpolazione tra due nodi consecutivi è realizzata mediante una parabola (*curva quadratica*). Il polinomio corrispondente è:

$$f(x) = a + bx + cx^2$$

In presenza di $N+1$ punti da interpolare $P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), \dots, P_N(x_N, y_N)$, ognuna delle N curve $f_i(x)$ tra le N coppie di punti consecutivi P_{i-1} e P_i ($i = 1, 2, \dots, N$) introduce 3 incognite (a_i, b_i, c_i), per un totale quindi di $3N$ incognite complessive.

Per ciascuna delle N curve f_i — ognuna relativa all'intervallo $[P_{i-1}, P_i]$ — si possono imporre le due seguenti condizioni che garantiscono il passaggio della curva interpolante complessiva per gli $N+1$ punti

$$f_i(x_{i-1}) = y_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, N + 1$$

Questo porta ad avere un sistema di $2N$ equazioni con $3N$ incognite, quindi N dei coefficienti delle equazioni sono arbitrari. Per ovviare a ciò generalmente si impone l'esistenza in ogni punto dell'intervallo $[P_1, P_{N-1}]$ della derivata prima e pertanto in ogni punto P_1, P_2, \dots, P_{N-1} si uguagliano la derivata destra e sinistra:

$$f'_i(x_i^-) = f'_{i+1}(x_i^+) \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N - 1$$

ottenendo così $(N-1)$ nuove equazioni.

Il sistema risulta quindi costituito da $2N+(N-1) = 3N-1$ equazioni a disposizione con $3N$ incognite; rimane ancora un grado di libertà che solitamente si risolve imponendo la condizione $c = 0$ nell'intervallo $[x_0, x_1]$, ovvero la curva iniziale coincide con una retta

$$f_1(x) = a_1 + b_1x$$

Nel modo descritto si ottiene una soluzione univoca che deriva dalla risoluzione di un sistema lineare di $3N-1$ equazioni in altrettante incognite; la funzione risulta continua in tutto l'intervallo e derivabile in (P_0, P_N) ma l'andamento è spesso poco soddisfacente perché può produrre oscillazioni notevoli nell'intervallo interpolato.

Esempio

$N=2$ (3 punti)

	x	y
P_0	$x_0=1$	$y_0=1$
P_1	$x_1=2$	$y_1=5$
P_2	$x_2=3$	$y_2=3$

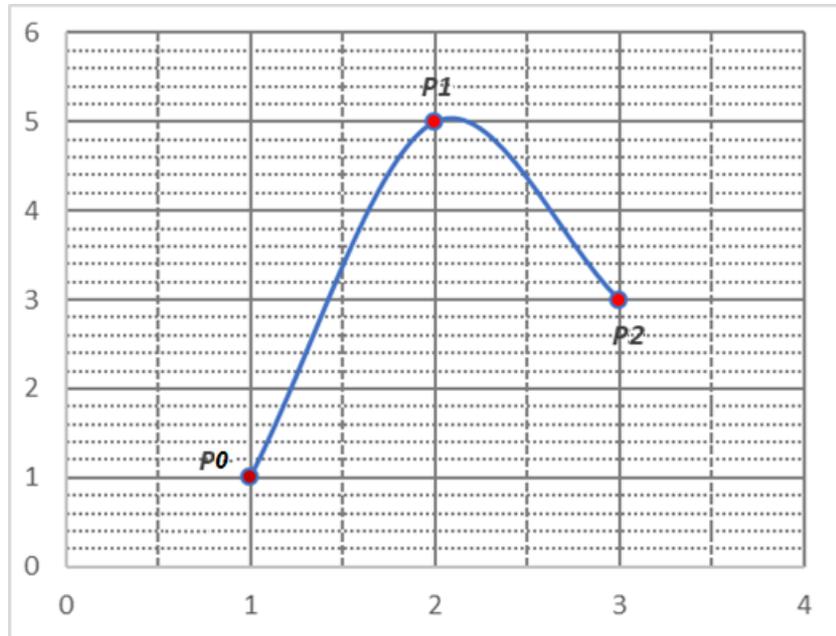


Figura 3 – Interpolazione quadratica

Curve tra i punti (P_0, P_1) e (P_1, P_2)

Curva 1: $f_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2$

Curva 2: $f_2(x) = a_2 + b_2x + c_2x^2$

Numero di incognite: $3N = 3 \times 2 = 6$ ovvero i coefficienti $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$

$N=2$ equazioni del tipo $y_i = f_i(x_i)$

$N=2$ equazioni del tipo $y_{i-1} = f_i(x_{i-1})$

$$y_1 = a_1 + b_1x_1 + c_1x_1^2 \text{ (valore della Curva 1 in } P_1) \quad y_0 = a_1 + b_1x_0 + c_1x_0^2 \text{ (valore della Curva 1 in } P_0)$$

$$y_2 = a_2 + b_2x_2 + c_2x_2^2 \text{ (valore della Curva 2 in } P_2) \quad y_1 = a_2 + b_2x_1 + c_2x_1^2 \text{ (valore della Curva 2 in } P_1)$$

$N-1 = (2-1) = 1$ equazione di esistenza della derivata prima nel punto P_1

$$y'_- = y'_+$$

$$y'_- = b_1 + 2c_1x_1 \text{ (valore della derivata sinistra della Curva 1 in } P_1)$$

$$y'_+ = b_2 + 2c_2x_1 \text{ (valore della derivata destra della Curva 2 in } P_1)$$

Le equazioni a disposizione sono 5 con 6 coefficienti incogniti; solitamente il numero di incognite si riduce di una unità ponendo $c_1=0$, ovvero imponendo che la Curva 1 degeneri in una retta.

3.1.3 Funzioni splines cubiche

Nelle funzioni *splines* cubiche l'interpolazione tra due nodi consecutivi viene realizzata attraverso una curva di terzo grado. Il polinomio corrispondente è:

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$$

In presenza di $N+1$ punti da interpolare $P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), \dots, P_N(x_N, y_N)$, ognuna delle N curve $f_i(x)$ tra le N coppie di punti consecutivi P_{i-1} e P_i ($i=1, 2, \dots, N$) introduce 4 incognite (a_i, b_i, c_i, d_i) per un totale quindi di $4N$ incognite complessive.

Ripercorrendo quanto fatto per le funzioni *splines* cubiche, si ottiene un sistema di $2N$ equazioni con $4N$ incognite e quindi, $2N$ dei coefficienti delle equazioni sono arbitrari.

Generalmente si impone l'esistenza in ogni punto dell'intervallo $[P_1, P_{N-1}]$ della derivata prima e della derivata seconda, pertanto in ogni punto P_1, P_2, \dots, P_{N-1} si uguagliano la derivata prima, destra e sinistra, e la derivata seconda, destra e sinistra, ottenendo così $2(N-1)$ equazioni.

Queste condizioni da soddisfare vengono imposte in modo da rendere continua e derivabile la funzione interpolante e la sua derivata prima.

Il sistema risulta costituito da $2N + 2(N-1) = 4N-2$ equazioni a disposizione con $4N$ incognite, pertanto rimangono ancora 2 gradi di libertà che solitamente si risolvono imponendo delle condizioni sulla derivata prima e seconda nei punti P_0 e P_N

- dei punti di flesso, ovvero derivata seconda nulla (*Spline naturale*);
- dei valori definiti per la derivata prima (*Spline vincolata*).

Se invece non sono note le derivate della funzione nei punti P_0 e P_N , si può usare la condizione di *not a knot* in cui si impone che la *spline* abbia derivata terza continua nei punti P_1 e P_{N-1} .

Nel modo descritto si ottiene una soluzione univoca che deriva dalla risoluzione di un sistema lineare di $4N$ equazioni in altrettante incognite; la funzione e la sua derivata prima risultano continue su tutto l'intervallo e derivabili in (P_0, P_N) .

Le curve *splines* polinomiali cubiche sono quelle usate con maggior frequenza, perché più stabili rispetto a quelle di grado superiore e più flessibili rispetto a quelle di grado inferiore. È infatti, tra tutte le funzioni che passano per i punti assegnati, quella che ha la curvatura media inferiore (ed è anche la più *liscia*)

3.1.4 Funzioni splines di Hermite

Una tipologia particolare di *spline* polinomiale cubica è la cosiddetta *spline* di Hermite, più semplice da calcolare ed implementare rispetto alla precedente. Questo tipo di *spline* è derivabile una sola volta, ed ha quindi un andamento continuo lungo tutto il sotto intervallo da interpolare ma con curvatura (generalmente) discontinua.

Per ogni coppia di punti consecutivi da interpolare, P_{i-1} e P_i ($i=1, 2, \dots, N$), si hanno 4 incognite (a_i, b_i, c_i, d_i) che vengono risolte imponendo il passaggio della curva interpolante nei due punti P_{i-1} e P_i e assegnando opportuni valori alla derivata prima nei medesimi punti.

La funzione interpolante viene quindi definita attraverso la risoluzione di $N-1$ sistemi lineari di 4 equazioni in altrettante incognite.

La soluzione del singolo sistema non è univoca ma dipende dai valori assegnati alla derivata prima nei punti P_{i-1} e P_i . Tali valori possono essere determinati attraverso l'applicazione di diversi metodi; una delle soluzioni maggiormente utilizzate prevede di assegnare valore nullo ad entrambe le derivate prime (*spline naturale di Hermite*).

Diversamente dalle altre funzioni *splines* cubiche, quelle di Hermite sono meno lisce (perché hanno una differenziabilità limitata) e possono presentare delle discontinuità (salti) nella derivata seconda (non avendo imposto nessuna condizione in proposito). Queste funzioni hanno però la caratteristica di non superare mai localmente i dati; si può infatti dimostrare che la pendenza in ogni punto interno è una media armonica ponderata delle pendenze dell'interpolante lineare [10,11].

L'andamento della funzione *spline* di Hermite in un generico sotto intervallo è determinato dalle quattro condizioni imposte sui due punti estremi del sotto intervallo (nodi) ed è indipendente dai punti esterni. Per queste ragioni, il comportamento delle funzioni *splines* di Hermite può essere definito di tipo "locale", diversamente dalle funzioni *splines* cubiche che hanno un comportamento di tipo "globale", perché il loro andamento è determinato da tutti i dati da interpolare (anche se con una sensibilità che decresce con la distanza).

3.2 Metodi di fitting ed interpolazione dati in ambiente Matlab

Il *downscaling* di dati sub-orari, a partire da quelli a scala oraria, può essere effettuato mediante l'applicazione di differenti modelli di *fitting*. La scelta del modello più opportuno, come già illustrato in precedenza, dipende chiaramente dalle caratteristiche del dato da elaborare, ma anche dalle finalità applicative e di utilizzo dei dati in output.

In questo lavoro sono state considerate diverse metodologie di data fitting, tra quelle presenti in ambiente MATLAB, come riportato in Tabella 1:

Fitting Method	Description
'NearestInterpolant'	Nearest neighbor interpolation
'LinearInterpolant'	Linear interpolation
'PchipInterpolant'	Piecewise cubic Hermite interpolation (curves only)
'CubicSplineInterpolant'	Cubic spline interpolation
'BiharmonicInterpolant'	Biharmonic surface interpolation
'SmoothingSpline'	Smoothing spline
'LowessFit'	Lowess smoothing (surfaces only)
'LinearLeastSquares'	Linear least squares
'NonlinearLeastSquares'	Nonlinear least squares

Tabella 1 – Metodi d'interpolazione (Fonte: www.mathworks.com/curvefittingtoolbox)

In fase preliminare sono stati utilizzati differenti modelli applicandoli a dati di scala temporale differente. Di seguito, qualche esempio, a conferma di quanto esposto.

Le figure 4 e 5 mostrano il fitting dei 24 valori orari della T (°C) giornaliera, in un giorno tipo, con due differenti approcci:

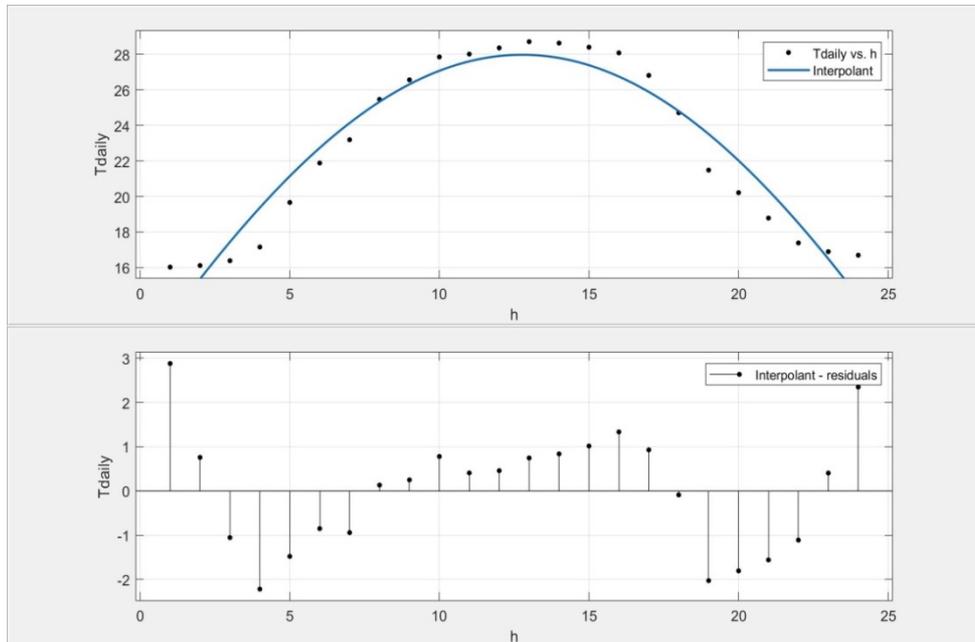


Figura 4

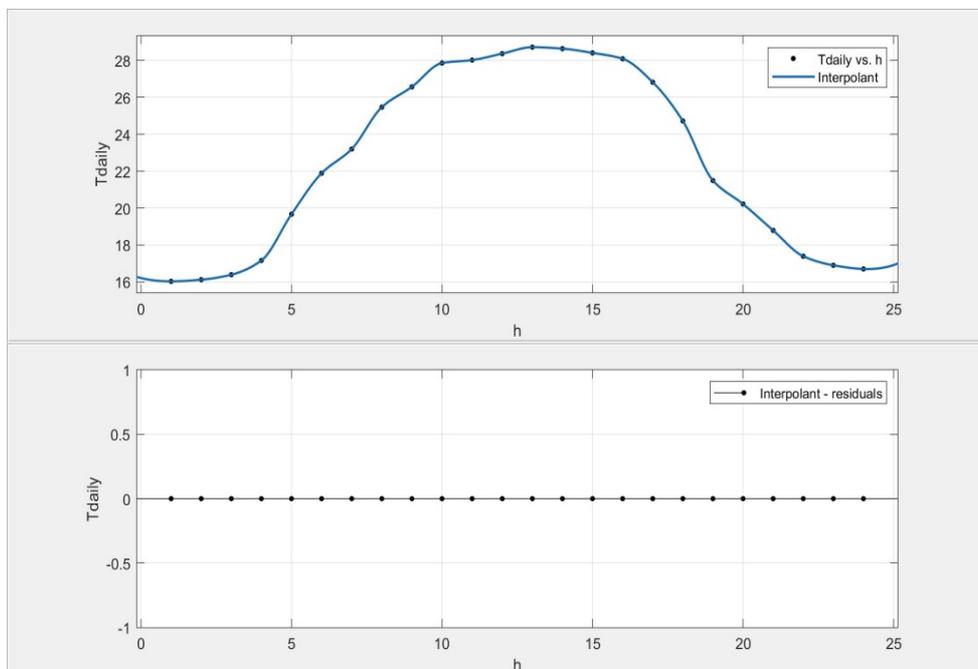


Figura 5

Nella prima figura 4 sono riportati gli andamenti della funzione ottenuti mediante l'applicazione prima di una funzione seno del tipo $a_1 \sin(b_1x + c_1)$; poi di una polinomiale: $ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$.

La prima applicazione pur consentendo discreti risultati nelle ore centrali, mostra maggiori scostamenti nelle altre ore, come appare evidente dai valori dei residui corrispondenti riportati nel grafico. Invece nella seconda figura (n. 5) è stata eseguita un'interpolazione polinomiale, nel caso in esempio con polinomio di 4° grado, che com'è evidente consente di ottenere risultati nell'elaborazione di dati giornalieri, mostrando un'interpolazione con residui nulli.

L'utilizzo quindi di metodologie di interpolazione del dato iniziale, che implicano il passaggio per i valori noti (non garantito con altri metodi di *fitting*), appare chiaramente più appropriato, soprattutto quando il "segnale" da ricostruire a livello sub-orario è maggiormente articolato, come avviene ad esempio se si analizzano dati a scala mensile, stagionale o annuale.

In questo caso, tuttavia, appare evidente che la funzione interpolante espressa da un unico polinomio non sarebbe sufficiente ad interpolare in maniera ottimale tutti i dati, ma si ricorre a funzioni tipo *spline*, cioè costituite da più polinomi opportunamente raccordati (figura 6).

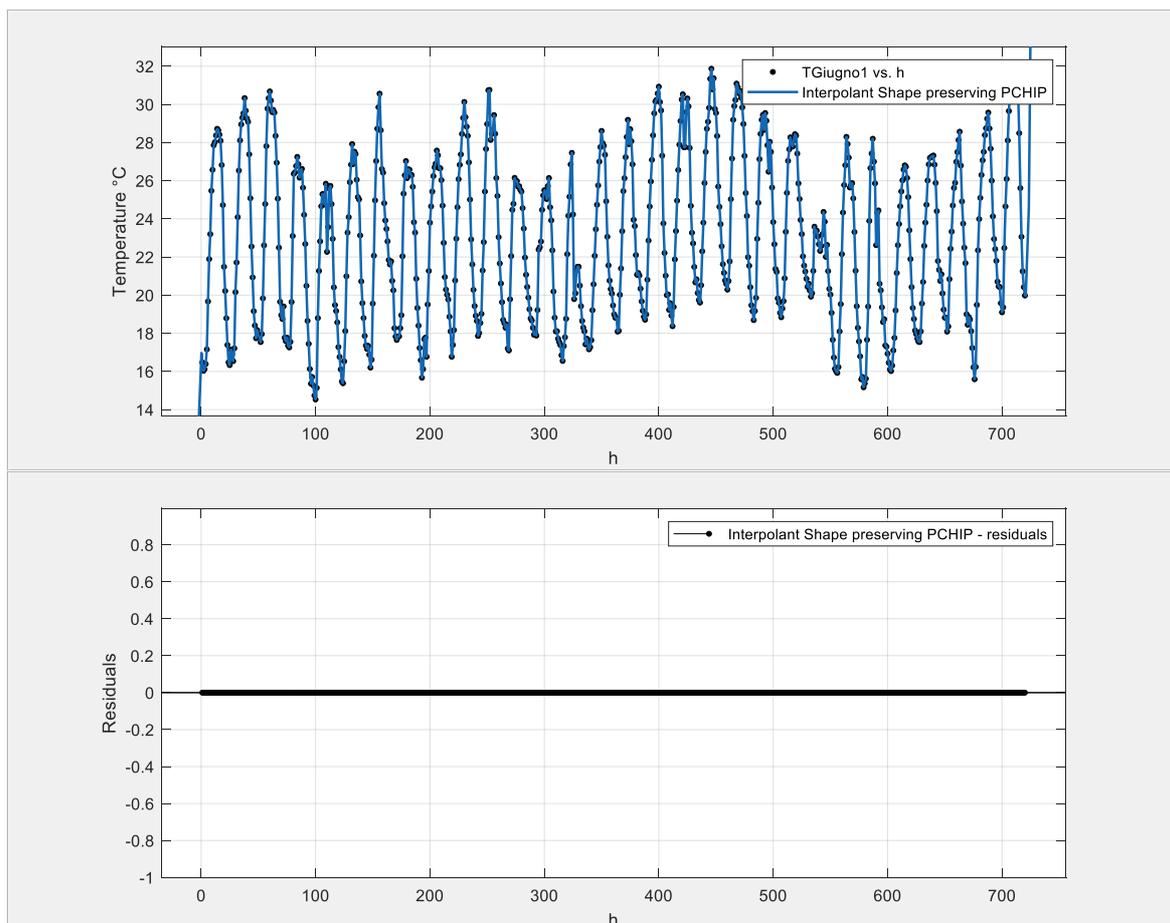


Figura 6

L'esigenza di elaborare direttamente l'intero dato annuale orario (8760 elementi) ha condotto quindi alla scelta di metodologie di tipo *spline*, che consentono di ottimizzare l'interpolazione, anche partendo da dati iniziali molto articolati.

Funzioni di interpolazione in Matlab

Per i dati climatici in esame, temperatura e umidità specifiche dell'aria, sono state applicati in via preliminare l'interpolazione lineare, quella cubica e quella *PCHIP* (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*). Tutte le suddette funzioni possono sostanzialmente considerarsi come varianti, delle metodologie di tipo *spline*.

I risultati ottenuti, molto simili in tutti e tre i casi, hanno portato alla scelta della funzione *PCHIP* per l'elaborazione degli anni-tipo delle differenti località italiane considerate.

PCHIP – Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial

Senza entrare in una trattazione approfondita dell'argomento, è possibile dire in sintesi che la *PCHIP* determina i valori della funzione interpolante nei punti intermedi, in modo che:

- La derivata prima risulti continua (non è invece garantita la continuità della derivata seconda);
- Le pendenze selezionate garantiscono strettamente il rispetto della forma e la monotonicità dei dati.

Tali caratteristiche distinguono l'interpolazione *PCHIP* da quella effettuata mediante *spline cubica*, che come meglio spiegato di seguito, presenta dei vincoli diversi per la funzione di interpolazione [12,13].

Nel grafico seguente sono riportati a titolo di esempio degli andamenti ottenuti con funzioni di tipo *spline* e *PCHIP*

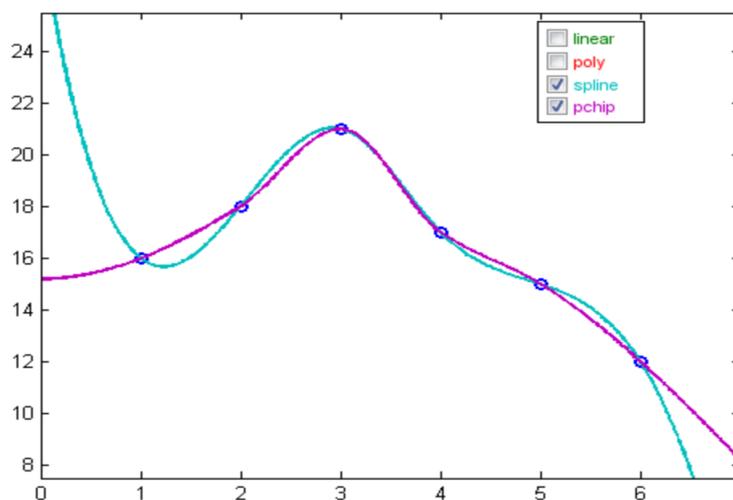


Figura 7 – Fonte: <https://blogs.mathworks.com/cleve/2012/07/16/splines-and-pchips/>

In sintesi, l'applicazione della *spline cubica*, produce un andamento tale da rendere continue anche le derivate seconde della funzione interpolante. Ciò conferisce un maggiore effetto *smoothing* alla curva e una maggior omogeneità, ma può determinare, localmente, degli scostamenti dalla forma "originale" dei dati noti (figura 7).

La *PCHIP* invece riduce maggiormente i possibili *overshoot* (scostamenti) e le fluttuazioni rispetto all'andamento dei valori iniziali.

Quest'ultima, come già detto, è stata scelta per l'interpolazione dei dati climatici esaminati, pur avendo constatato in fase preliminare, una sostanziale coincidenza con l'applicazione della *spline cubica*. Per maggiori approfondimenti dal punto di vista matematico si rimanda agli articoli riportati in bibliografia [10,11].

I due grafici proposti di seguito (figure 8 e 9) mostrano i risultati ottenuti mediante interpolazione *PCHIP* sia in termini di andamento temporale al minuto, sia in termini di frequenze relative, a partire dai dati orari. Nelle due figure sono inoltre riportati i confronti con le misure climatiche al minuto relative alla città di Roma (C.R. Casaccia), in cui emerge un'ottima "sovrapposizione" del segnale ottenuto mediante interpolazione.

Tale aspetto sarà meglio evidenziato in seguito nel capitolo 4 dedicato alla validazione dei metodi individuati.

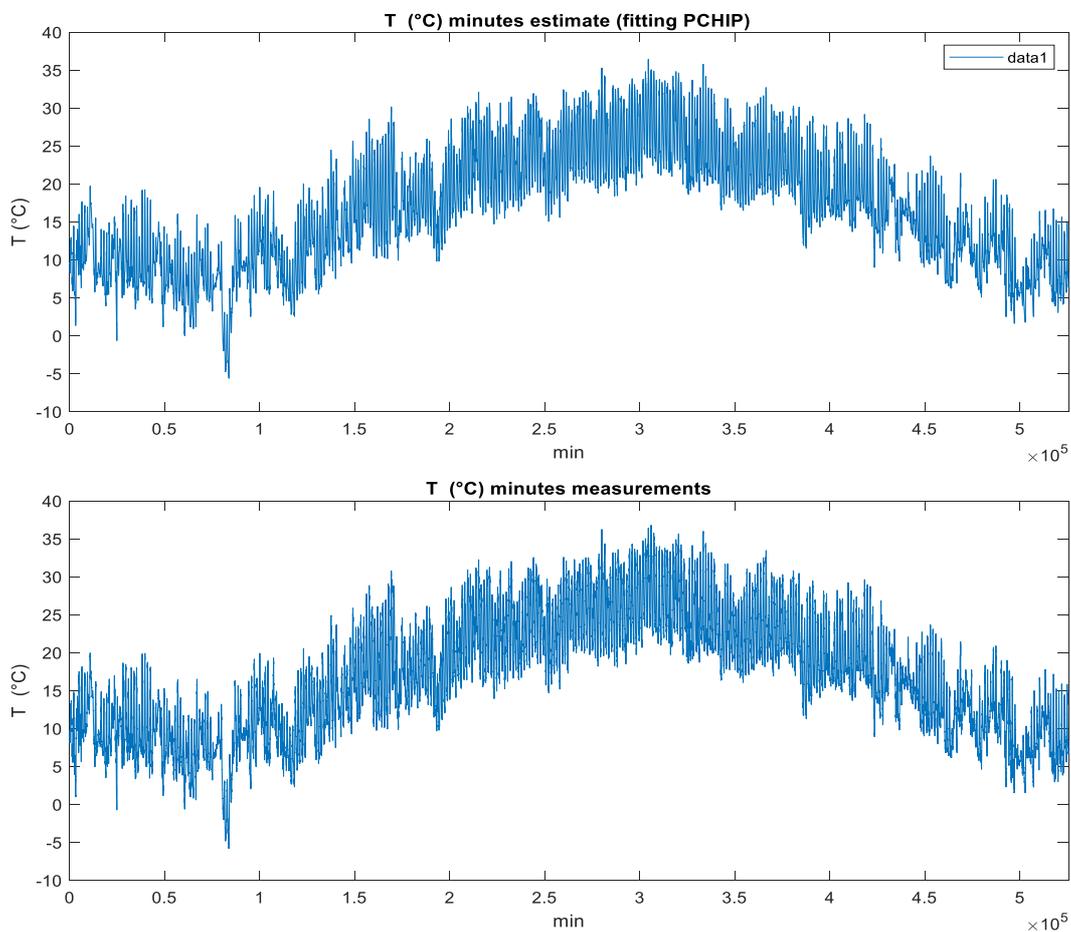


Figura 8

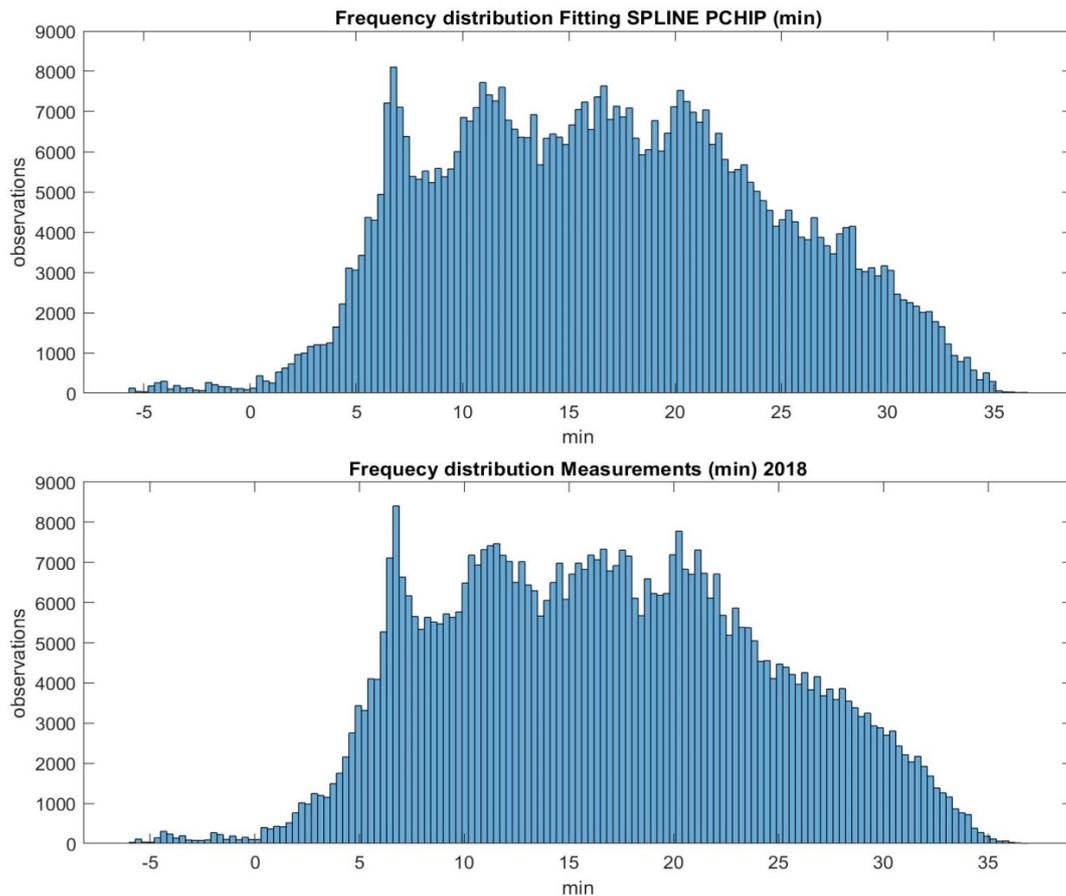


Figura 9

3.3 Metodi d'interpolazione per le irradianze

I metodi d'interpolazione matematici che sono stati ampiamente descritti nel capitolo precedente si sono mostrati adeguati sia per la temperatura e sia per l'umidità ma, come si vedrà di seguito, ciò non è più vero per le tre irradianze, i cui andamenti dipendono in misura essenziale dai fenomeni nuvolosi – per natura imprevedibili in tempistica e intensità – e sono di conseguenza largamente irregolari, dunque difficilmente “catturabili” con un modello meramente matematico. A titolo di esempio, in figura 10 è mostrato l'andamento giornaliero della GHI dell'11 gennaio 2018, rilevato in Casaccia con la frequenza di una misura al minuto; e vi è stato sovrapposto l'andamento ricavato mediante interpolazione *spline* cubica: si vede bene che quest'ultimo tenta di inseguire quasi a mo' d'involuppo quello effettivo, ma l'esito non è così soddisfacente come quello visto per la temperatura e l'umidità, che variano nel tempo in maniera molto meno accentuata.

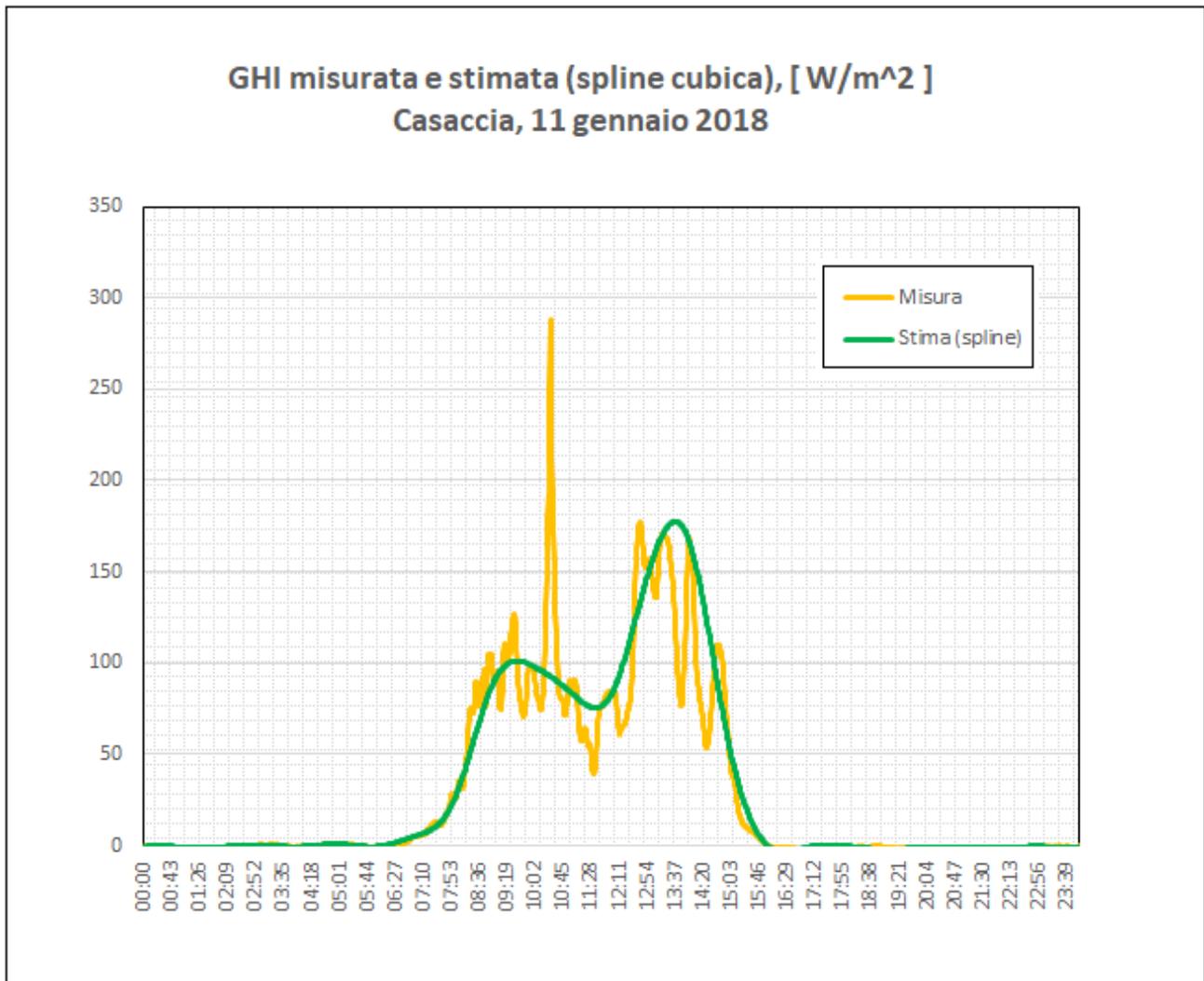


Figura 10 – Confronto degli andamenti GHI per un giorno nuvoloso

Per brevità, nella figura precedente è mostrato solo il comportamento della GHI, ma anche le due componenti (DNI e DfHI) si comportano in maniera simile. Tutte queste considerazioni suggeriscono che i metodi meramente matematici non sono sufficienti per interpolare a livello sub-orario le irradiazioni solari, ma per esse si rende necessario il ricorso essenziale a metodi fisici (e insieme statistico-empirici) che si basino sulla teoria della trasmissione della radiazione solare nell’atmosfera.

Va detto che in base alla particolare copertura nuvolosa presente nell’atmosfera a un dato istante s’individuano differenti “tipi di cielo” e non per tutti i metodi matematici si rivelano inappropriati. Ad esempio, le condizioni di *cielo sereno* – ovvero di atmosfera completamente sgombra da nubi per un arco di tempo significativo della giornata – sono caratterizzate da un andamento delle intensità radiative (globale, diretta e diffusa) estremamente regolare e prevedibile: in virtù di questa circostanza, noti i 24 valori orari di dell’intero giorno, la stessa interpolazione matematica lineare (e ancor più se di grado superiore a uno) può rivelarsi ottima per predire i valori intermedi fra un’ora e l’altra (figura 11); fermo restando che per questo tipo di cielo vengono in soccorso con uguale efficacia pure modelli i fisici che verranno proposti nel seguito per la più generalità dei “tipi di cielo”.

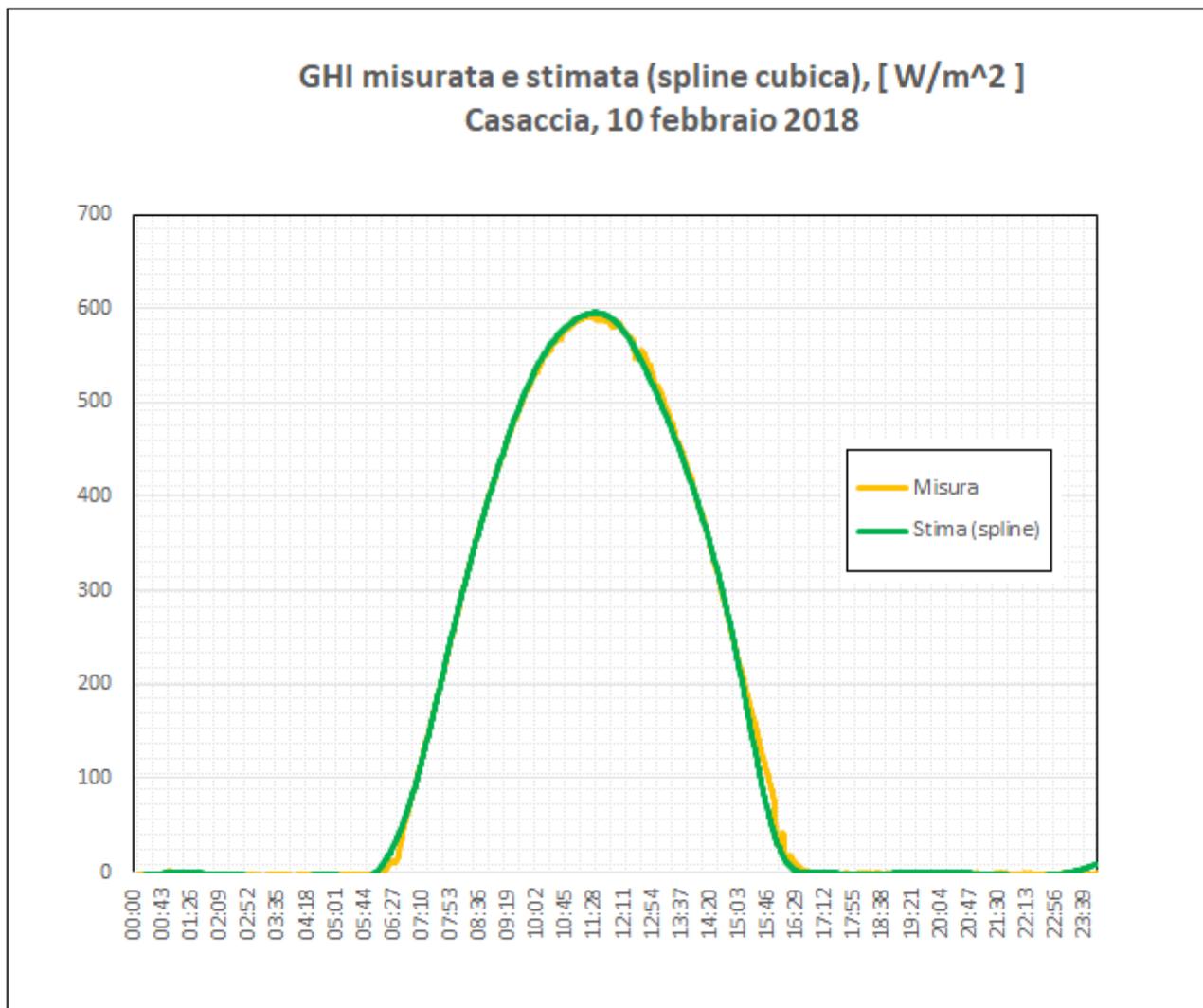


Figura 11 – Confronto degli andamenti GHI per un giorno sereno

I modelli fisici si basano sulla conoscenza esatta della posizione del Sole momento per momento e sulle caratteristiche dell’atmosfera che in questo caso è stabile e può conoscersi agevolmente dagli stessi valori orari usati come input al calcolo. La condizione di cielo sereno si stabilisce calcolando il cosiddetto *coefficiente di trasmissione globale giornaliero*, mediante l’espressione:

$$\bar{K}_T = \frac{H}{H_o}$$

In cui H è l’irradiazione globale orizzontale giornaliera al suolo, ricavabile come somma dei dati orari (dopo averli numericamente convertiti da potenze per unità di superficie, $W \cdot m^{-2}$, a energie per unità di superficie, $Wh \cdot m^{-2}$ o anche $MJ \cdot m^{-2}$); mentre H_o è l’irradiazione extraatmosferica orizzontale giornaliera, che si calcola in funzione della posizione geografica e del giorno dell’anno. I cieli sereni sono caratterizzati da valori elevati di \bar{K}_T : $\bar{K}_T \geq 0.7$, fino a $\bar{K}_T = 0.85 \div 0.9$ per giornate invernali particolarmente limpide. Un modello fisico per il cielo sereno è (Bourges, in [14]):

$$I = K_{Tc} I_o \quad \text{con:} \quad K_{Tc} = B \cos^{0.15} \vartheta_z$$

In cui: I è l'irradianza globale orizzontale al suolo, oraria ($W \cdot m^{-2}$; dato di input); I_o è l'irradianza extraatmosferica corrispondente; K_{Tc} è il coefficiente di trasmissione globale "sereno" e B è il parametro introdotto da Bourges e che coincide[rebbe] con K_{Tc} nelle condizioni ipotetiche di Sole allo zenit, quando l'angolo zenitale \mathcal{G}_z è nullo (\mathcal{G}_z è l'angolo che la direzione del Sole forma con la normale alla superficie orizzontale, e vale $\pi/2$ all'alba e al tramonto e varrebbe 0 se il Sole stesse a perpendicolo⁵):

$$B = K_{Tc,N} \quad (\text{il pedice } N \text{ sta per "normale"})$$

I valori orari di B si calcolano agevolmente dai dati orari d'irradianza globale (input) oppure si ricavano da tabelle già disponibili per tutte le località grazie alle serie di misure pluriennali.

In definitiva, ricordando anche che l'irradianza extraatmosferica orizzontale è legata a quella normale dalla formula:

$$I_o = I_{on} \cos \mathcal{G}_z$$

e raccogliendo le diverse espressioni prima riportate, possiamo scrivere la formula del modello di Bourges per l'irradianza (oraria) globale orizzontale al suolo in condizioni di cielo sereno come segue:

$$I = I_{on} B \cos^{1.15} \mathcal{G}_z \quad (5)$$

Orbene, ai fini dell'interpolazione, sono possibili due vie:

- 1) giorno per giorno si calcola un unico valore di B a partire dai dati orari (noti) I_h , come media dei valori:

$$\bar{B} = \frac{\sum_{\text{ore } h \text{ diurne}} B_h}{N_d} = \frac{\sum_{\text{ore } h \text{ diurne}} \left(\frac{I_h}{I_{on} B \cos^{1.15} \mathcal{G}_{z,h}} \right)}{N_d}$$

— dove il pedice h è riferito ai dati orari limitati al solo arco diurno, essendo banalmente nulle le irradianze solari notturne, N_d è il numero delle ore diurne considerate e $\mathcal{G}_{z,h}$ è l'angolo zenitale all'ora h (invece il dato I_{on} è senza il pedice orario in quanto è sempre lo stesso per tutto il giorno⁶)
 — e utilizzare \bar{B} nella (5) per ricavare il dato interpolato dell'irradianza in qualunque istante (vedasi un esempio in figura 12; l'esempio si riferisce allo stesso giorno mostrato nella precedente figura 11, con in più presente ora il profilo ricavato per mezzo del modello di Bourges);

⁵ Alle nostre latitudini tale condizione non si realizza in nessun momento del giorno per nessun giorno dell'anno. Si verifica invece alle latitudini comprese fra il tropico del Cancro (emisfero boreale) e quello del Capricorno (emisfero australe).

⁶ I valori di I_{on} e di $\cos \mathcal{G}_{z,h}$ si ricavano da espressioni astronomiche esatte che dipendono solo dalle coordinate geografiche, dal giorno dell'anno e dall'ora h considerata. Per stabilire se una data ora è diurna, si controlla il segno del coseno dell'angolo zenitale: è $\cos \mathcal{G}_{z,h} > 0$ per le ore diurne, $\cos \mathcal{G}_{z,h} < 0$ per quelle notturne e infine $\cos \mathcal{G}_{z,h} = 0$ ai momenti dell'alba e del tramonto.

- 2) calcolati i valori (B_h, B_{h+1}) per ciascuna coppia di dati orari consecutivi, si calcola per interpolazione lineare quello per ogni istante intermedio i :

$$B_i = B_h + \frac{B_{h+1} - B_h}{1} (i - h) \quad \text{con} \quad h \leq i \leq h+1$$

e lo si pone nuovamente in (5) per stimare il valore dell'irradianza globale orizzontale I in qualunque istante compreso nell'intervallo $i \in [h, h+1]$

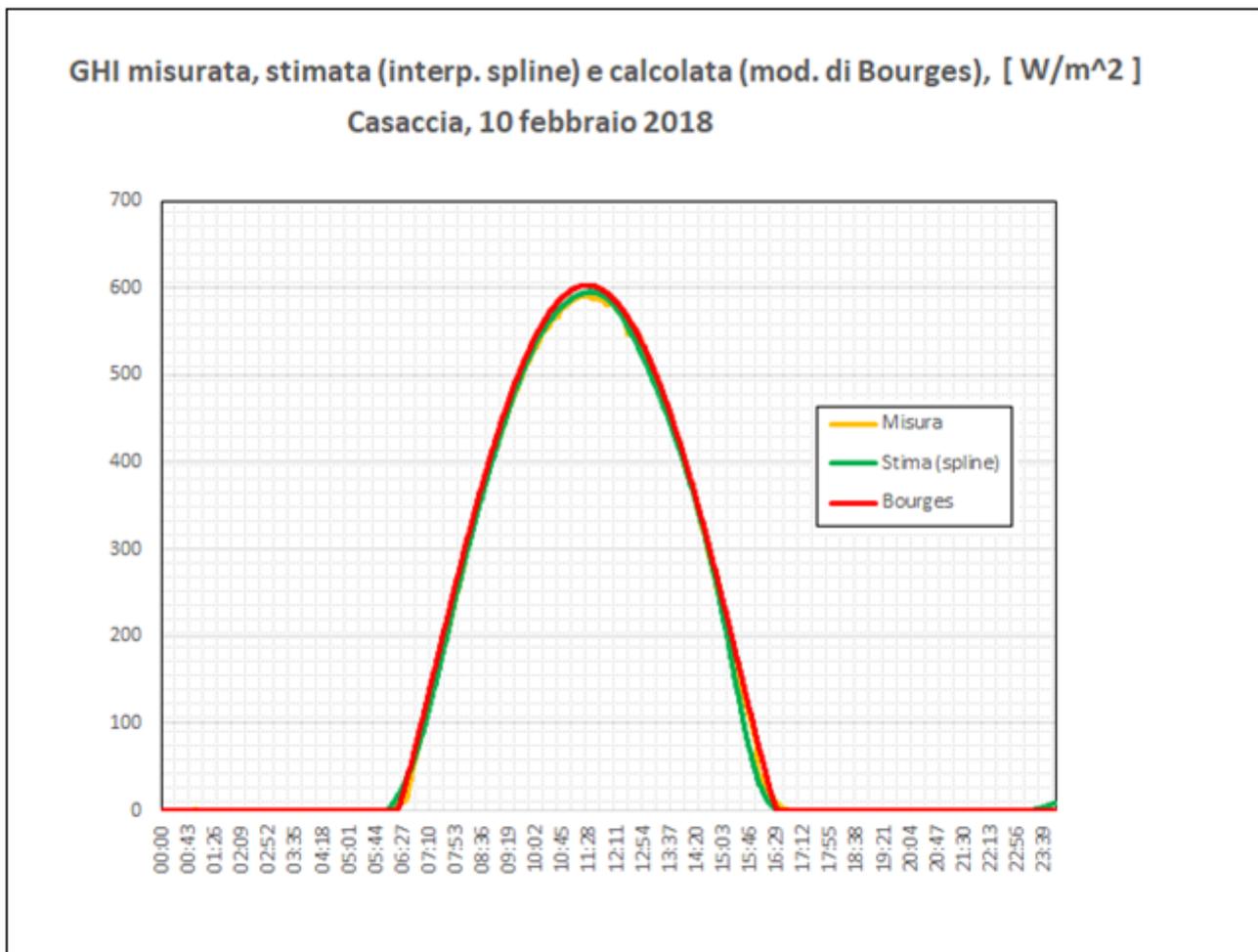


Figura 12 – Confronto degli andamenti GHI per un giorno sereno

Entrambe le procedure – \bar{B} giornaliero e B_i interpolato fra (B_h, B_{h+1}) – “funzionano” bene in condizioni di cielo sereno (con errori stima vs misura piccoli) e in tal caso ciascuna può essere preferita all'altra senza pregiudizio. Come si è detto, però, l'atmosfera è anche sede di fenomeni nuvolosi irregolari e imprevedibili (o al più prevedibili con scarsa attendibilità; vedere figura 13): si parla allora di cielo parzialmente o completamente nuvoloso, con classi di nuvolosità discretizzate in base ai differenti intervalli dei valori del *coefficiente di trasmissione globale giornaliero* sopra introdotto. Per queste ultime classi, la modellazione approntata per il cielo sereno non è in grado di fornire la stima dei valori interpolati d'irradianza, però il secondo dei metodi visti si presta ad essere modificato per adattarlo a qualunque condizione di cielo.

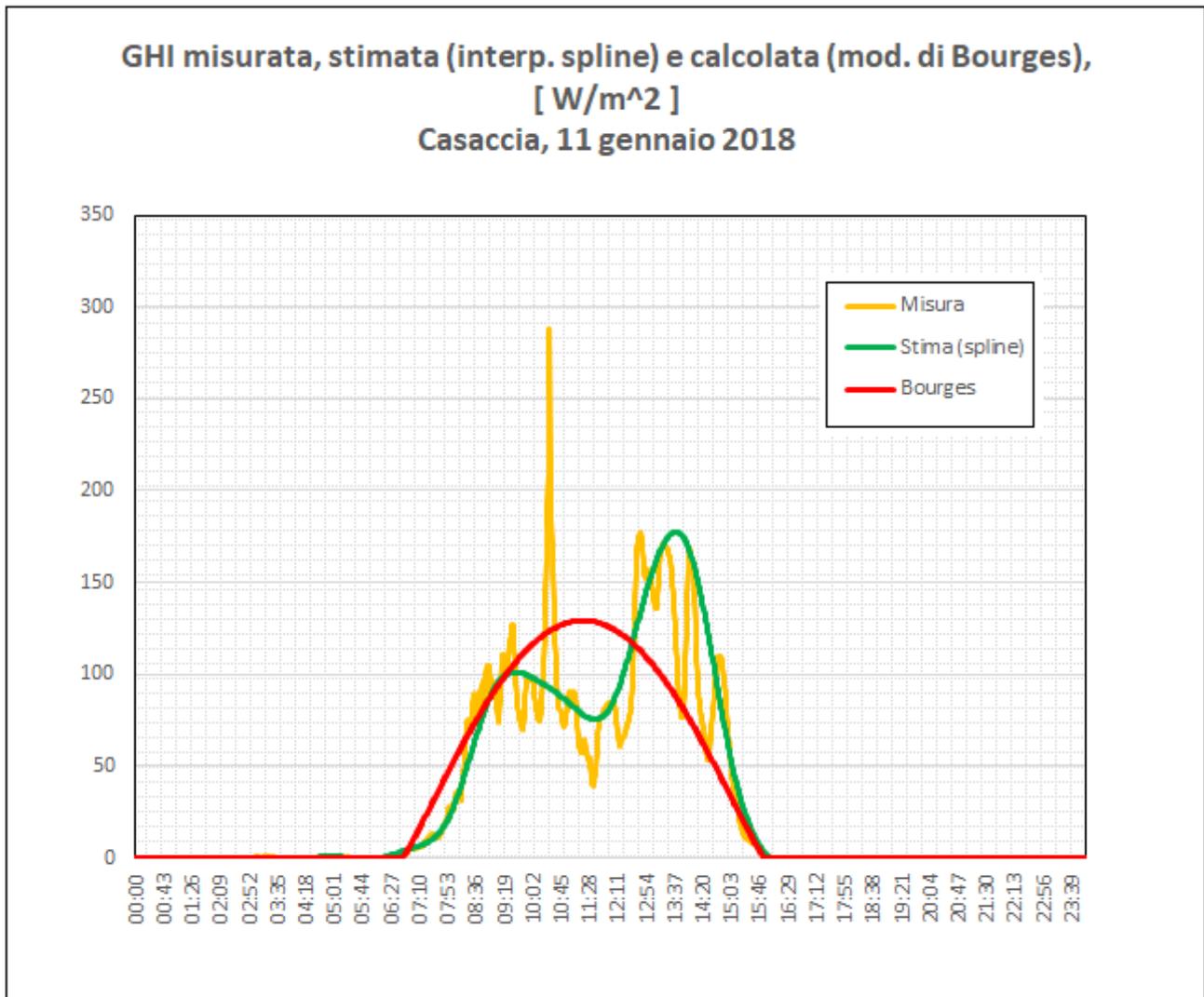


Figura 13 – Confronto degli andamenti GHI per un giorno nuvoloso

Per qualunque situazione, infatti, possiamo ancora scrivere:

$$I = K_T I_o$$

In cui K_T è sempre il coefficiente di trasmissione globale che, per condizioni qualunque, può scriversi come prodotto del K_{Tc} visto in precedenza per la condizione di cielo sereno e un fattore K_c che tiene conto della presenza contingente delle nubi:

$$K_T = K_{Tc} K_c = BK_c \cos^{0.15} \vartheta_z$$

k_c è detto indice di serenità (*clear-sky index*) e spazia fra $K_c = 1$ (cielo sereno) e $K_c \approx 0.04$ (cielo completamente coperto). Raccogliendo:

$$I = K_T I_o = K_{Tc} K_c I_o = BK_c \cos^{0.15} \vartheta_z \cdot I_{on} \cos \vartheta_z = I_{on} BK_c \cos^{1.15} \vartheta_z$$

ovvero:

$$I = I_{on} S^{(GHI)} \cos^{1.15} \vartheta_z \quad (6)$$

in cui nel simbolo $S^{(GHI)}$ è stato raccolto il prodotto BK_c . In definitiva, il metodo d'interpolazione proposto si concentrerà, come sarà spiegato a breve, proprio su questo parametro e proporrà un andamento infra-orario "plausibile" di $S^{(GHI)}$ a partire dai valori orari $S_h^{(GHI)}$:

$$S_h^{(GHI)} = \frac{I_h}{I_{on} \cos^{1.15} \vartheta_{z,h}} \quad (7)$$

calcolati grazie ai valori noti (input) delle irradianze globali orizzontali I_h . Ovviamente, come si è già constatato, l'interpolazione più semplice, ovvero quella lineare, fra coppie consecutive di valori orari $(S_h^{(GHI)}, S_{h+1}^{(GHI)})$ va molto bene solo per il cielo sereno – in tal caso $S^{(GHI)}$ coincide banalmente con B – ma è assolutamente inadeguata a "catturare" le irregolarità dei saliscendi del cielo nuvoloso fra un'ora e la successiva. Per quest'ultima situazione, è stato perciò proposto un andamento interpolante che a quello lineare sovrapponga in prima approssimazione un periodo di curva sinusoidale (figura 14):

$$S_i = S_1 + \frac{S_2 - S_1}{H_2 - H_1} (i - H_1) + A \cdot \text{sen} \left[\frac{2\pi}{H_2 - H_1} (i - H_1) \right] \quad (8)$$

in cui H_1 e H_2 sono due istanti orari consecutivi, ad esempio 10:00 e 11:00, a cui corrispondono i valori noti S_1 e S_2 ricavati dalla (7); mentre i è qualunque istante compreso fra i due estremi orari: $H_1 \leq i \leq H_2$. Per non appesantire l'aspetto della formula, l'apice (GHI) dei parametri S è stato omissso.

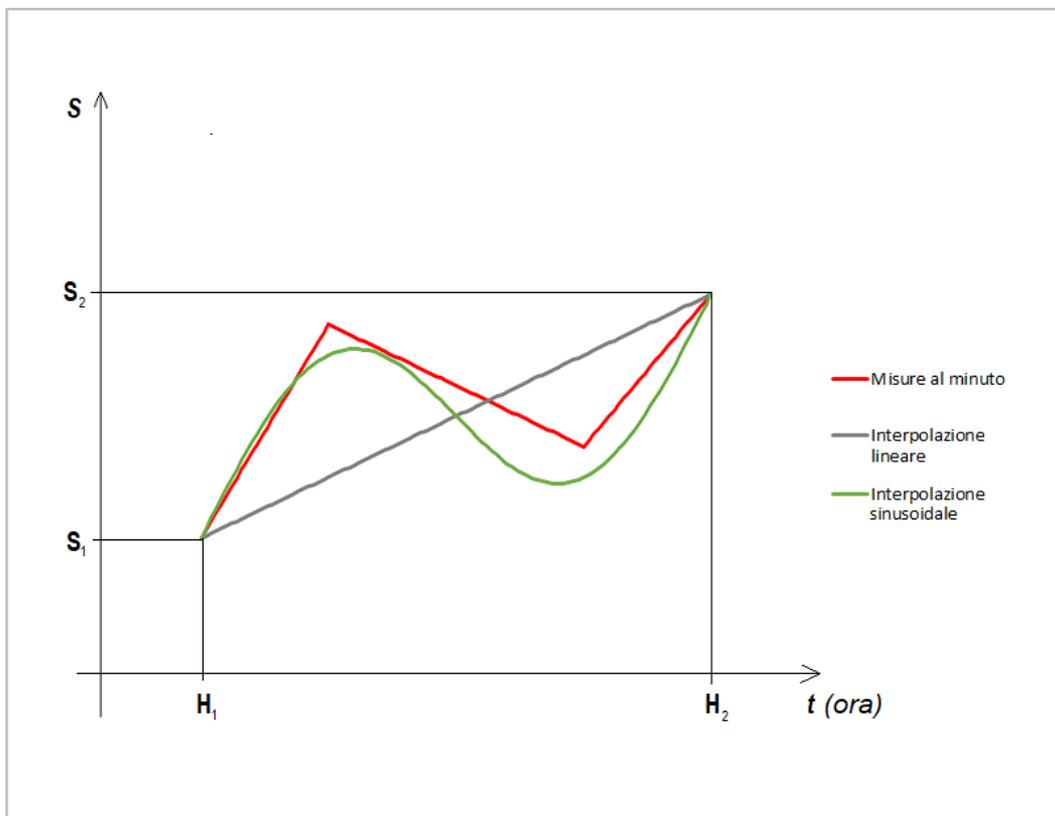


Figura14 – Andamenti infra-orario di S

Il parametro A determina l'entità della correzione sinusoidale apportata all'andamento lineare. Operativamente, A è calcolato come rapporto in cui a numeratore vi è la differenza della GHI oraria misurata (dato di input) e la GHI media oraria calcolata con il parametro $S^{(GHI)}$ che varia linearmente tra S_h e S_{h+1} , mentre a denominatore è posta la media (nelle 24 ore) della GHI oraria misurata. Si può osservare A è definito anche con il segno (positivo o negativo) e questo fa sì che il primo semiperiodo dell'onda sinusoidale possa presentare la concavità rivolta verso il basso ($A > 0$; è la situazione mostrata nella figura 14) oppure verso l'alto ($A < 0$). Per valori di $\bar{K}_T > 0.7$ (ovvero cielo sereno) la differenza al numeratore è prossimo allo zero quindi si può porre $A = 0$; d'altro canto il parametro A non può essere illimitatamente "grande" e da un'analisi dei risultati ottenuti con le misure al suolo al minuto è stato trovato un valore limite (in termini assoluti) di $A = 0.08$. Stabiliti così i valori di $S^{(GHI)}$ a qualsivoglia frequenza sub-oraria (ogni 1, 10, 15 o 20 minuti), le corrispondenti GHI sub-orarie si otterranno in virtù della (6). La figura 15 mette a confronto gli andamenti d'interpolazione sin qui esaminati per la GHI, in un esempio di giorno nuvoloso (ovvero lo stesso 11 gennaio 2018 visto in precedenza).

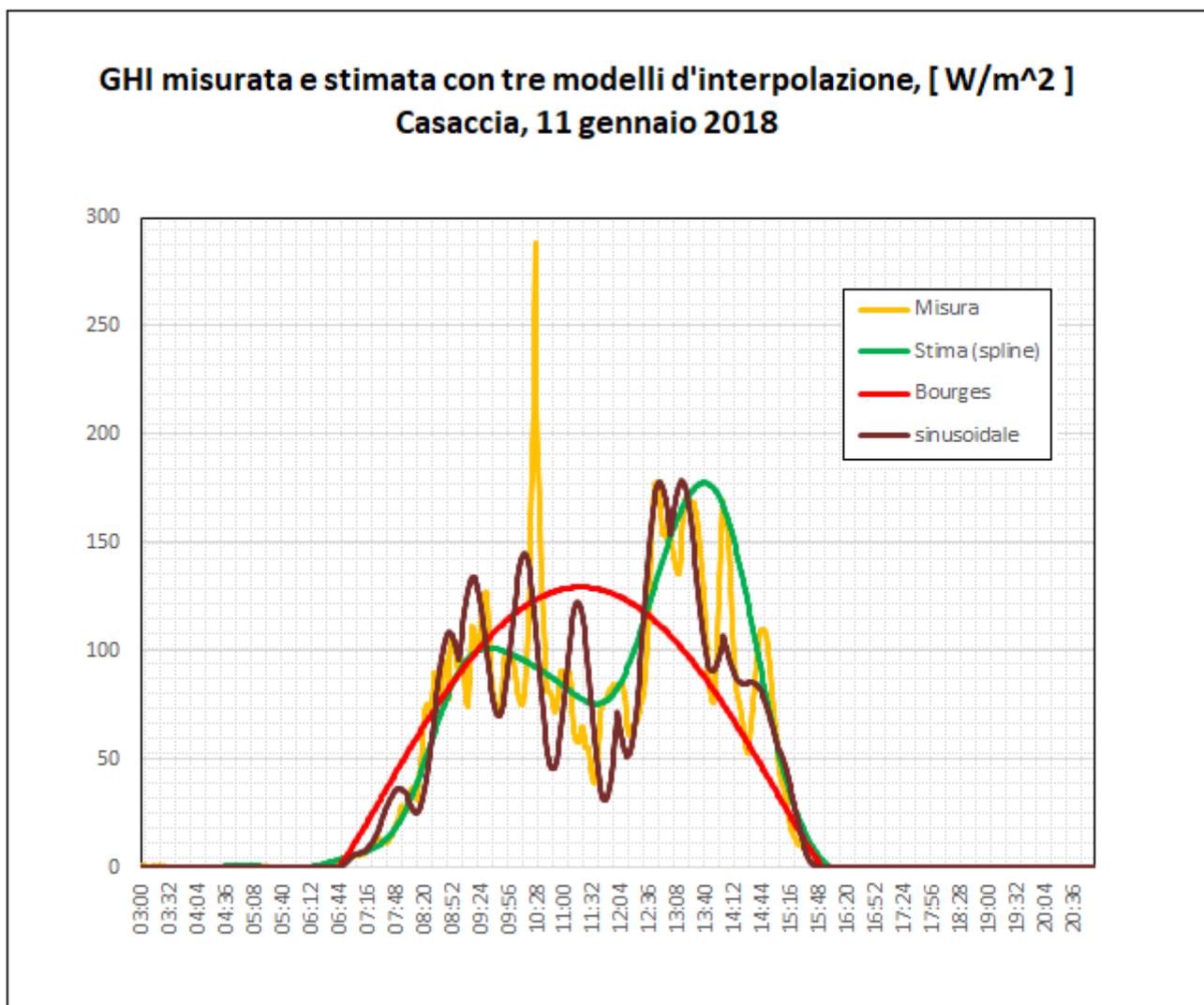


Figura 15 – Confronto degli andamenti GHI per un giorno nuvoloso

Si constata che né l'interpolatore matematico (*spline*) né il modello "sereno" di Bourges sono adeguati a riprodurre soddisfacentemente i valori infra-orari delle misure reali; di contro, il nuovo modello "sinusoidale" fornisce le stime che meno si discostano dalle corrispondenti misure e, sebbene la sovrapposizione non sia ancora numericamente perfetta, gli accidenti irregolari e le spigolosità del profilo di misura risultano riprodotti abbastanza fedelmente.

Riassumendo, per condizioni di cielo sereno – come pure anticipato nel report della scorsa annualità e mostrato in dettaglio anche qui – la semplice interpolazione *spline* (lineare o cubica) porta già a ottimi risultati, mentre per la generalità dei tipi di cielo, che non siano solo banalmente "sereni", ciò non è affatto sufficiente e anche l'adozione di correlazioni di ordine superiore porta a risultati non sempre soddisfacenti. Perciò, per gioco forza, si è reso necessario ricorrere a modelli che coinvolgono l'aspetto fisico dei fenomeni, come quello appena descritto. Sono stati invece accantonati gli altri modelli statistici o anche fisico-statistici reperiti in letteratura e studiati nel corso dell'annualità precedente⁷ in quanto rivelatisi inutilmente complessi per concezione o poco pratici da implementare. Il metodo proposto qui – chiamato per praticità "fisico-sinusoidale" – ha mostrato numerosi vantaggi, fra cui: 1) la compattezza della formulazione matematica, che evita il ricorso alla suddivisione dei tipi di cielo in classi, con la conseguente necessità di adottare una formulazione differente per ciascuna; 2) la naturalezza con cui anche la classe speciale del cielo sereno venga inglobata nel medesimo metodo come caso particolare; 3) la conseguente facilità d'implementazione. Nella tabella 2 è mostrato l'elenco dei metodi d'interpolazione esaminati per la radiazione solare e sono indicate le situazioni in cui essi possono applicarsi.

Metodi d'interpolazione sub-oraria	Situazioni cui si applicano
Interpolazione matematica (<i>spline</i>)	cielo sereno
Modello fisico di Bourges con B giornaliero	cielo sereno
Modello fisico di Bourges con B orari	cielo sereno
Modello fisico sinusoidale (estensione del modello di Bourges con B orari)	cielo con qualunque grado di nuvolosità; cielo sereno come caso particolare

Tabella 2 – Sinossi dei metodi d'interpolazione per l'irradianza solare

Le formule sin qui mostrate si riferiscono all'irradianza globale (GHI). Occorre completare ora la descrizione con le altre necessarie per calcolare separatamente le due parti che compongono la GHI, ovvero le irradianze diretta (DNI) e diffusa. Per quanto riguarda la DNI, in condizioni di cielo sereno, è nota la formula di Linke:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{bn}^{(clear)} = K_{bn}^{(clear)} I_{on} \\ \text{con:} \\ K_{bn}^{(clear)} = e^{-m\bar{\delta}_R T_L} \end{array} \right. \quad (9)$$

⁷ Annualità 2019 del Piano triennale 2019÷2021, [6].

in cui: con I_{on} si è indicata l'irradianza extraatmosferica normale (ENI); $K_{bn}^{(clear)}$ è il fattore di trasmissione della DNI in atmosfera "serena" (*clear*); m è la massa d'aria ottica relativa (*Relative Optical Air Mass*); $\bar{\delta}_R$ è il fattore di estinzione di Rayleigh; e infine T_L è il fattore di torbidità di Linke. I primi tre termini dipendono da numerosi parametri – geografici e temporali – e dispongono di espressioni analitiche, mentre l'ultimo è un fattore empirico che misura di quanto la situazione atmosferica del momento, pur serena, si discosti dall'aria secca (= priva di vapore acqueo) e pulita (= priva di aerosol). Si ha $T_L = 1$ per atmosfera serena secca e pulita e valori maggiori di 1 per le diverse gradazioni di torbidità.

Si può notare che il fattore di torbidità di Linke gioca per la DNI nella (9) lo stesso ruolo del parametro B nella (5) che, sempre per la condizione (particolare) di cielo sereno, misura il grado di limpidezza dell'aria e determina il valore della GHI col Sole supposto ipoteticamente allo zenit ($B = K_{Tc,N}$). In virtù di questo fatto, non sorprende che possano essere stabilite delle valide correlazioni empiriche fra T_L e B e anzi, così come è sembrato lecito estendere il significato di B alle situazioni più generali di cielo – variamente nuvoloso e non solo sereno –, mediante la sua sostituzione col parametro più generale $S^{(GHI)}$, allo stesso è possibile introdurre un fattore $S^{(DNI)}$ che misuri l'attenuazione complessiva della DNI nell'attraversare l'atmosfera, per qualunque stato di quest'ultima, ovvero tenendo conto allo stesso tempo e della torbidità del cielo sereno (vapore acqueo e aerosol) e della presenza delle nuvole. Questa impostazione non sarebbe utile se non si potesse stabilire una relazione univoca fra i due parametri $S^{(GHI)}$ e $S^{(DNI)}$, confortata dai dati sperimentali. E infatti le misure di GHI e DNI effettuate in Casaccia nel triennio 2017÷2019 hanno permesso di scrivere empiricamente:

$$S^{(DNI)} = \frac{1.04}{[S^{(GHI)}]^{4.05}} \quad (10)$$

In definitiva, calcolato il parametro sub-orario $S^{(GHI)}$ mediante la (8) e a seguire quello di $S^{(DNI)}$ mediante la (10), i valori sub-orari di DNI per qualunque condizione di cielo si otterranno con l'espressione seguente:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{bn} = K_{bn} I_{on} \\ \text{con:} \\ K_{bn} = e^{-m\bar{\delta}_R S^{(DNI)}} \end{array} \right. \quad (11)$$

che costituisce immediata generalizzazione della (9). Se nella serie temporale dei dati di input sono note non solo le GHI orarie ma anche i valori (orari) di DNI, è possibile ottimizzare l'andamento interpolato ottenuto con (11), "forzandolo" a passare per i valori noti di DNI agli istanti orari "esatti". La formulazione adottata per ottenere la correzione è la seguente:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{bn,i} = K_{bn,i} I_{on} \\ \text{con:} \\ K_{bn,i} = K_{bn} \left(S_i^{(DNI)} \right) + \left[K_{bn,H_1} - K_{bn} \left(S_{H_1}^{(DNI)} \right) \right] \frac{H_2 - i}{H_2 - H_1} + \left[K_{bn,H_2} - K_{bn} \left(S_{H_2}^{(DNI)} \right) \right] \frac{i - H_1}{H_2 - H_1} \end{array} \right. \quad (12)$$

in cui: h_1 e h_2 sono due istanti orari consecutivi, ad esempio 10:00 e 11:00; i è un qualunque istante infra-orario: $h_1 \leq i \leq h_2$; $K_{bn}(S_i^{(DNI)})$, $K_{bn}(S_{h_1}^{(DNI)})$ e $K_{bn}(S_{h_2}^{(DNI)})$ sono i fattori di trasmissione della DNI calcolati mediante la seconda delle (11) in corrispondenza rispettivamente degli istanti i , h_1 e h_2 ; infine, K_{bn,h_1} e K_{bn,h_2} discendono direttamente (per definizione) dalle misure della DNI agli istanti orari h_1 e h_2 :

$$K_{bn,h_1} = \frac{I_{bn,h_1}}{I_{on}}, \quad K_{bn,h_2} = \frac{I_{bn,h_2}}{I_{on}}$$

Con rapido controllo si può constatare che, come desiderato, i valori interpolati della DNI agli estremi dell'intervallo orario coincidono con le misure (input) note agli stessi istanti:

- per $i = h_1$ (istante coincidente con il primo estremo) si ricava: $h_2 - i = h_2 - h_1$, $i - h_1 = 0$ e dunque: $K_{bn,i} = \dots = K_{bn,h_1}$, da cui: $I_{bn,i} = I_{bn,h_1}$ = misura della DNI all'istante "orario" h_1 ;
- per $i = h_2$ (istante coincidente con il secondo estremo) si ricava: $h_2 - i = 0$, $i - h_1 = h_2 - h_1$ e dunque: $K_{bn,i} = \dots = K_{bn,h_2}$, da cui: $I_{bn,i} = I_{bn,h_2}$ = misura della DNI all'istante "orario" h_2 ;

Per completare, i valori interpolati a frequenza sub-oraria della terza irradianza in gioco, quella orizzontale diffusa, si può calcolare per differenza utilizzando la formula teorica (4), e dunque:

$$I_d = I - I_{bn} \cos \vartheta_z$$

Si osservi che, nella predisposizione del modello d'interpolazione complessivo per le tre irradianze appena descritto, le misure (input) dell'irradianza diffusa eventualmente disponibili non vengono utilizzate per nulla. Di conseguenza, l'eventuale constatazione di differenze trascurabili (sia in termini di *bias*, sia di varianza) fra misure e stime interpolate deporrebbe fortemente a favore della bontà del metodo d'interpolazione stesso e confermerebbe indirettamente anche l'attendibilità della serie temporale di terne di misure (GHI, DNI, DfHI) utilizzate per la messa a punto del modello stesso.

4 Validazione delle metodologie individuate

4.1 Descrizione della fonte dei dati e loro tipologia

La fonte dei dati utilizzati per la messa a punto dei modelli d'interpolazione sub-oraria e la successiva validazione è stata descritta estesamente nel rapporto della precedente annualità [6]. Brevemente, si tratta di misure di diverse grandezze meteorologiche – temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica e irradianza (nelle tre componenti GHI, DNI e DfHI) – protrattesi nell'arco di numerosi anni, con frequenza di acquisizione di un record di misure al minuto, nel centro ricerche Casaccia dell'ENEA. Per la messa a punto è stata considerata la serie temporale completa dei tre anni dal 2017 al 2019, mentre la validazione è stata condotta utilizzando i soli dati del 2018. Anche considerando un solo anno, si tratta comunque di una mole di dati considerevole, in quanto un anno consta di:

$$365 \text{ giorni} \times 24 \frac{\text{ore}}{\text{giorno}} \times 60 \frac{\text{minuti}}{\text{ora}} = 525600 \text{ minuti}$$

e comporta pertanto l'allestimento di un data set di oltre mezzo milione di record, ognuno costituito da un vettore di 6 misure, tante quante sono le grandezze coinvolte. Ovviamente, per presentare i risultati, si è operata di volta in volta una selezione rappresentativa dei dati misurati o elaborati.

4.2 Ipotesi di ricostruzione dei *missing values* di temperatura, pressione e umidità

Nel database relativo alle misure di temperatura, pressione e umidità relativa ci sono due intervalli isolati di dati mancanti (*missing values*), distribuiti in modo casuale dovuti a un qualche malfunzionamento dello strumento di misura (o all'interruzione del servizio di rilevazione per manutenzione o per altre ragioni).

Per ciascuna delle tre grandezze misurate (T, p, φ), il numero di *missing values* è 1.195, ovvero lo 0,23% del numero totale di misure realizzate (525.600). In altri termini, si può osservare che su un totale di 8760 ore di registrazione dei dati climatici misurati (valori al minuto) ne mancano circa 20.

Data	Orario	Numero di <i>Missing Values</i>			Ampiezza intervalli
		T	p	φ	
27/02/18	05:51 - 06:32	42	42	42	42'
25/05/18	08:44 - 23:59	916	916	916	19 ^h 13'
26/05/18	00:00 - 03:56	237	237	237	
totale		1.195	1.195	1.195	19 ^h 13'

Tabella 3 – Dati mancanti

I dati mancanti sono ininfluenti ai fini dell'analisi delle serie misurate presentando queste un elevato indice di completezza e un'alta continuità [15]:

$$\text{indice di completezza} = \frac{\text{numero di dati validi}}{\text{numero massimo di dati}} = \frac{525.600 - 1.195}{525.600} = 0,998$$

$$\text{continuità} = 1 - 2 \times \frac{\text{numero di intervalli di dati mancanti}}{\text{numero massimo di dati}} = 1 - 2 \times \frac{2}{525.600} = 0,99999$$

Si è scelto comunque di realizzare dei test applicativi delle metodologie di ricostruzione dei missing values di una grandezza misurata, la temperatura T, e di una grandezza derivata, l'umidità massica X, utilizzando degli approcci semplificati e differenziati per intervallo di misura.

Ai fini del test, l'umidità massica X è stata considerata al pari di una grandezza misurata, e pertanto i *missing values* sono stati ricavati a partire dallo studio dei valori e degli andamenti temporali noti, definiti dalle equazioni (1).

Per la definizione delle metodologie di ricostruzione, viste le differenti dimensioni degli intervalli di dati mancanti e gli andamenti temporali caratteristici delle grandezze T e X, si è scelto di differenziare gli algoritmi calcolo.

L'ampiezza estremamente ridotta dell'intervallo temporale di dati mancanti "più breve" (42'), ha suggerito l'utilizzo, come algoritmo di ricostruzione, dell'equazione della *retta di regressione* tra le misure registrate agli estremi dell'intervallo, i valori delle ore 05:50 e 06:33.

I risultati ottenuti con questo tipo di ricostruzione sono coerenti in forma e ampiezza con gli andamenti temporali delle temperature e delle umidità specifiche immediatamente precedenti e immediatamente successivi a quelli da stimare.

La ricostruzione relativa all'intervallo temporale di *missing values* più ampio (19^h13') è stata invece realizzata seguendo un approccio di tipo predittivo attraverso l'algoritmo *PREVISIONE.ETS* del software Microsoft Excel che esegue il calcolo della previsione di un valore futuro a partire dai valori esistenti di una serie temporale [16].

Nell'analisi realizzata sono stati assunti come valori futuri quelli dell'intervallo da ricostruire, e come i valori esistenti quelli misurati in un arco temporale precedente.

Per l'applicazione dell'algoritmo *PREVISIONE.ETS*, viene ipotizzato che la serie esaminata sia composta da variazioni sistematiche (trend, ciclo, stagionalità) e da oscillazioni di disturbo o casuali (errori) e che le oscillazioni sistematiche abbiano un comportamento regolare nel tempo e quindi possano essere stimate e previste per il futuro.

Il calcolo viene eseguito utilizzando l'algoritmo di smorzamento esponenziale (ETS o *Exponential Smoothing*) che utilizza delle funzioni esponenziali per assegnare pesi decrescenti nel tempo ai valori precedenti della serie in modo da dare ai valori più recenti un peso maggiore rispetto a quelli passati.

La versione dell'algoritmo utilizzata (AAA) prevede l'additività (A) delle componenti di disturbo (E), e delle variazioni sistematiche trend (T) e stagionalità (S) [17].

In termini analitici, se indichiamo con $O(t)$ il dato storico osservato al tempo t , e con $P(t)$ la previsione relativa al tempo t , allora le previsioni relative ai tempi futuri $t + 1$, $t + 2$, etc. vengono indicate rispettivamente come $P(t + 1)$, $P(t + 2)$, etc.

Analogamente, se indichiamo con $O(t-1)$ il dato storico osservato al tempo $t-1$, e con $P(t-1)$ la previsione relativa al tempo $t-1$, con $P(t-2)$ viene indicata la previsione relativa al tempo passato $t-2$, e così via.

Nel metodo di smorzamento esponenziale (ETS) la previsione al tempo futuro $P(t + 1)$ viene calcolata come media pesata tra il dato osservato $O(t)$ al tempo t e il valore previsto $P(t)$ al tempo t [18]:

$$P(t+1) = \alpha O(t) + (1-\alpha) P(t) \quad (13)$$

Il valore di α è un numero compreso tra 0 e 1.

Per $\alpha = 1$ il valore futuro sarà pari al valore osservato all'unità temporale precedente $P(t+1) = O(t)$ quindi la previsione ha lo stesso andamento del dato osservato con uno sfasamento temporale costante (pari al valore 1 dell'unità di misura temporale); per $\alpha = 0$ la previsione è una costante $P(t+1) = P(t)$.

Per valori compresi tra 0 e 1 si ottiene una $P(t)$ con un andamento diverso dalla $O(t)$, meno oscillante dei dati reali, non del tutto costante e concorde in parte con l'ultimo dato.

Si dimostra facilmente che, considerando in luogo delle previsioni precedenti i valori osservati, si ottiene per il valore futuro la seguente formulazione:

$$P(t+1) = \alpha O(t) + (1-\alpha)O(t-1) + (1-\alpha)^2 O(t-2) + \dots + (1-\alpha)^k O(t-k) + \dots \quad (14)$$

La previsione viene espressa pertanto come media pesata di tutti i dati storici osservati, con pesi che decrescono esponenzialmente al crescere di k .

L'algoritmo utilizzato individua, tra le possibili previsioni, quella che assegna un peso maggiore ai dati storici osservati in tempi non troppo distanti. Quanto distanti, dipende dal valore che viene assegnato al parametro α ; un valore poco diverso da 1 significa dare maggior importanza ai valori osservati molto prossimi al tempo t . L'ordine della serie potrebbe essere teoricamente infinito ma evidentemente al crescere di k i pesi esponenziali perdono via via importanza.

Accanto a ciascuna previsione dei dati mancanti, è stato definito, con un'altra funzione di Microsoft Excel *PREVISIONE.ETS.INTCONF*, anche l'intervallo di confidenza del 95% [19].

Nella ricostruzione dell'intervallo temporale dei dati mancanti di temperatura sono stati scelti i valori inferiori dell'intervallo di confidenza; questi descrivono un andamento prossimo a quello caratteristico della temperatura misurata ed hanno ampiezze congruenti con quella dei dati misurati nei periodi immediatamente precedente e immediatamente successivo a quello stimato.

Nella tabella 4 a seguire sono riassunte le tipologie degli algoritmi di calcolo utilizzati per le ricostruzioni dei *missing values* di temperatura T e umidità massica X .

MISSING VALUES					PREVISIONE		
	N.	data	orario	durata	tipo	Serie storica	Osservazioni
T	42	27/02/18	05:51-06:32	42'	Regressione lineare	27/02 05:50 e 27/02/18 6:33	2 soli punti
	916	25/05/18	08:44-23:59	19 ^h 13'	PREVISIONE.ETS	Dalle 00:00 del 22/05 alle 08:43 del 25/05	Limite di confidenza inferiore
	237	26/05/18	00:00-03:56				
X	42	27/02/18	05:51-06:32	42'	Regressione lineare	27/02 05:50 e 27/02 06:33	Dati calcolati e non misurati
	916	25/05/18	08:44-23:59	19 ^h 13'	PREVISIONE.ETS	Dalle 00:00 del 22/05 alle 08:43 del 25/05	Dati calcolati e non misurati
	237	26/05/18	00:00-03:56				

Tabella 4 – Dati mancanti

4.3 Validazione delle metodologie utilizzate

4.3.1 Procedura seguita e richiami sugli indicatori statistici di accostamento utilizzati

La procedura seguita per validare i metodi d'interpolazione proposti con questo studio consta dei seguenti passi:

1. per ciascuna grandezza esaminata, estrazione dal data-set di tutte le 525600 registrazioni al minuto di un intero anno (2018), delle sole misure campionate con frequenza oraria (8760 registrazioni orarie). Ricordiamo che il data-set è stato allestito con le misure effettuate con la stazione meteo e solarimetrica installata presso il centro ricerche Casaccia dell'ENEA;
2. applicazione del metodo d'interpolazione prescelto alla serie dei dati orari, al fine di costruire il profilo delle stime interpolate a frequenza sub-oraria;
3. confronto tra le misure e le stime interpolate così ottenute alle diverse frequenze sub-orarie, fino a quelle al minuto, e quantificazione delle differenze con opportuni indici statistici di accostamento.

Messo a punto un qualunque modello a partire da un insieme di dati acquisiti mediante misurazione, occorre infatti confrontare le misure con le corrispondenti stime per stabilire se l'entità degli scostamenti non è tale da invalidare la bontà del modello proposto. A questo scopo sono disponibili numerosi indici di accostamento per quantificare i due aspetti distinti della *precisione* e dell'*esattezza* (o *accuratezza*)⁸. Qui si richiamano le definizioni degli indici che verranno utilizzati nei diagrammi di dispersione mostrati di seguito.

Errore medio (*Mean Bias Error*, MBE). È un indice di esattezza e si calcola con la formula seguente:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

in cui O_i è la i -esima osservazione (= misura), P_i la corrispondente previsione (= stima prodotta con il modello) e $i = 1, 2, \dots, N$ la numerosità delle coppie (O, P) utilizzate per il confronto. Per apprezzare quanto la differenza MBE possa essere indice della precisione, se scarsa o elevata, occorre rapportarla ai valori espressi dalle osservazioni⁹. Si definisce allora l'errore medio percentuale come segue:

$$MBE\% = \frac{MBE}{\bar{O}} \times 100$$

in cui a denominatore è la media delle osservazioni (= misure) stesse:

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i$$

Radice dell'errore quadratico medio (*Root Mean Squared Error*, RMSE). È un indice di precisione e si calcola con la formula seguente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

a cui è abbinato l'indice percentuale:

⁸ Per una descrizione più dettagliata si rimanda nuovamente al rapporto dell'annualità scorsa [6].

⁹ Banalmente, un MBE dell'ordine di decimetri è del tutto trascurabile nel caso di misurazione di distanze chilometriche, al contrario sarebbe inaccettabile se la misurazione riguardasse le dimensioni del parcheggio della propria auto (che sono dell'ordine di qualche metro).

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100$$

Nelle formule precedenti, le osservazioni saranno rappresentate di volta in volta dalle misure al minuto della temperatura, dell'umidità e delle irradianze, mentre le previsioni saranno costituite dalle stime prodotte con i modelli negli istanti (minuti) corrispondenti.

4.3.2 Temperatura

In questo sottoparagrafo saranno mostrati i diagrammi di dispersione e gli indici statistici di accostamento relativi al confronto fra le misure e le stime della temperatura.

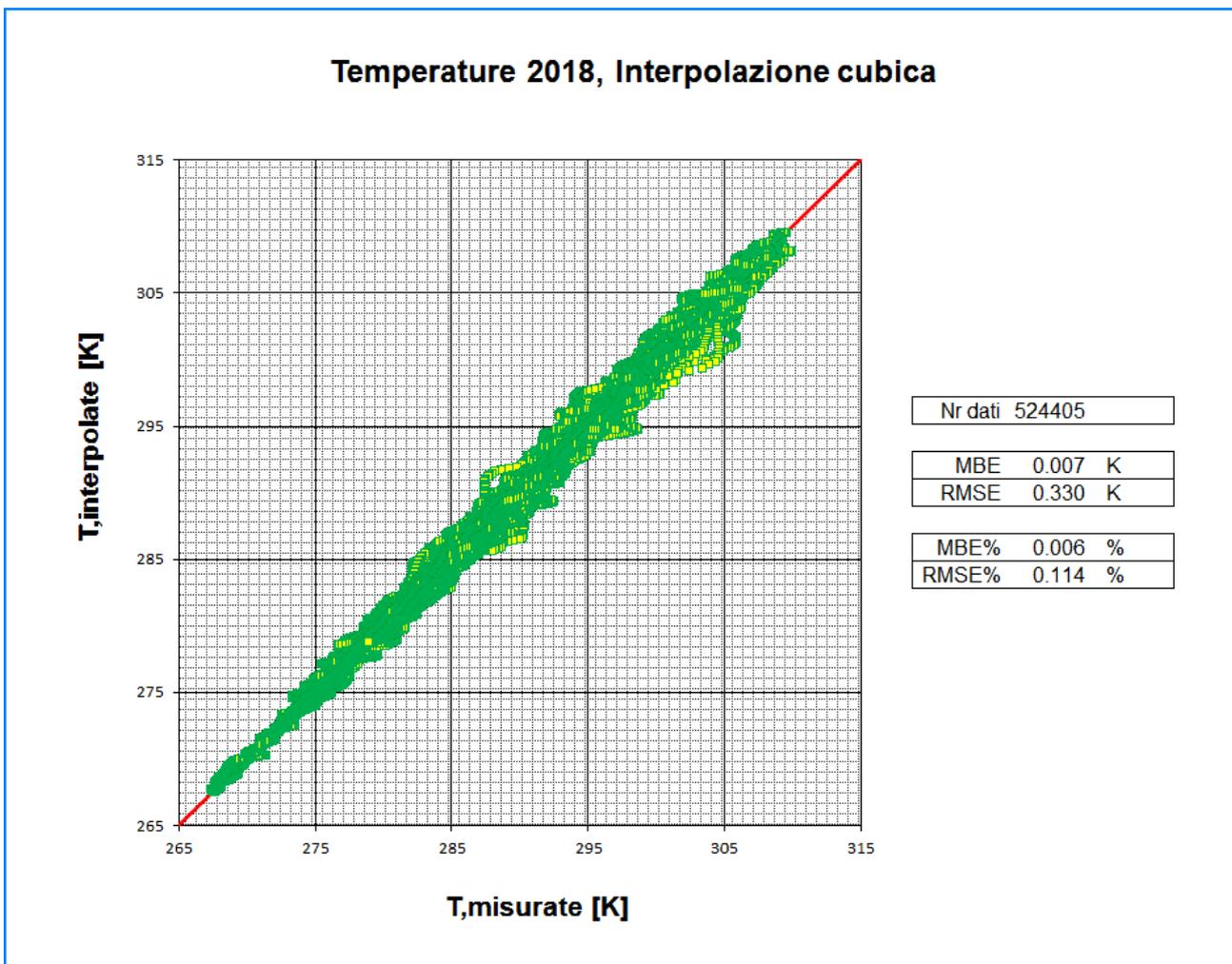


Figura 16 – Diagramma di dispersione per la temperatura

In figura 16 sono mostrati il diagramma di dispersione e gli indici statistici di accostamento per la temperatura. In ascissa sono riportate le misure con frequenza del minuto della temperatura dell'aria disponibili per il 2018, mentre in ordinata vi sono le corrispondenti stime ottenute con il modello d'interpolazione *spline* cubica. L'unità di misura scelto è il kelvin (K) in vece del più usuale grado centigrado (°C) perché l'origine della scala centigrada, ovvero il punto di congelamento dell'acqua, è arbitraria sotto l'aspetto numerico: infatti in presenza di temperature medie prossime allo zero, perfettamente plausibili, gli indici percentuali MBE% e RMSE% assumono valori assurdamamente grandi e perdono il loro valore esplicativo. La scala delle temperature assolute, al contrario, conduce a valori medi (delle misure) necessariamente positivi e forniscono il corretto termine di paragone per valutare l'entità degli scarti. Concludendo, si può affermare che gli scarti registrati

sono davvero contenuti – inferiori o al più confrontabili con la stessa incertezza associata all’operazione di misurazione di questa grandezza, che è all’incirca uguale al decimo di kelvin (o, che è lo stesso, di grado centigrado).

Nella fase iniziale di messa a punto dei modelli è stato esaminato anche il metodo d’interpolazione lineare ed è stato riscontrato che i risultati in termini di sovrapposizione delle stime (interpolate) alle misure effettive sono sostanzialmente uguali all’interpolazione *spline* cubica. Poiché la complessità algoritmica di quest’ultima è considerevolmente maggiore, il suggerimento qui utile è che si potrà ricorrere a metodo lineare, senza pregiudizio, in tutti quei casi in cui gli strumenti software più sofisticati (Matlab e simili) non siano agevolmente disponibili o sviluppabili ad hoc.

Sul grafico di figura 16 si può notare che i punti delle coppie (misura, stima) si aggruppano indistintamente sulla bisettrice e così attenuano l’efficacia esplicativa del grafico stesso. Per questo motivo è più utile costruire grafici in cui è rappresentato solo un sottoinsieme di punti, purché correttamente campionati. Perciò i grafici per l’umidità e le irradianze che saranno mostrati in avanti verranno costruiti con un numero più limitato di punti, estratti dall’intera serie annuale adottando un criterio che garantisca la massima rappresentatività al campione risultante. Per rispettare questa proprietà desiderabile, sono state considerate le coppie (misura, stima) in corrispondenza dei minuti 00:00, 00:59, 01:58, 02:57 e così via, dal 1° gennaio al 31 dicembre, dunque con un passo di 59 minuti fra una coppia e la successiva, passo che evita di prendere punti che coincidessero invariabilmente con gli istanti HH:00 o determinassero intervalli sottomultipli esatti dell’ora. A conforto della liceità del procedimento, nella figura 17 è riproposto il diagramma di dispersione della temperatura, ma riempito dei soli punti campionati con il criterio appena descritto. Come si può constatare, i valori degli indici di accostamento sono rimasti sostanzialmente immutati.

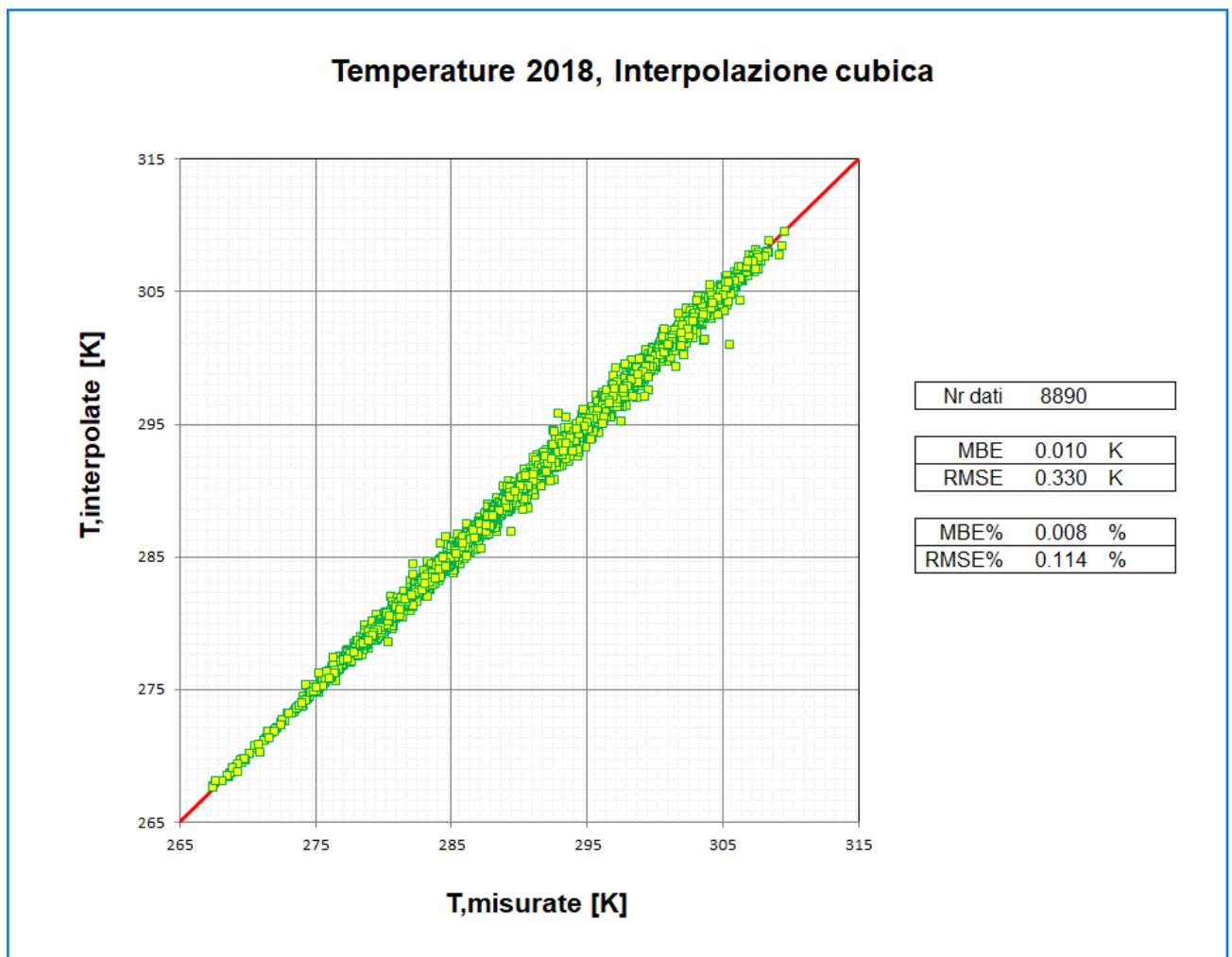


Figura 17 – Diagramma di dispersione per la temperatura (dati campionati)

4.3.3 Umidità massica

Le conclusioni tratte per la temperatura (paragrafo precedente) sono state confermate anche per l'umidità massica, come si evince dalla figura 18. Infatti, anche in questo caso gli scostamenti assoluti e percentuali fra misure e stime sono risultati contenuti. Per il motivo spiegato sopra, qui viene mostrato il confronto relativo a un campione di dati, ma questo è stato estratto in modo da essere rappresentativo dell'intero data set. Grafico e valori degli indici sono relativi all'interpolazione *spline* cubica, però è stato verificato che anche l'interpolazione lineare conduce a risultati analoghi.

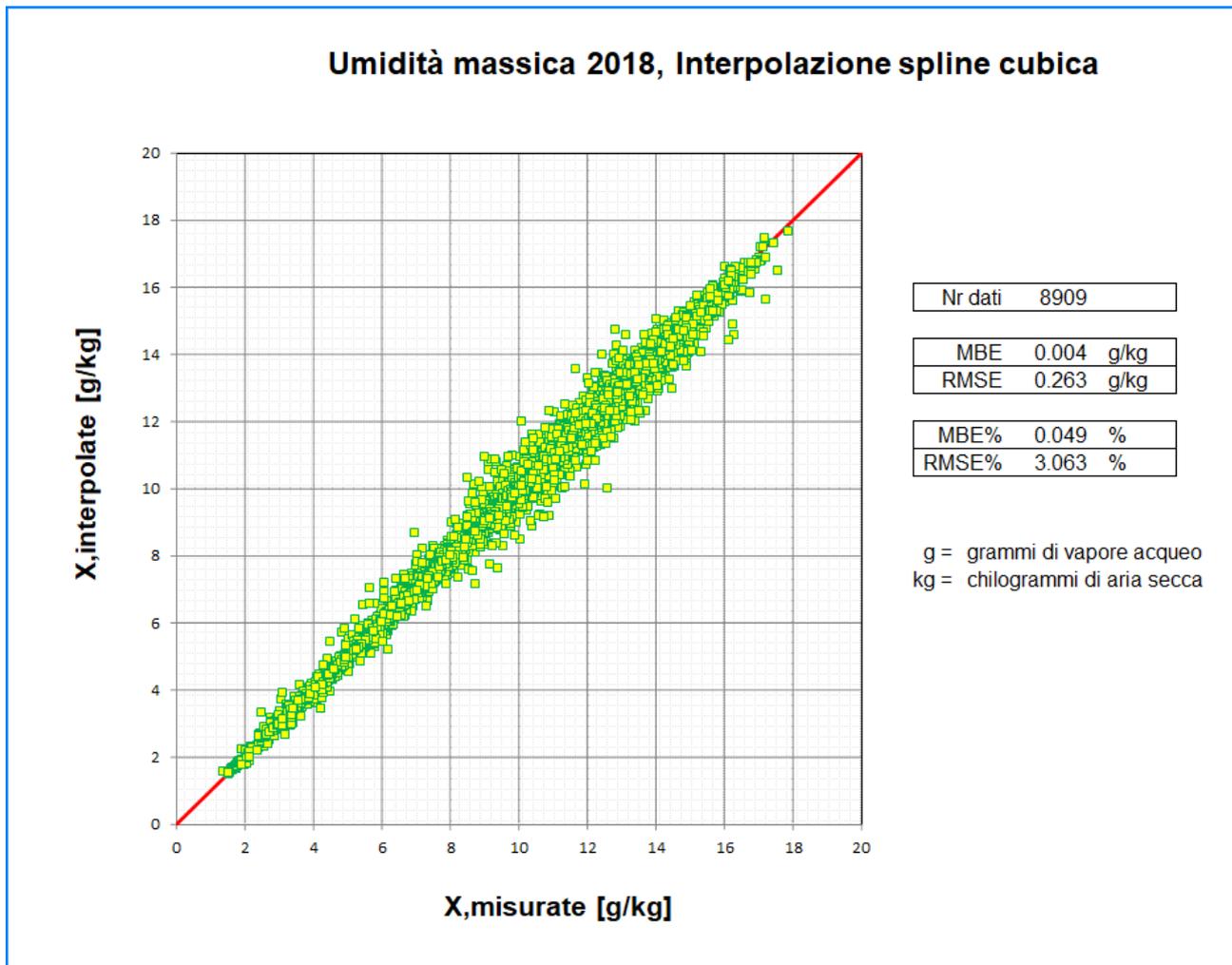


Figura 18 – Diagramma di dispersione per l'umidità massica (dati campionati)

4.3.4 Irradianze

I diagrammi che seguono si riferiscono ai confronti effettuati fra le misure delle tre irradianze GHI, DNI e DfHI e le corrispondenti stime ottenute per interpolazione col modello empirico-statistico sinusoidale che, come si è già visto, è l'unico applicabile nella generalità delle situazioni atmosferiche¹⁰.

Come per le altre grandezze, le misure sono relative al 2018 ed effettuate presso il centro ricerche Casaccia dell'ENEA; la procedura di validazione prevede la costruzione delle stime a partire dalle misure campionate con frequenza oraria, mentre il confronto è effettuato utilizzando le misure (e le corrispondenti stime d'interpolazione ottenute) per tutti gli istanti di acquisizione, ovvero con frequenza di una registrazione al minuto.

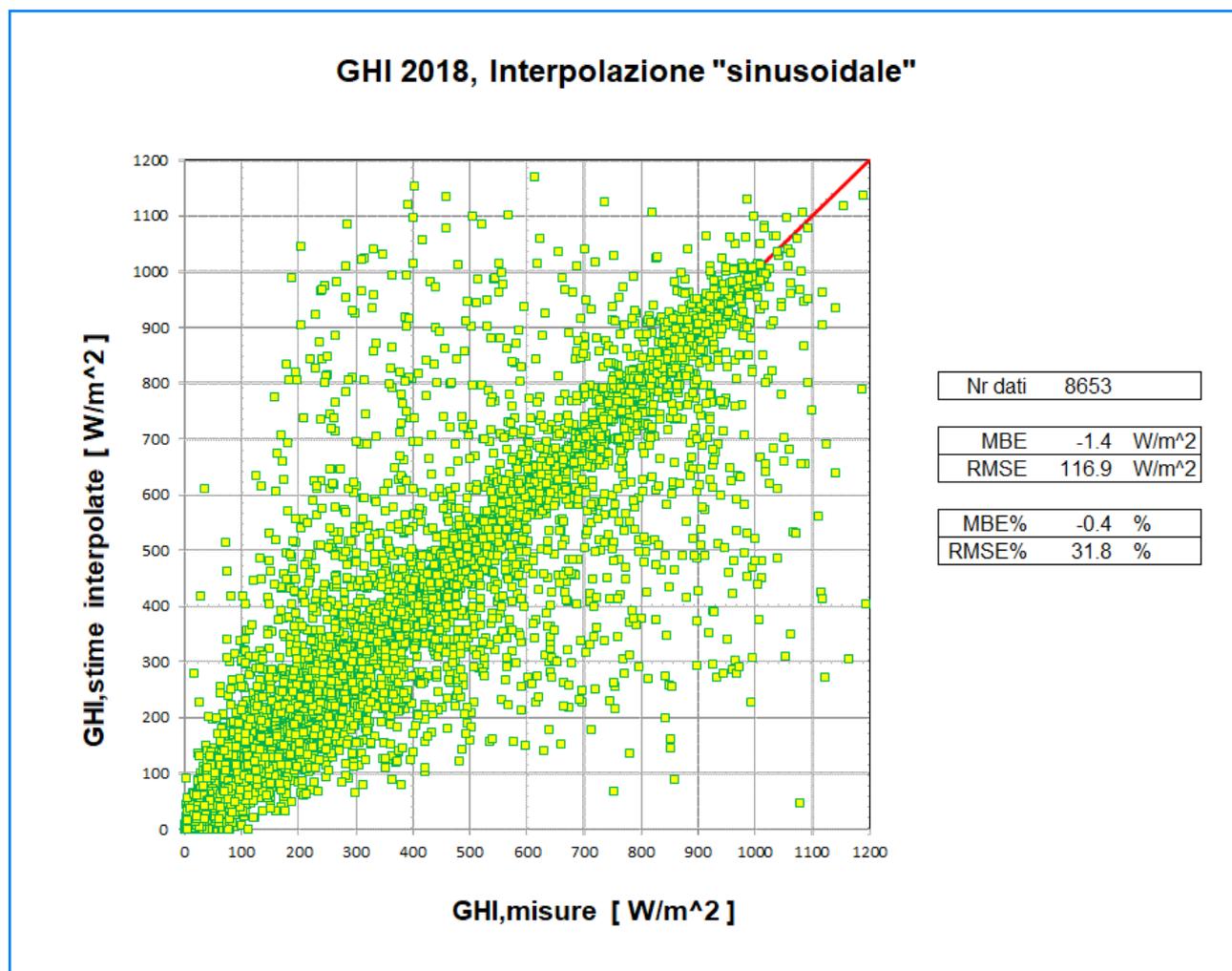


Figura 19 – Diagramma di dispersione per la GHI

In figura 19 sono mostrati il diagramma di dispersione e i valori degli indici di accostamento per la GHI. Come per la temperatura e l'umidità, per favorire la leggibilità del grafico, la popolazione dei dati è stata campionata, secondo un criterio più articolato: sono state escluse a priori le irradianze notturne, che sono invariabilmente nulle, e conseguentemente è stato adottato un passo di campionamento più corto – 29 minuti – per non impoverire troppo la numerosità del campione estratto. Le risultanze depongono a favore della bontà del metodo d'interpolazione adottato per la GHI, sebbene non così confortanti come quelle viste per la

¹⁰ I metodi matematici *splines* cubico e lineare vanno bene solo quando il cielo è sereno, senza fenomeni nuvolosi in atto.

temperatura e l'umidità. Ciò è addebitabile alla natura stessa del fenomeno nuvoloso, che nell'arco di un ora può ben cangiare ripetutamente, imprevedibilmente e in intensità; nonostante ciò, gli indici MBE e RMSE sono di molto inferiori rispetto ai valori massimi che la GHI può assumere (fino a 1200 W/m^2).

La figura appena commentata riunisce a caso tutte le situazioni di cielo; se dal campione si estrae un sottocampione costituito dai soli dati dei giorni sereni, ovvero quelli dei giorni che mostrano un coefficiente di trasmissione globale al suolo non minore di 0.7, si vede che gli indici di accostamento migliorano nettamente (figura 20): ciò grazie, come ripetuto più volte, alla più facile *modellabilità* della condizione del cielo in assenza di nuvole.

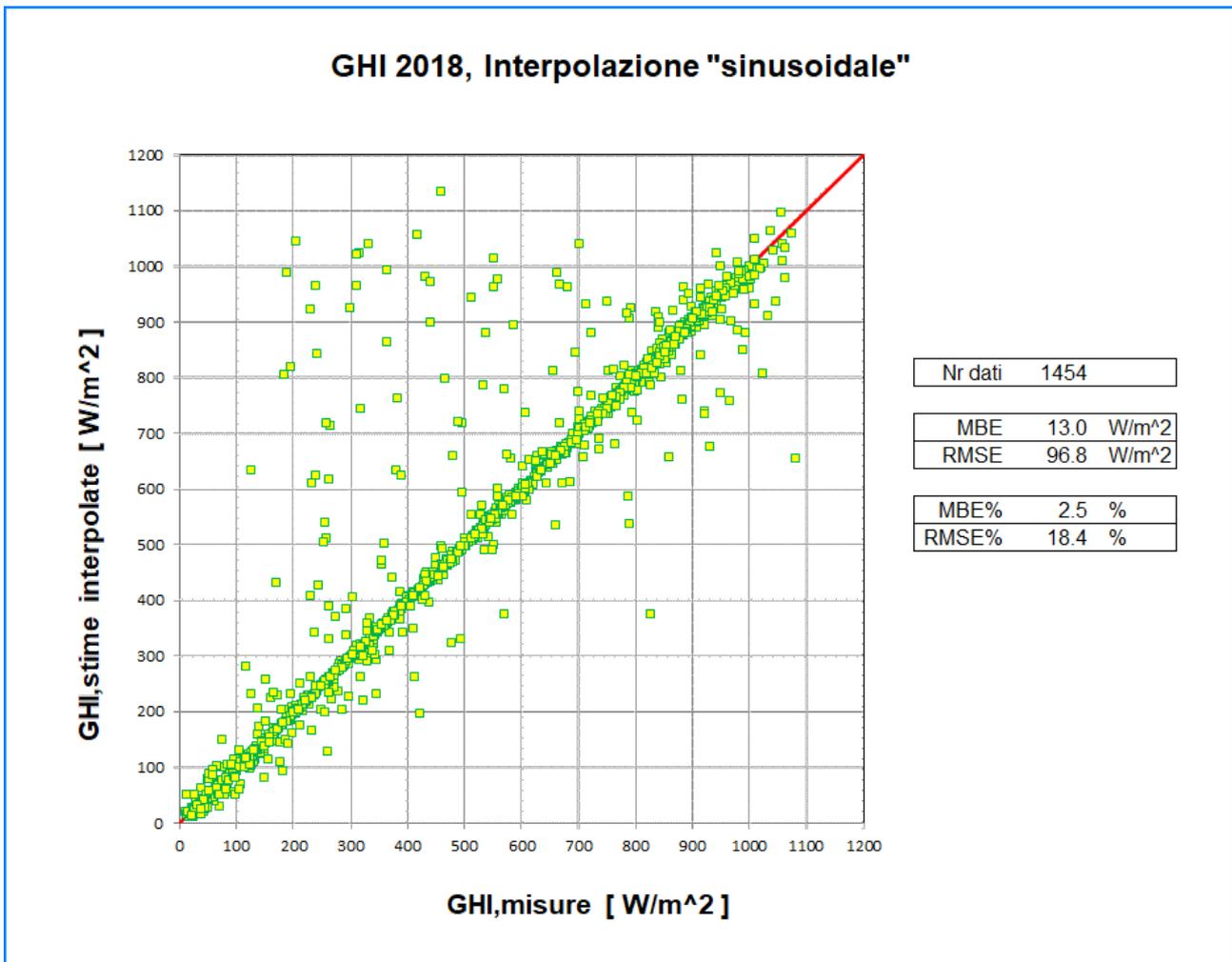


Figura 20 – Diagramma di dispersione per la GHI

Nella figura seguente (n. 21), il diagramma di dispersione e gli indici di accostamento sono mostrati anche per la DNI. Va detto che la difficoltà di modellazione delle singole componenti diretta e diffusa è maggiore rispetto all'irradianza globale, in quanto la suddivisione di quest'ultima nelle sue componenti aggiunge un ulteriore elemento di semplificazione formale rispetto alla realtà¹¹. Nonostante ciò, gli indici di accostamento mostrano valori di poco peggiori rispetto a quelli ottenuti per la GHI.

¹¹ Per definizione, un modello cerca di "catturare" le proprietà essenziali del fenomeno studiato e trascura deliberatamente quelle ritenute ininfluenti.

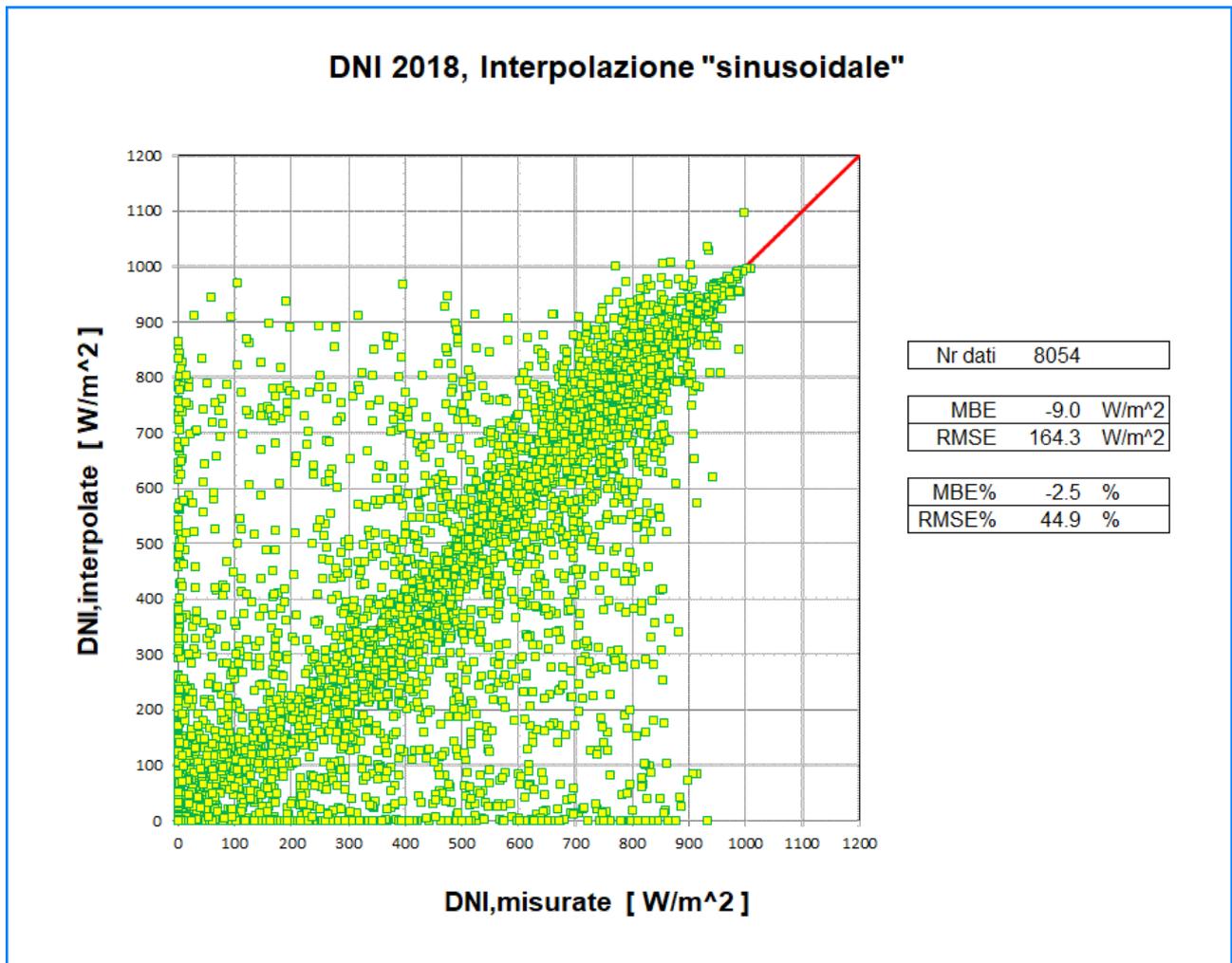


Figura 21 – Diagramma di dispersione per la DNI

Un commento necessita la presenza dei tanti punti disposti sull'asse delle ordinate, relativi a casi in cui le misure sono nulle ma le corrispondenti stime no, anzi assumono valori considerevolmente grandi, e anche dell'altrettanto numerosità di punti disposti sull'asse delle ascisse, relativi a situazioni invertite (valori anche grandi delle misure, nulli per le stime). Un'indagine più approfondita ha permesso di comprendere le possibili cause, come mostrato negli andamenti mostrati in figura 22 e relativi a un giorno con nuvolosità variabile, quando episodi anche brevi di comparsa di nubi si sono frammisti a squarci di cielo con Sole splendente.

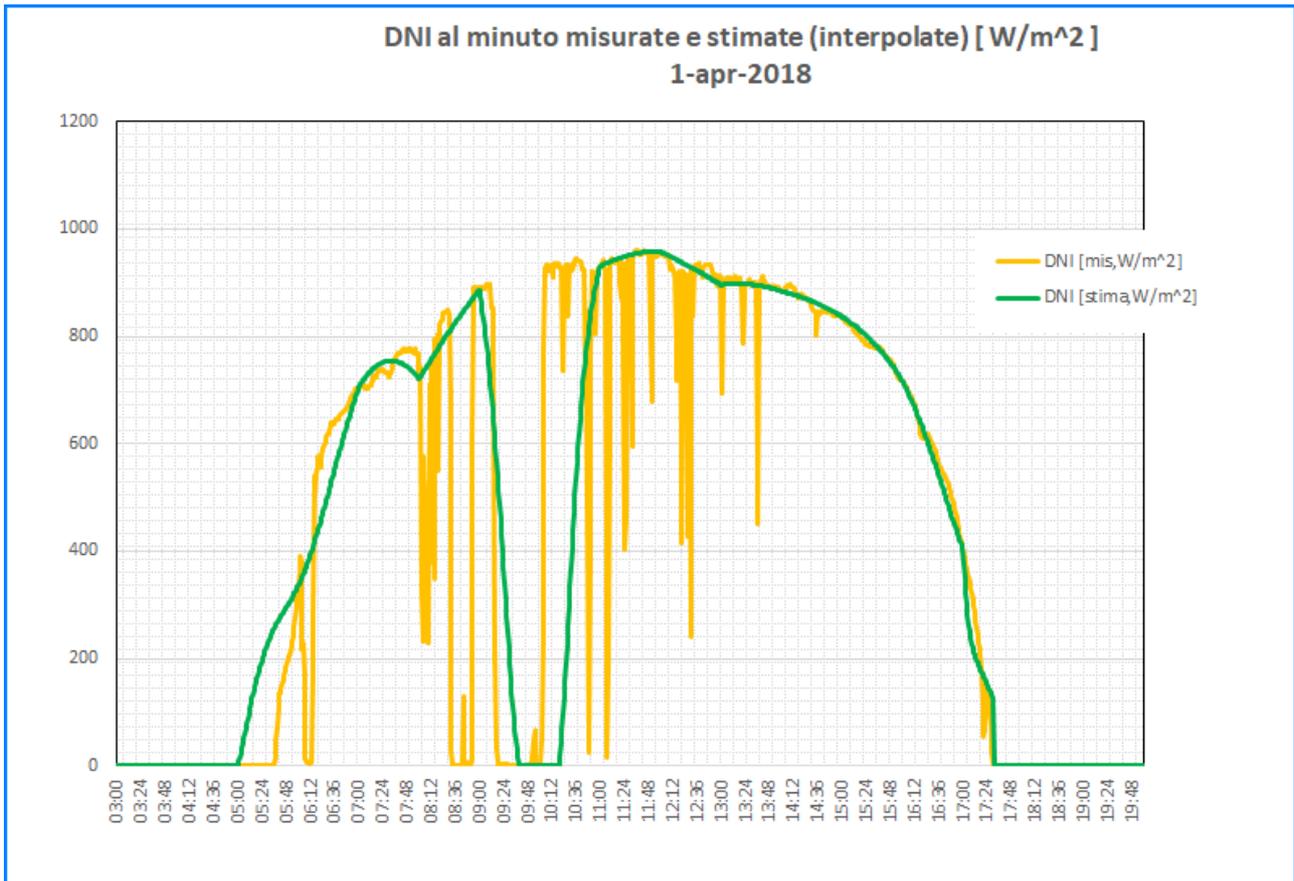


Figura 22 – Andamento giornaliero della DNI (giorno variabile)

Si può evincere come sia possibile allora che in certi momenti la DNI scenda rapidamente a zero – il Sole viene improvvisamente celato da un corpo nuvoloso in transito – e poco dopo risalga altrettanto rapidamente (quando le nubi si sono spostate); ed è pure comprensibile che l’andamento della DNI stimata mediante modelli fatichi a “inseguire” quello reale. Il risultato inevitabile è che si avranno istanti con misure nulle e stime elevate, e viceversa. Poiché questi fenomeni possono presentarsi con durate più corte dell’ora, ne consegue che una modellazione che si basi su misure prese a frequenze orarie non potrà mai essere completamente fedele all’andamento reale.

A questo proposito va ricordato che lo scopo di questo lavoro risiede nella costruzione di profili sub-orari da utilizzare nei software di simulazione, in grado di riprodurre non necessariamente in maniera stringente i valori istantanei delle grandezze coinvolte, bensì quelle proprietà che influiscono sulle prestazioni degli impianti energetici: certamente i valori medi su durate giornaliere, mensili e stagionali; cui si aggiungono quegli aspetti di variabilità irregolare che possono “stressare” gli impianti stessi.

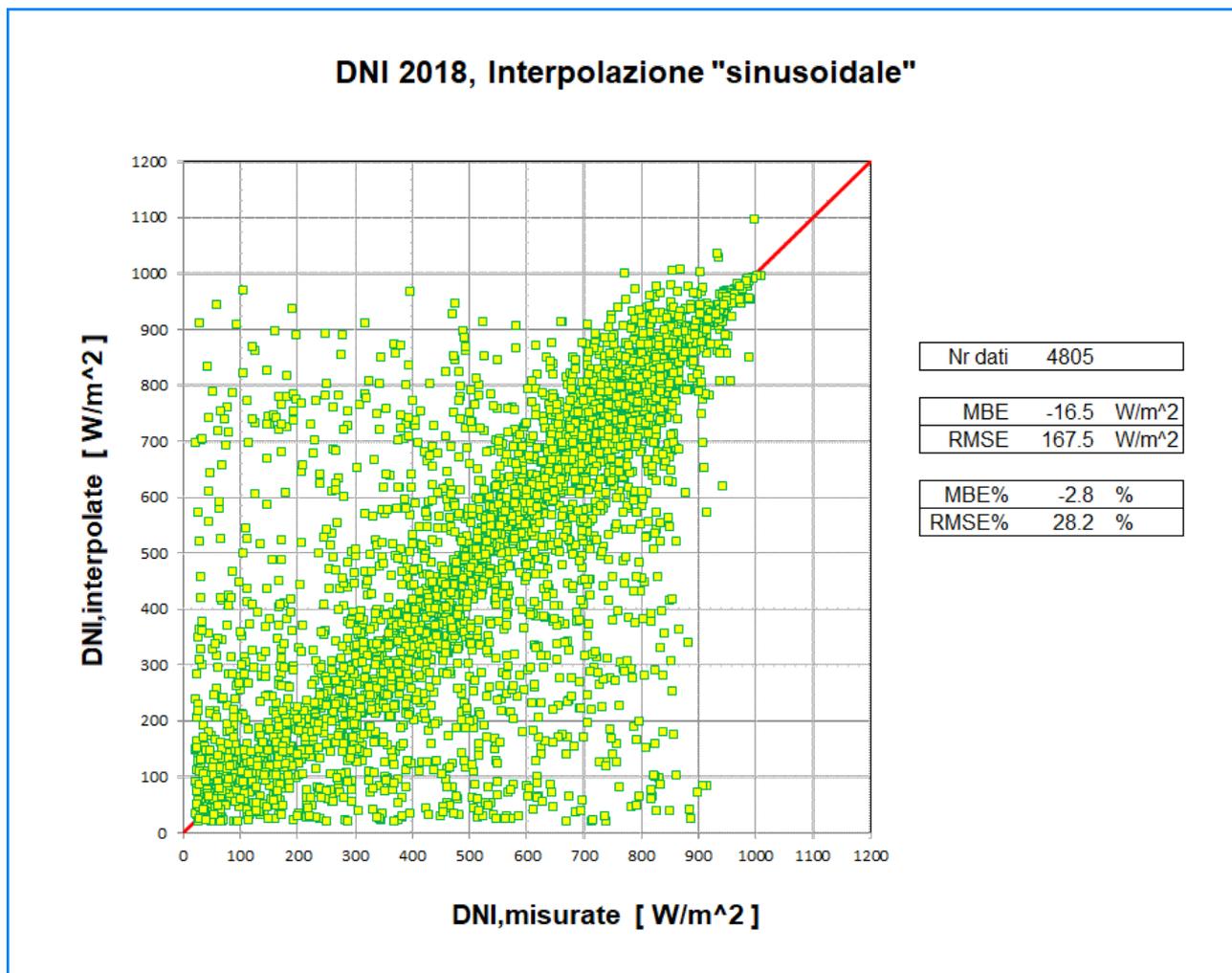


Figura 23 – Diagramma di dispersione per la DNI

In figura 23 è stato riproposto lo stesso confronto, però ora sono stati eliminati tutti i punti che corrispondono a valori di misura o di stima inferiori a 20 W/m^2 , la cui causa è stata riconosciuta e commentata poco fa con l'ausilio della figura 22. Come atteso, l'indice RMSE percentuale si riduce drasticamente.

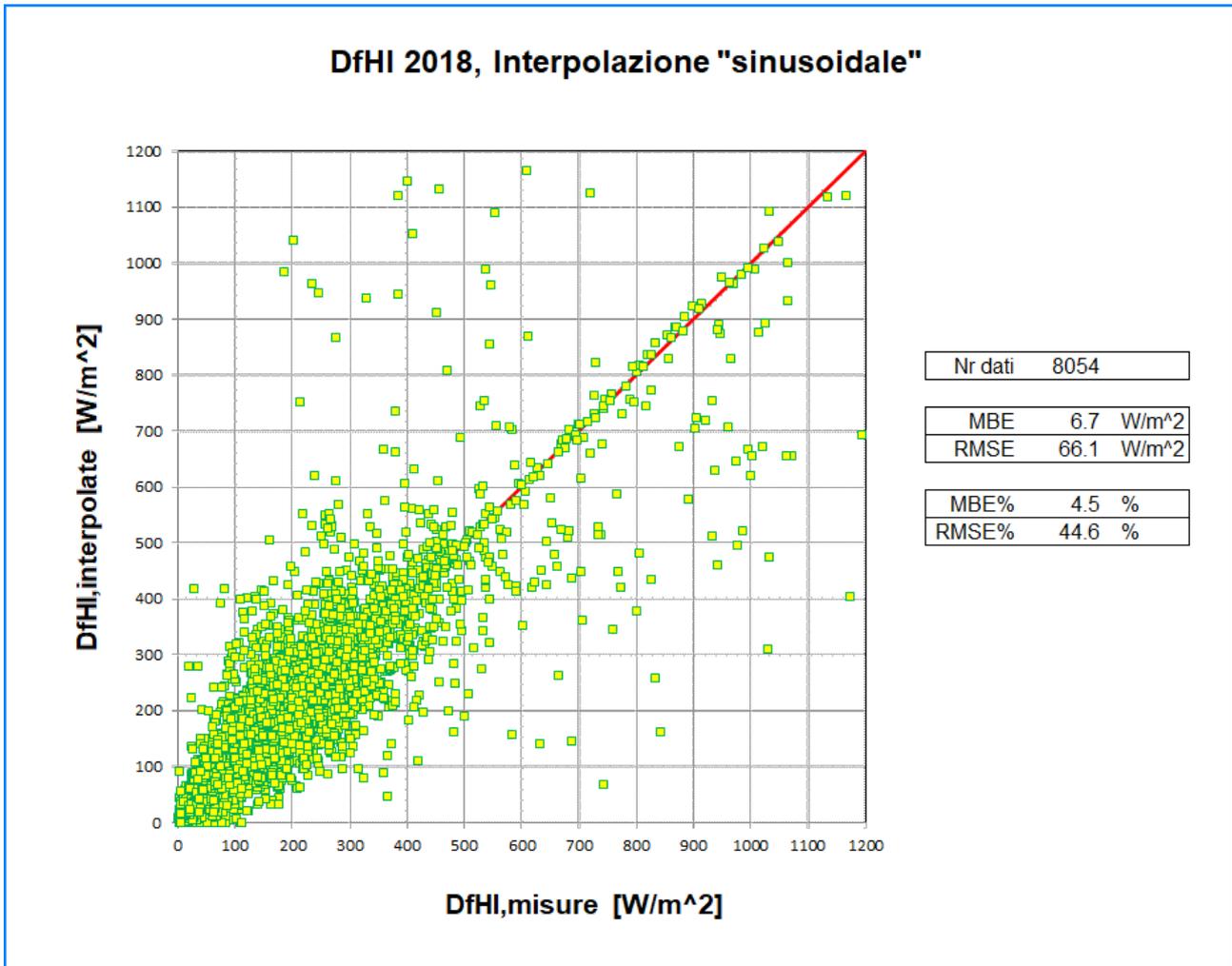


Figura 24 – Diagramma di dispersione per la DfHI

Infine, nella figura 24 sono mostrati il diagramma di dispersione e gli indici di accostamento anche per la componente diffusa dell'irradianza. Valgono anche per la DfHI le considerazioni svolte in precedenza per la DNI, sulla maggiore difficoltà di modellare le singole componenti della GHI. Va aggiunto pure che la DfHI presenta in assoluto valori inferiori rispetto alla GHI (di cui è componente) e alla DNI, pertanto anche le eventuali imprecisioni sul suo calcolo incidono in misura minore nei bilanci energetici. In ogni caso, la figura riporta indici di accostamento perfettamente in linea con quelli ricavati per le altre irradianze.

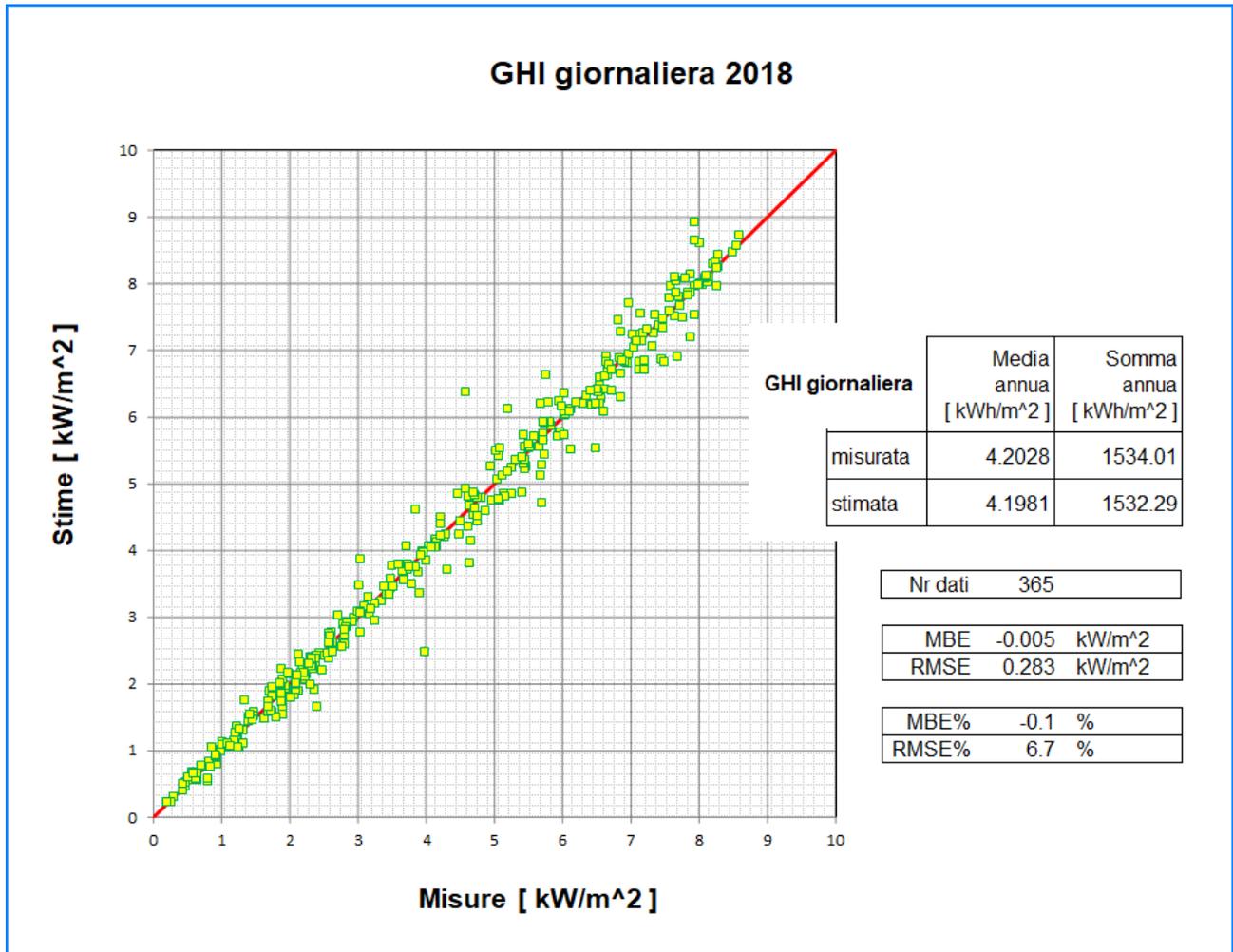


Figura 25 – Diagramma di dispersione per la GHI giornaliera

Poiché le irradianze solari sono input diretti nel calcolo dei bilanci energetici degli edifici, e in maniera diretta determinano pure le prestazioni degli impianti di potenza che fanno uso della fonte solare, è importante controllare non solo i valori istantanei di potenza, ma che anche i valori integrati nel tempo (l'energia) ricavati dalle stime non si discostino dai corrispondenti valori ottenuti in base alle misure. A questo scopo, in figura 25 sono messe a confronto le irradiazioni giornaliere del 2018 della GHI in Casaccia. Come si vede, l'accordo è molto soddisfacente.

5 *Downscaling* temporale dell'anno meteorologico tipico

I metodi di *downscaling* temporale sviluppati e descritti in questo rapporto sono stati concepiti con riferimento a condizioni assolutamente generali. Così, a titolo meramente esemplificativo e per citare una situazione volutamente “estrema”, tali metodi potrebbero essere utilizzati per effettuare l'interpolazione di misure tri-orarie di temperatura rilevate nell'arco di un decennio, al fine di disporre di dati stimati intervallati di mezz'ora; ma più in generale, l'interpolazione potrà essere utilmente applicata:

- a) a qualunque lunghezza temporale della serie di dati di partenza;
- b) qualunque sia la frequenza di registrazione dei record di input (tri-oraria, oraria ecc.);
- c) per l'ottenimento di dati comunque infittiti (al minuto, ogni 10 minuti, semi-orari ecc.).

Ovviamente, minore è la frequenza dei dati di partenza, meno esatte si riveleranno le stime infittite; e comunque, l'entità dell'inesattezza sarà differente per ciascuna grandezza, dipendendo sensibilmente dalla sua variabilità meteorologica. Così, ad esempio, per quanto visto negli studi preliminari pubblicati del rapporto precedente e confermati qui nel corso delle validazioni, la temperatura e l'umidità variano lentamente e con regolarità nel corso della giornata, per cui anche dati inizialmente tri-orari si rivelano adeguati a stabilire un'interpolazione temporale sufficientemente esatta per gli scopi pratici qui perseguiti. Al contrario, le irradiazioni possono variare più repentinamente nel corso della giornata in quanto dipendono fortemente dalla manifestazione — irregolare — delle nuvole; in questo caso, allora, si richiede che la frequenza dei dati di partenza non sia inferiore a quella oraria.

Sebbene i metodi di *downscaling* sviluppati siano generali, l'esigenza di metterli a punto è stata dettata essenzialmente dalla necessità di disporre di dati meteorologici sub-orari da utilizzare in ambito energetico

Va precisato che per applicazioni particolari è richiesta la collezione completa di un solo anno di dati che sia rappresentativa dell'intera serie pluriennale. Questa esigenza ricorre, ad esempio, nell'input delle simulazioni per la progettazione degli impianti (solari, fotovoltaici ecc.), per la stima dei fabbisogni energetici degli edifici, e per lo studio del comportamento dell'ambiente sottoposto a sollecitazioni antropiche (diffusione d'inquinanti ecc.) e/o naturali. L'anno meteorologico tipico (AMT) risponde a questa esigenza (vedasi appendice).

Nella quasi totalità dei casi, gli AMT sono costituiti da dati orari, mentre negli ultimi anni l'elaborazione di dati disaggregati a livello sub-orario si è reso necessario per adattare gli anni-tipo delle grandezze meteorologiche — già disponibili alla frequenza oraria — ai nuovi e più dettagliati input richiesti dai programmi di simulazione per la progettazione degli impianti o il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici. In base a considerazioni già svolte nell'annualità precedente, le frequenze più utili al fine appena accennato sono quelle corrispondenti a intervalli temporali di 10, 15 o 20 minuti.

Nutrite collezioni di anni-tipo a frequenza *oraria* sono disponibili da tempo, ad esempio grazie al Comitato Termotecnico Italiano (CTI), che li ha redatti nell'ambito della propria attività di normazione e in virtù dello stesso Accordo di Programma MiSE-ENEA relativo ad annualità passate. Anche l'ENEA redige AMT limitatamente alla radiazione solare, per qualunque località italiana e per rispondere alla domanda di dati di input per la progettazione e la realizzazione degli impianti di potenza che ricorrono alla fonte solare. Una ricognizione delle fonti disponibili di AMT per le diverse esigenze applicative, con l'indicazione delle località italiane (e loro numerosità) per le quali sono stati redatti, è disponibile in [20].

Il CTI ha allestito un AMT per ciascuna delle 110 province italiane¹² reperendo i dati di altrettante stazioni poste nelle città capoluogo o, se lì non disponibili, in località prossime ad esse [1,2,3,4,5]. I dati provengono

¹² 110 è il numero delle province italiane esistenti all'epoca della redazione degli anni-tipo del CTI. Va precisato che nel 2016 la Regione Sardegna ha rivisto la propria suddivisione territoriale e, in virtù di questa modifica, l'attuale (2021) numero degli enti amministrativi di secondo livello — il primo è quello regionale — è pari a 107 ed è variamente

da reti di stazioni meteorologiche gestite da più enti, di estensione tipicamente regionale, e le stazioni stesse sono state selezionate tenendo conto in generale delle prescrizioni della World Meteorological Organization (WMO, [21]). In ottemperanza ai criteri stabiliti nella norma UNI EN ISO 15927-4 [22], gli AMT sono stati costruiti essenzialmente per stimare l'energia necessaria per la climatizzazione estiva e invernale degli edifici. Pertanto, le grandezze esaminate sono la temperatura dell'aria, l'umidità specifica e le tre irradiazioni solari (globale, diffusa e diretta); peraltro, delle tre irradiazioni, solo quella globale (su piano orizzontale) è effettivamente misurata presso le stazioni, mentre le restanti due sono stimate da questa ricorrendo a modelli. L'intero lavoro è confluito nella revisione e aggiornamento dei dati climatici delle norme UNI inerenti al riscaldamento e raffrescamento degli edifici [23,24,25]. La frequenza dei valori tabellati è oraria. Per quanto riguarda la copertura geografica, la densità dei siti fa sì che si possano utilizzare gli AMT per qualunque località italiana: se questa non coincide con alcuna stazione utilizzata per la redazione degli AMT, si dovrebbe far riferimento a quella più vicina in linea d'aria.

La disponibilità dei metodi di *downscaling* permetterà di tradurre tale patrimonio già disponibile nei nuovi anni-tipo a frequenza sub-oraria. In questa annualità è stato completato il *downscaling* di cinque grandezze meteo — ovvero la temperatura dell'aria, l'umidità relativa tradotta in umidità massica e le tre irradiazioni solari (globale, diretta e diffusa). Per i dettagli, si rimanda al capitolo seguente.

articolato in province (tradizionali), città metropolitane, liberi consorzi comunali (Sicilia) ed enti di decentramento regionale (Friuli-Venezia Giulia).

6 Produzione degli anni meteorologici tipici sub-orari

6.1 Descrizione della procedura

Le elaborazioni effettuate, come già evidenziato, sono state basate sui dati orari attualmente disponibili della norma UNI 10349 forniti dal CTI; eventuali revisioni dei dati chiaramente implicherebbero l'aggiornamento dei corrispondenti dati sub-orari da essi ricavati.

Come si è detto, gli anni-tipo del CTI su base oraria sono in numero 110, uno per provincia italiana. Per ogni provincia è stata individuata una stazione di acquisizione meteorologica, non necessariamente localizzata nel capoluogo, che ha fornito le misure per la redazione dell'anno-tipo rappresentativo del territorio provinciale. A partire da un anno-tipo CTI la procedura qui messa a punto prevede i seguenti passi:

1. estrazione della serie temporale degli 8760 dati orari per grandezza (temperatura, umidità relativa, pressione e irradiazioni globale, diretta e diffusa);
2. calcolo dei valori orari dell'umidità massica a partire da umidità relativa, pressione e temperatura dell'aria;
3. calcolo dei valori orari della DNI (irradianza diretta normale) a partire dalla DI (irradianza diretta) orizzontale, così come presente nel database CTI;
4. applicazione del metodo d'interpolazione – differente a seconda della grandezza interessata – e conseguentemente approntamento delle serie temporali dei 525600 (=365x24x60) dati annui al minuto. Come già detto, le grandezze sottoposte a interpolazione sono divenute cinque: temperatura dell'aria, umidità massica, GHI, DNI e DfHI;
5. estrazione dai dati al minuto delle serie temporali corrispondenti alle frequenze sub-orarie stabilite nell'annualità precedente, ovvero con intervalli pari a 10, 15 e 20 minuti.
6. ricomposizione delle serie temporali delle cinque grandezze in un unico formato digitale, pronto per l'utilizzazione nei programmi di simulazione.

In questo paragrafo sono mostrati a mo' d'esempio alcuni stralci di un anno-tipo fra quelli prodotti, quello relativo all'Aquila (Abruzzo): la scheda d'intestazione e gli estratti delle tre tabelle sub-orarie. Non sono stati inseriti invece gli altri elaborati dell'anno-tipo, quali gli andamenti e gli istogrammi delle temperature, dell'umidità massica e delle irradiazioni e (per queste ultime) la tabella dei valori giornalieri medi mensili, in quanto mostrati nella cartellata relativa a tutti i capoluoghi di regione e alla provincia autonoma di Bolzano (vedi paragrafo seguente).



Anno-tipo meteorologico e della radiazione solare

Fonte dei dati: Anni-tipo di frequenza oraria pubblicati dal **CTI - Comitato Termotecnico Italiano** rielaborati a frequenza sub-oraria dall' **ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile**

Località: L'Aquila

Frequenze: 1 record ogni 15', 20' e 30'
(3 tabelle)

Coordinate geografiche

latitudine 42°21.0' Nord
longitudine 13°24.0' Est da Greenwich

Significato delle grandezze

T	temperatura [°C]
Ux	umidità massica [g _{H2O} /kg _{AS}] (H ₂ O = vapore acqueo; AS = aria secca)
GHI	irradianza globale su piano orizzontale [W/m ²]
DNI	irradianza diretta normale [W/m ²]
Dif.HI	irradianza diffusa su piano orizzontale [W/m ²]
GMT	Tempo medio di Greenwich, cui sono riferiti i dati

Osservazione. rispetto all'ora adottata in Italia (Fuso orario dell'Europa Centrale), il GMT differisce:
- di un'ora in meno in inverno (le 12:00 di GMT corrispondono alle 13:00 italiane)
- di due ore in meno nel periodo dell'ora legale estiva
(per cui le 12:00 GMT corrispondono alle 14:00 italiane)

Figura 26 – Esempio di anno-tipo sub-orario: pagina d'intestazione

Mese	Giorno	Ora [GMT]	Minuto	T [°C]	Ux [g/kg]	GHI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	DfHI [W/m ²]
1	1	0	0	2.8	5.005	0	0	0
1	1	0	15	2.7	4.972	0	0	0
1	1	0	30	2.6	4.938	0	0	0
1	1	0	45	2.5	4.901	0	0	0
1	1	1	0	2.4	4.863	0	0	0
1	1	1	15	2.3	4.815	0	0	0
1	1	1	30	2.1	4.758	0	0	0
1	1	1	45	2.0	4.711	0	0	0
1	1	2	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	15	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	30	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	45	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	15	1.9	4.697	0	0	0
1	1	3	30	2.0	4.709	0	0	0
1	1	3	45	2.0	4.72	0	0	0
1	1	4	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	15	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	30	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	45	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	15	2.1	4.742	0	0	0
1	1	5	30	2.2	4.777	0	0	0
1	1	5	45	2.3	4.812	0	0	0
1	1	6	0	2.3	4.829	0	0	0
1	1	6	15	2.3	4.823	0	0	0
1	1	6	30	2.3	4.811	0	0	0
1	1	6	45	2.2	4.799	0	0	0
1	1	7	0	2.2	4.794	0	0	0
1	1	7	15	2.2	4.806	0.5	1.5	0.4
1	1	7	30	2.3	4.838	10.6	3.0	10.3
1	1	7	45	2.5	4.883	27.2	4.6	26.5
---	---							
7	28	10	15	23.5	8.504	862.0	740.6	197.6
7	28	10	30	24.1	8.599	881.2	755.1	196.3
7	28	10	45	24.8	8.695	897.4	768.0	195.3
7	28	11	0	25.3	8.738	910.3	779.5	194.6
7	28	11	15	25.7	8.694	920.2	792.2	191.9
7	28	11	30	26.1	8.591	926.6	803.7	189.3
7	28	11	45	26.4	8.467	929.5	813.8	186.9
7	28	12	0	26.6	8.365	928.8	822.7	184.5
7	28	12	15	26.8	8.279	927.6	837.4	179.0
7	28	12	30	27.0	8.192	922.6	850.8	173.7
7	28	12	45	27.1	8.124	913.9	862.7	168.6
7	28	13	0	27.2	8.097	901.3	873.4	163.6
7	28	13	15	27.3	8.219	879.0	868.7	164.3
7	28	13	30	27.4	8.487	853.3	863.0	164.4
7	28	13	45	27.4	8.754	824.4	856.4	163.9
---	---							
12	31	22	15	1.8	4.002	0	0	0
12	31	22	30	1.8	4.048	0	0	0
12	31	22	45	1.8	4.111	0	0	0
12	31	23	0	1.8	4.185	0	0	0
12	31	23	15	1.8	4.258	0	0	0
12	31	23	30	1.8	4.321	0	0	0
12	31	23	45	1.8	4.367	0	0	0

Figura 27 – Esempio di anno-tipo sub-orario: stralcio dei dati di frequenza 1/15'

Mese	Giorno	Ora [GMT]	Minuto	T [°C]	Ux [g/kg]	GHI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	DfHI [W/m ²]
1	1	0	0	2.8	5.005	0	0	0
1	1	0	20	2.7	4.962	0	0	0
1	1	0	40	2.6	4.915	0	0	0
1	1	1	0	2.4	4.865	0	0	0
1	1	1	20	2.2	4.799	0	0	0
1	1	1	40	2.0	4.728	0	0	0
1	1	2	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	20	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	40	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	20	1.9	4.699	0	0	0
1	1	3	40	2.0	4.715	0	0	0
1	1	4	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	20	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	40	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	20	2.1	4.745	0	0	0
1	1	5	40	2.2	4.794	0	0	0
1	1	6	0	2.3	4.827	0	0	0
1	1	6	20	2.3	4.822	0	0	0
1	1	6	40	2.2	4.806	0	0	0
1	1	7	0	2.2	4.794	0	0	0
1	1	7	20	2.2	4.807	2.5	2.0	2.2
1	1	7	40	2.4	4.853	22.1	4.1	21.5
1	1	8	0	2.6	4.917	35.0	6.1	33.8
---	---							
7	28	10	40	19.6	8.333	892.3	763.9	195.6
7	28	11	0	20.3	8.057	910.3	779.5	194.6
7	28	11	20	21.0	7.728	922.7	796.2	191.0
7	28	11	40	21.6	7.334	928.9	810.6	187.7
7	28	12	0	22.1	7.064	928.8	822.7	184.5
7	28	12	20	22.8	6.965	926.4	842.0	177.2
7	28	12	40	23.4	6.895	917.2	858.9	170.3
7	28	13	0	23.7	6.863	901.3	873.4	163.6
7	28	13	20	23.7	6.968	870.8	866.9	164.4
7	28	13	40	23.6	7.247	834.4	858.7	164.1
7	28	14	0	23.6	7.495	792.5	848.7	162.7
7	28	14	20	23.7	7.601	759.2	868.0	152.0
7	28	14	40	23.9	7.671	719.2	884.2	141.5
7	28	15	0	24.0	7.748	672.8	897.2	130.9
7	28	15	20	23.9	7.857	617.5	885.7	128.9
7	28	15	40	23.7	7.992	557.4	871.3	124.6
7	28	16	0	23.4	8.137	493.3	853.7	117.8
7	28	16	20	23.0	8.294	424.7	814.2	114.3
7	28	16	40	22.6	8.469	354.1	769.5	106.7
7	28	17	0	22.3	8.621	282.5	717.3	95.4
7	28	17	20	22.1	8.726	208.1	530.1	102.1
---	---							
12	31	21	20	1.5	4.014	0	0	0
12	31	21	40	1.5	4.013	0	0	0
12	31	22	0	1.6	3.967	0	0	0
12	31	22	20	1.6	3.907	0	0	0
12	31	22	40	1.7	3.888	0	0	0
12	31	23	0	1.8	3.905	0	0	0
12	31	23	20	1.9	3.934	0	0	0
12	31	23	40	2.1	3.962	0	0	0

Figura 28 – Esempio di anno-tipo sub-orario: stralcio dei dati di frequenza 1/20'

Mese	Giorno	Ora [GMT]	Minuto	T [°C]	Ux [g/kg]	GHI [W/m ²]	DNI [W/m ²]	DfHI [W/m ²]
1	1	0	0	2.8	5.005	0	0	0
1	1	0	30	2.6	4.938	0	0	0
1	1	1	0	2.4	4.863	0	0	0
1	1	1	30	2.1	4.758	0	0	0
1	1	2	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	2	30	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	0	1.9	4.692	0	0	0
1	1	3	30	2.0	4.709	0	0	0
1	1	4	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	4	30	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	0	2.0	4.726	0	0	0
1	1	5	30	2.2	4.777	0	0	0
1	1	6	0	2.3	4.829	0	0	0
1	1	6	30	2.3	4.811	0	0	0
1	1	7	0	2.2	4.794	0	0	0
1	1	7	30	2.3	4.838	10.6	3.0	10.3
1	1	8	0	2.6	4.934	35.0	6.1	33.8
1	1	8	30	3.0	5.090	82.7	44.2	71.2
---	---							
7	28	6	30	13.8	9.730	309.3	342.1	154.9
7	28	7	0	15.6	9.762	407.3	469.5	155.9
7	28	7	30	16.9	9.835	497.0	543.1	163.5
7	28	8	0	18.1	9.885	587.5	605.8	171.9
7	28	8	30	19.3	9.667	664.9	649.9	177.4
7	28	9	0	20.4	9.274	736.3	684.1	185.6
7	28	9	30	21.6	8.780	793.2	707.5	191.8
7	28	10	0	22.8	8.461	839.8	724.5	199.2
7	28	10	30	24.1	8.599	881.2	755.1	196.3
7	28	11	0	25.3	8.738	910.3	779.5	194.6
7	28	11	30	26.1	8.591	926.6	803.7	189.3
7	28	12	0	26.6	8.365	928.8	822.7	184.5
7	28	12	30	27.0	8.192	922.6	850.8	173.7
7	28	13	0	27.2	8.097	901.3	873.4	163.6
7	28	13	30	27.4	8.487	853.3	863.0	164.4
7	28	14	0	27.5	8.876	792.5	848.7	162.7
7	28	14	30	27.8	8.806	740.0	876.5	146.7
---	---							
12	31	14	30	6.3	4.537	172.8	410.0	103.2
12	31	15	0	5.5	4.568	94.5	168.7	78.0
12	31	15	30	3.9	4.438	7.4	0	7.4
12	31	16	0	2.8	4.308	0	0	0
12	31	16	30	2.8	4.308	0	0	0
12	31	17	0	2.8	4.308	0	0	0
12	31	17	30	2.8	4.308	0	0	0
12	31	18	0	2.8	4.308	0	0	0
12	31	18	30	2.5	4.231	0	0	0
12	31	19	0	2.2	4.126	0	0	0
12	31	19	30	2.1	4.079	0	0	0
12	31	20	0	2.0	4.043	0	0	0
12	31	20	30	1.9	4.006	0	0	0
12	31	21	0	1.8	3.985	0	0	0
12	31	21	30	1.8	3.985	0	0	0
12	31	22	0	1.8	3.985	0	0	0
12	31	22	30	1.8	4.048	0	0	0
12	31	23	0	1.8	4.185	0	0	0
12	31	23	30	1.8	4.321	0	0	0

Figura 29 – Esempio di anno-tipo sub-orario: stralcio dei dati di frequenza 1/30'

6.2 Grafici di sintesi delle grandezze sub-orarie elaborate per i capoluoghi di regione italiani

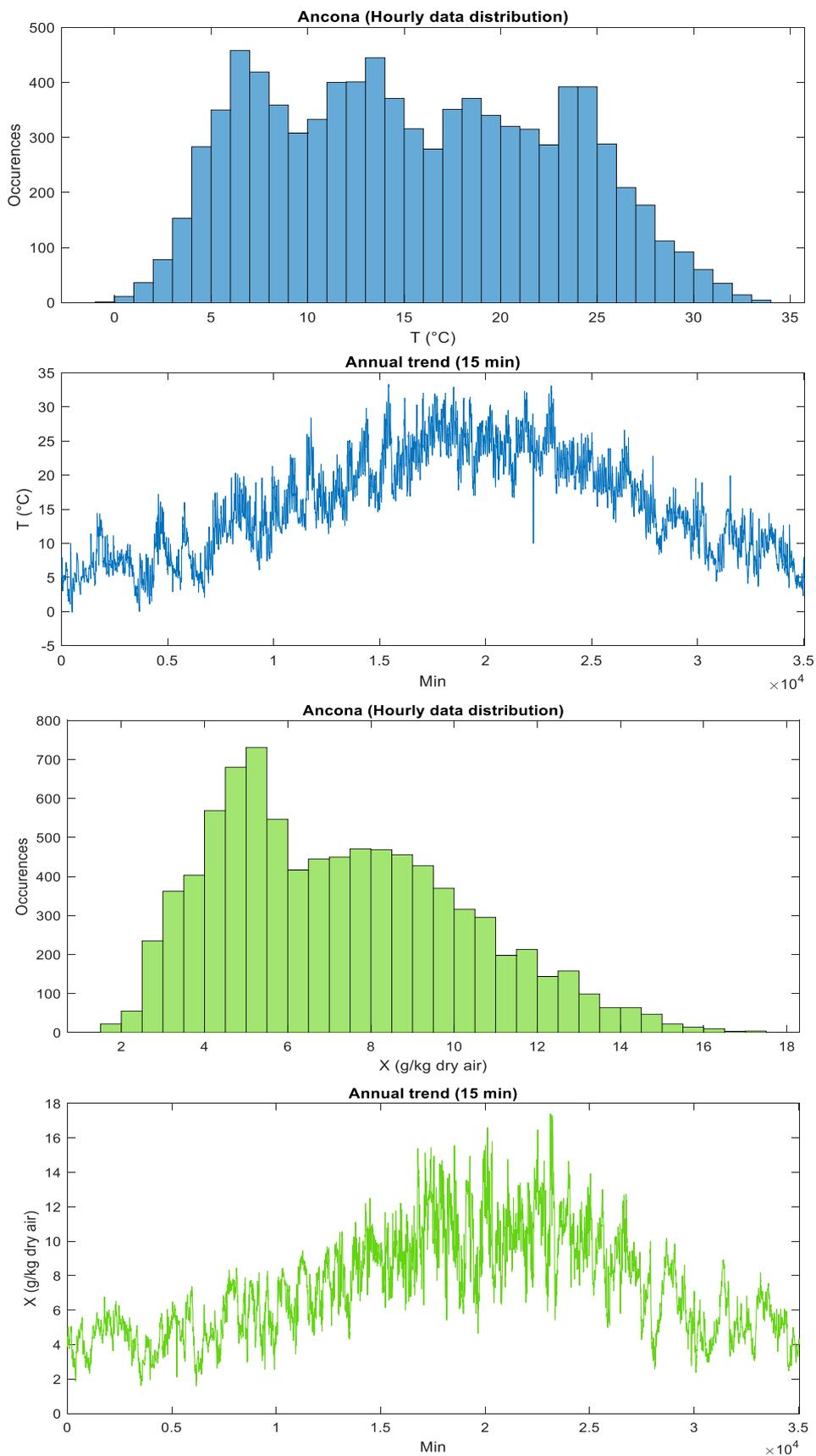
Si riportano di seguito, a scopo esemplificativo, alcuni grafici e tabelle di sintesi delle grandezze climatiche elaborate a scala sub-oraria. Sono relativi alle città capoluoghi di regione, cui è stata aggiunta Bolzano, dell'omonima provincia autonoma. L'elenco con i riferimenti geografici è riportato nella tabella seguente.

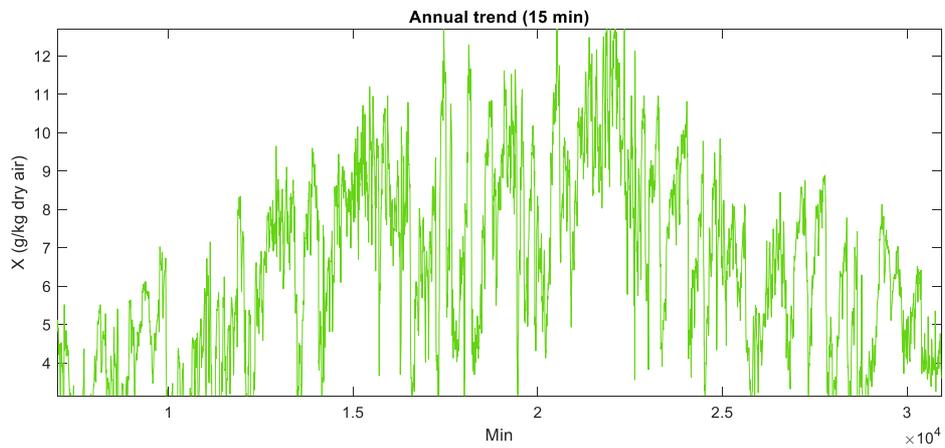
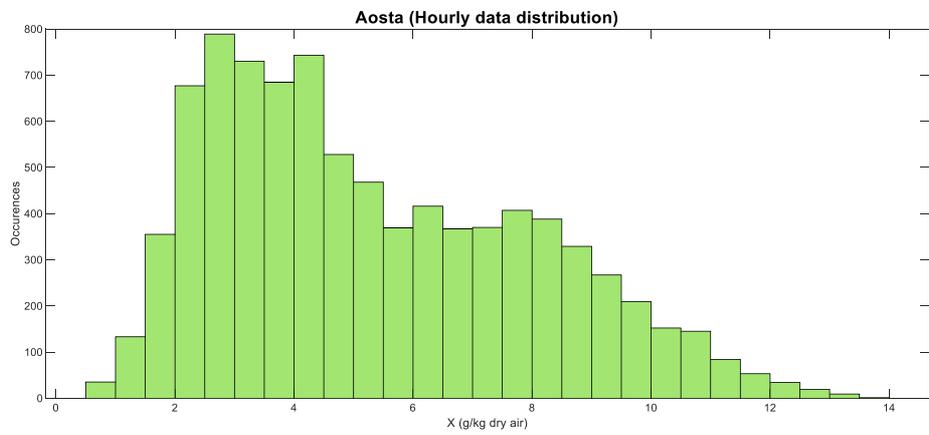
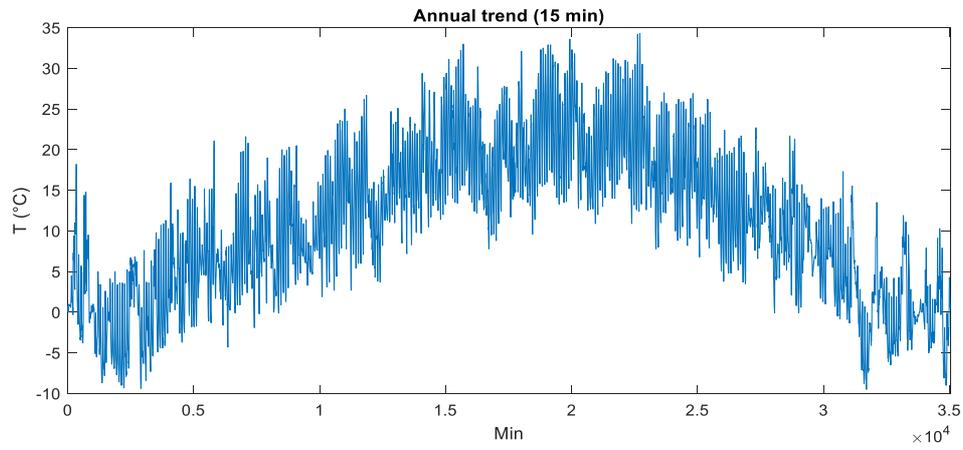
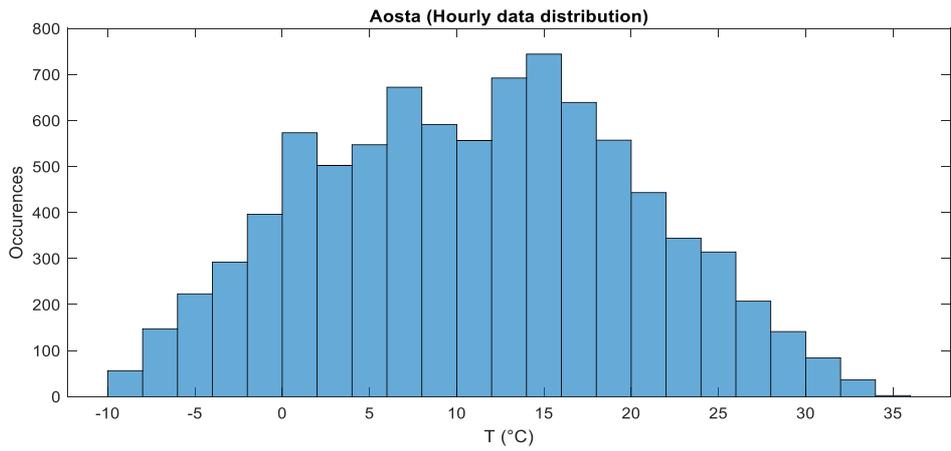
Città	Regione	Latitudine	Longitudine	Altitudine	Stazione di riferimento
Ancona	Marche	43.6167	13.5167	91	Ancona - Regione (AN)
Aosta	Valle d'Aosta	45.7392	7.3636	545	Saint-Christophe (AO)
Bari	Puglia	40.9994	16.7489	189	Binetto (BA)
Bologna	Emilia-Romagna	44.5008	11.3289	48	Bologna (BO)
Bolzano	Trentino-Alto Adige	46.4997	11.3433	265	Bolzano (BZ)
Cagliari	Sardegna	39.3225	8.9858	20	Decimomannu (CA)
Campobasso	Molise	41.5200	14.7800	581	Jelsi (CB)
Catanzaro	Calabria	38.6714	16.4089	714	Chiaravalle Centrale (CZ)
Firenze	Toscana	43.7714	11.2647	70	Firenze (FI)
Genova	Liguria	44.3661	9.1261	50	Recco - Polanesi (GE)
L'Aquila	Abruzzo	42.3500	13.4000	700	L'Aquila (AQ)
Milano	Lombardia	45.4667	9.2167	122	Milano - via Juvara (MI)
Napoli	Campania	40.7333	14.6500	55	Battipaglia (SA) (*)
Palermo	Sicilia	38.1311	13.3278	50	Palermo (PA)
Perugia	Umbria	42.9531	12.6792	220	Foligno (PG)
Potenza	Basilicata	40.7581	15.9811	767	Oppido Lucano (PZ)
Roma	Lazio	41.9211	12.5231	32	Roma (RM)
Torino	Piemonte	44.9611	7.7097	226	Bauducchi (TO)
Trento	Trentino-Alto Adige	46.0231	11.1269	185	Trento Sud (TN)
Trieste	Friuli-Venezia Giulia	45.6481	13.7553	2	Trieste - Molo Bandiera (TS)
Venezia	Veneto	45.3494	12.1417	0	Campagna Lupia - Valle Averte (VE)
(*) stazione rappresentativa per la provincia di Napoli negli anni tipici CTI, sebbene sia in provincia di Salerno					
Unità: Latitudine in gradi sessadecimali Nord, Longitudine in gradi sessadecimali Est da Greenwich					

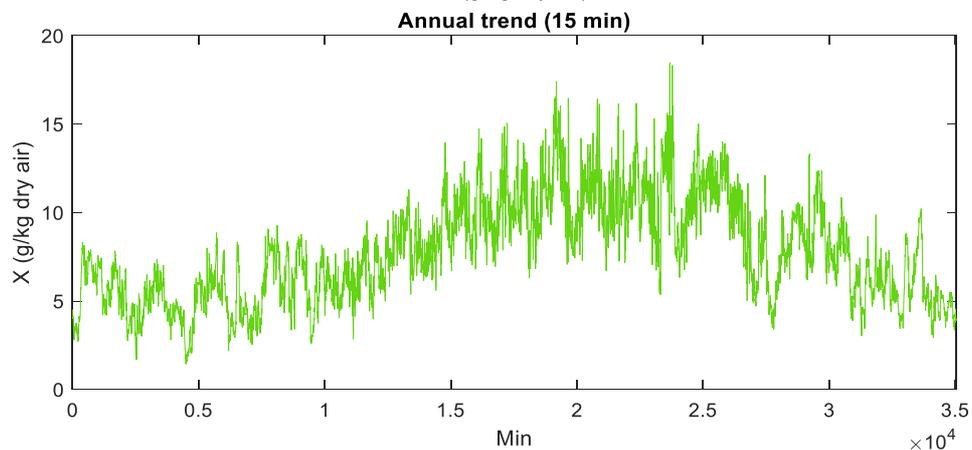
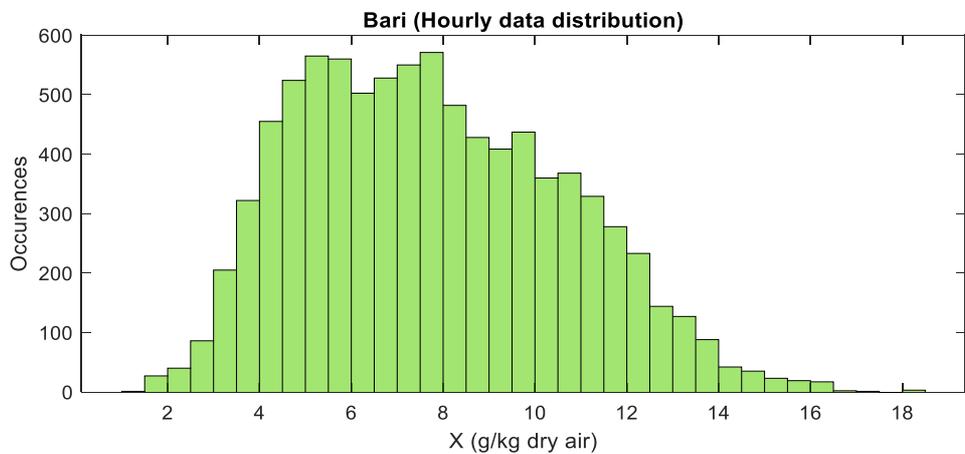
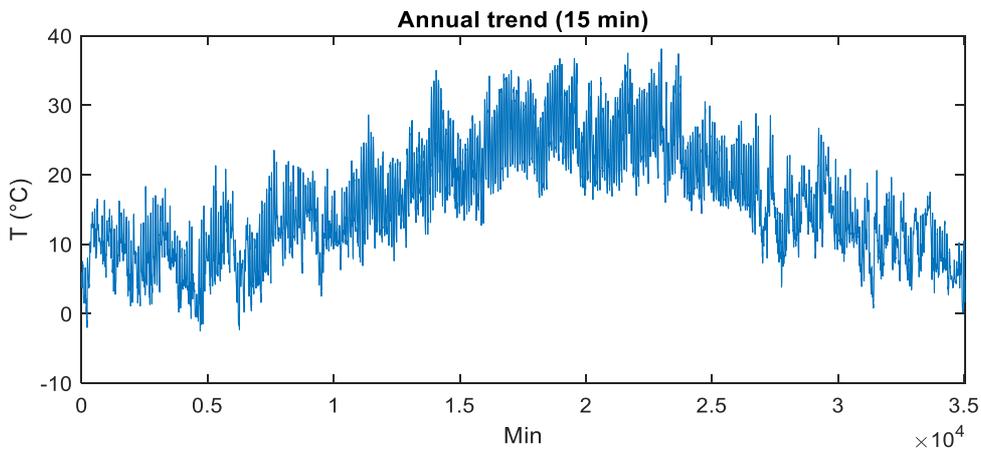
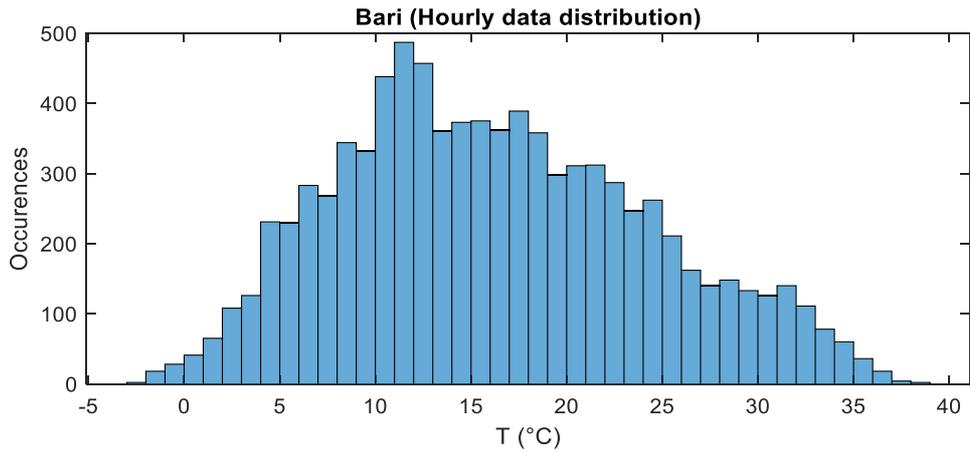
Tabella 5 – Tabella delle città per le quali sono mostrate le sintesi degli anni-tipo sub-orari

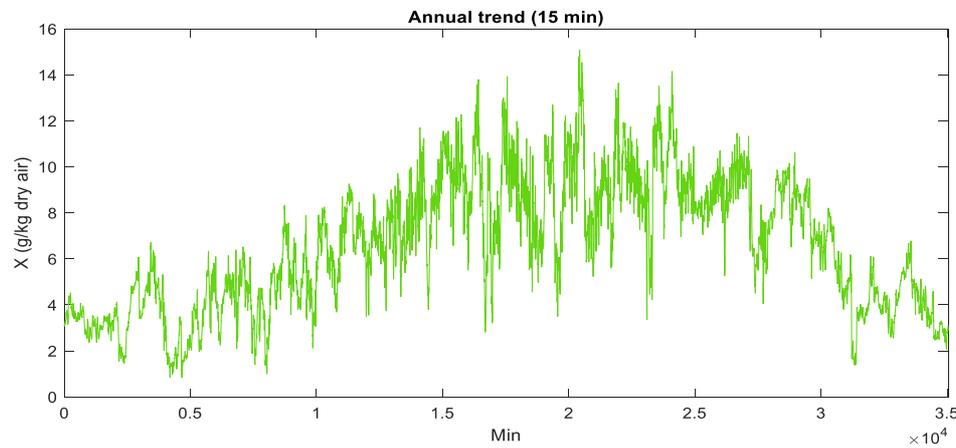
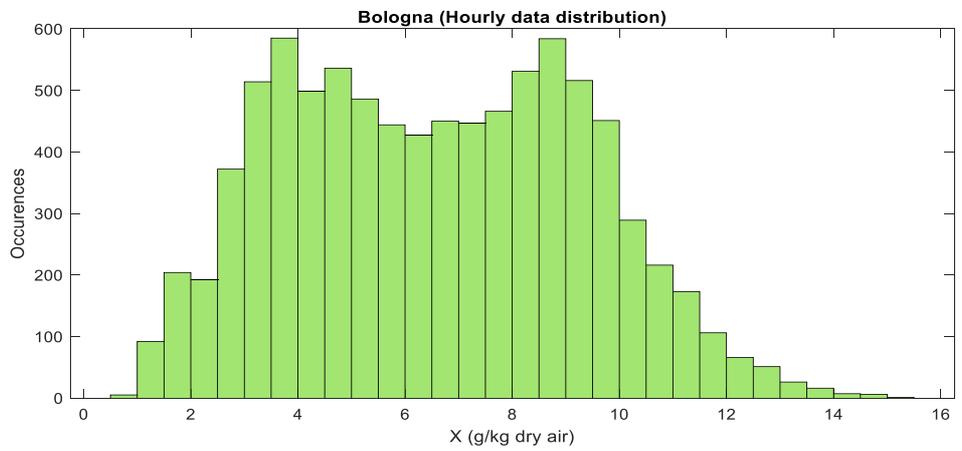
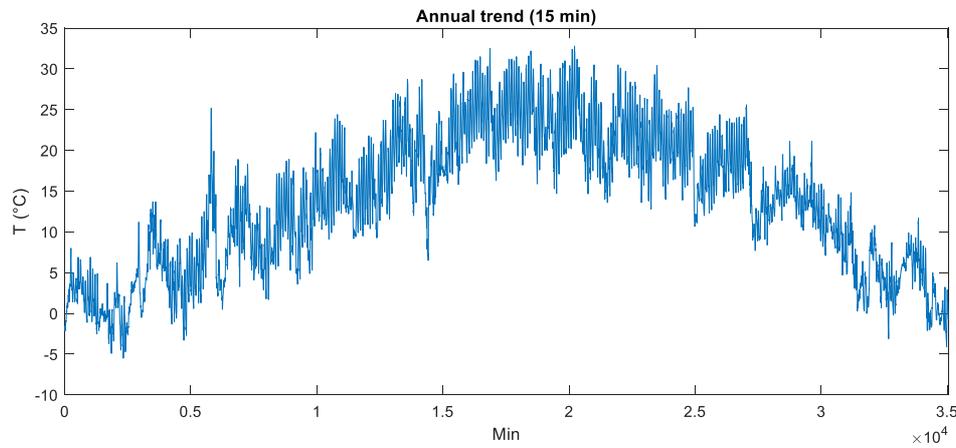
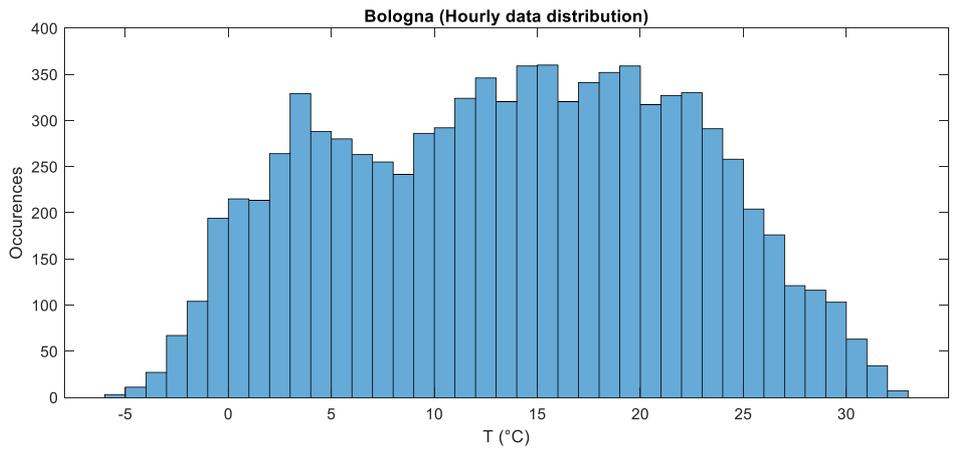
In particolare, per le temperature e le umidità specifiche vengono riportati i grafici delle distribuzioni in frequenza e gli andamenti a 15 min. Per le irradianze sono mostrati invece l'andamento delle irradiazioni giornaliere, la tabella dei valori giornalieri medi mensili e i grafici per la GHI e la DNI e mese per mese, del numero di ore/anno con valori sopra soglia. Nelle tabelle, l'acronimo EHI sta per irradiazione extraatmosferica orizzontale (si esprime in kWh / m^2) ed ENI per quella extraatmosferica normale. Va notato che la EHI sempre maggiore sia della GHI che della DfHI, e viene mostrata per confronto: la differenza fra EHI e GHI misura quanto è perso dalla radiazione solare in termini energetici a causa dell'attraversamento dell'atmosfera. Ciò non è vero per la DNI che, riferendosi a una giacitura diversa da quella orizzontale, nei primi mesi dell'anno può ben superare il dato extraatmosferico della EHI.

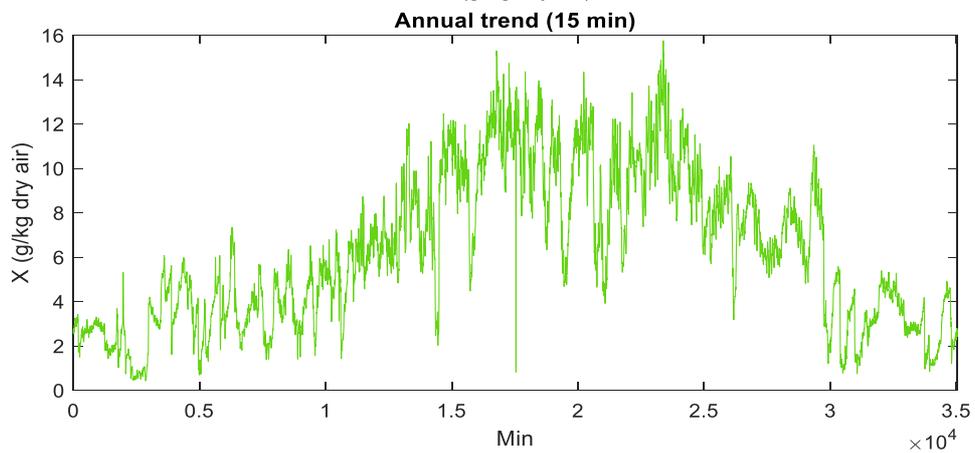
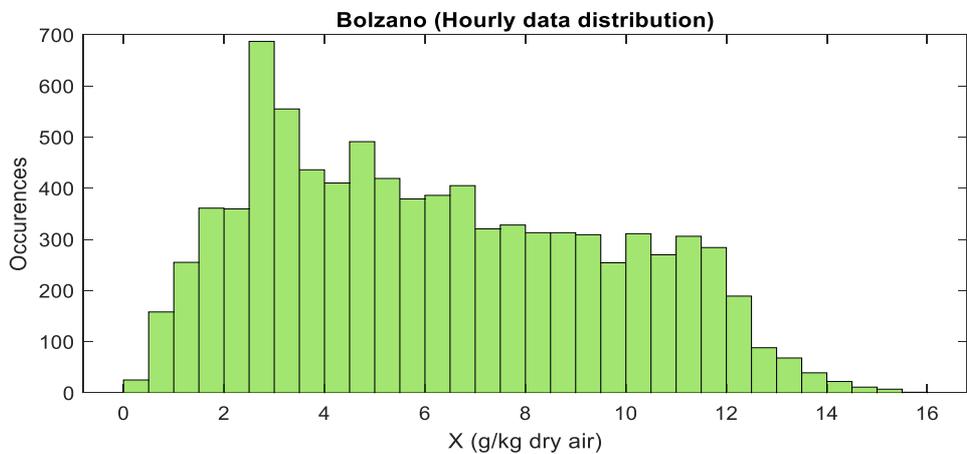
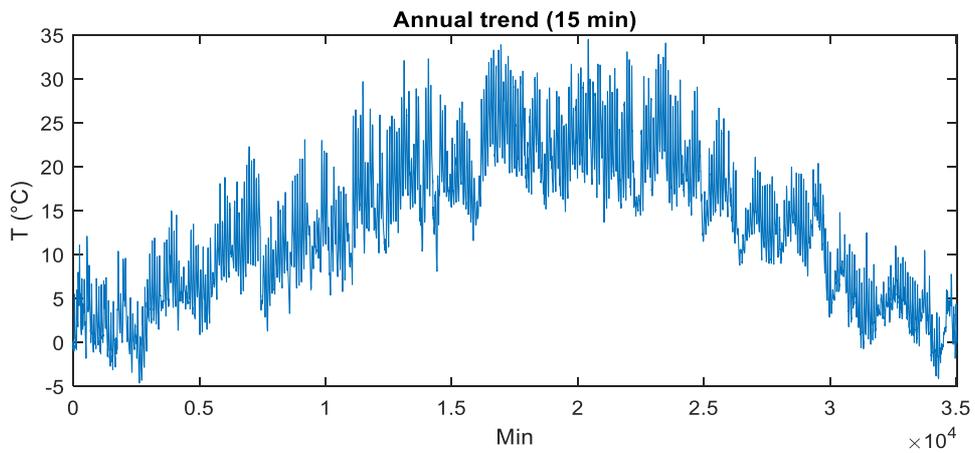
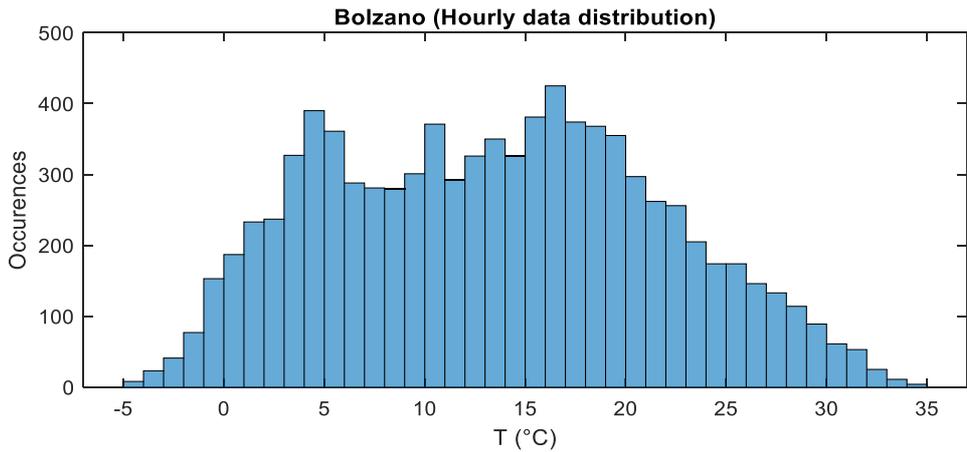
6.2.1 Temperature e umidità

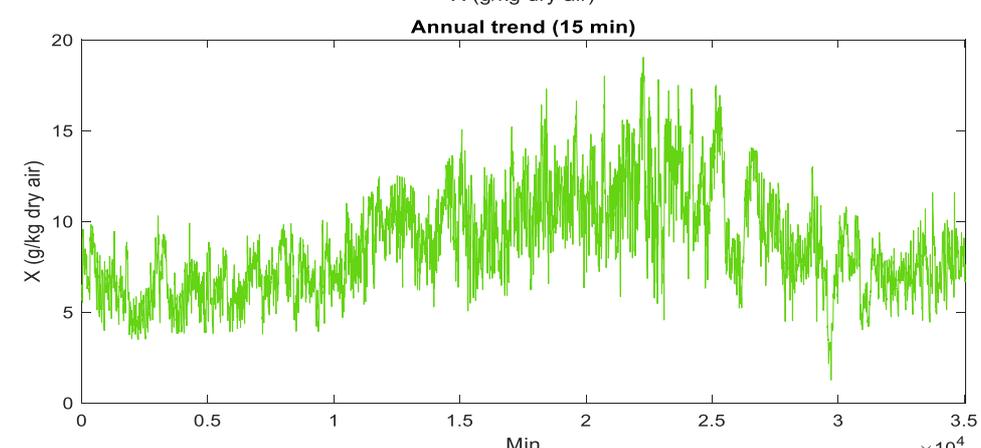
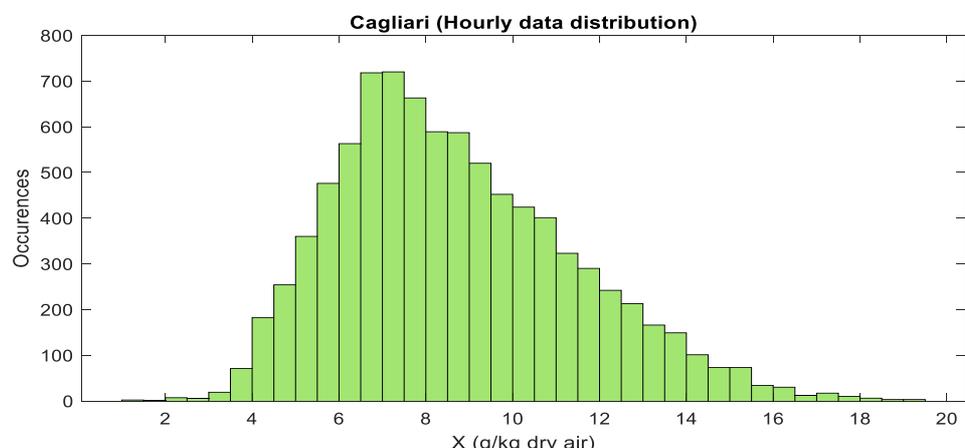
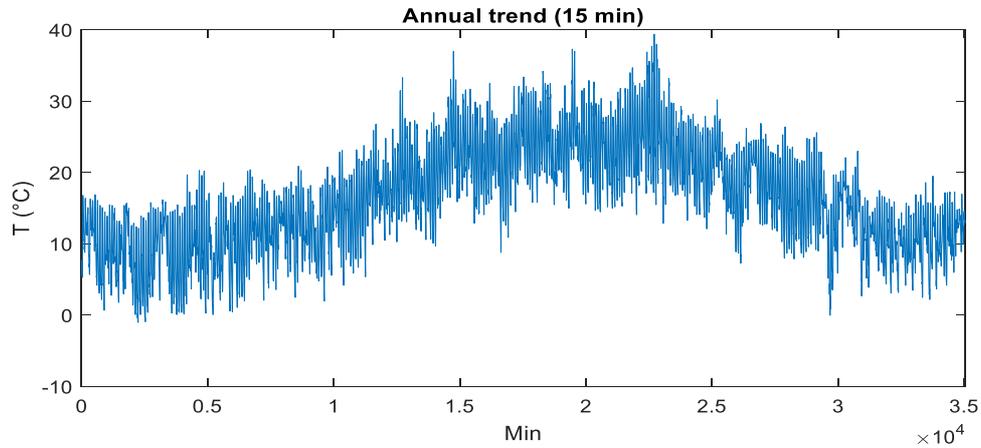
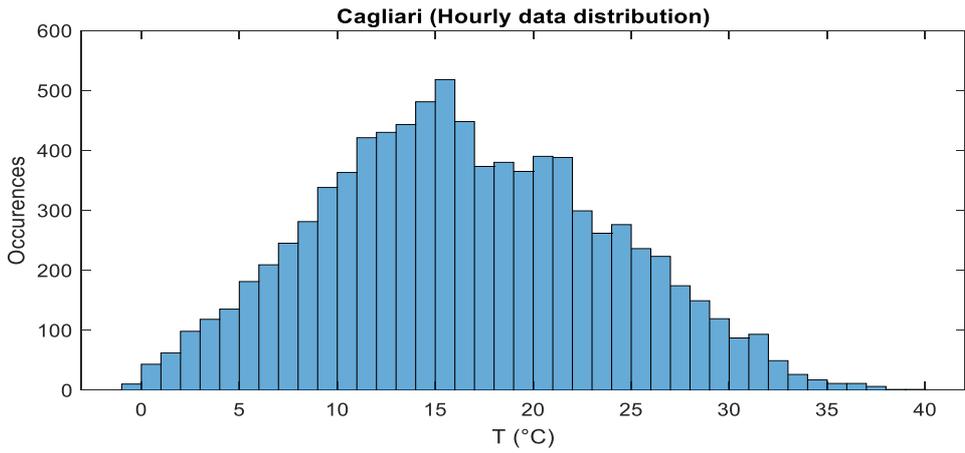


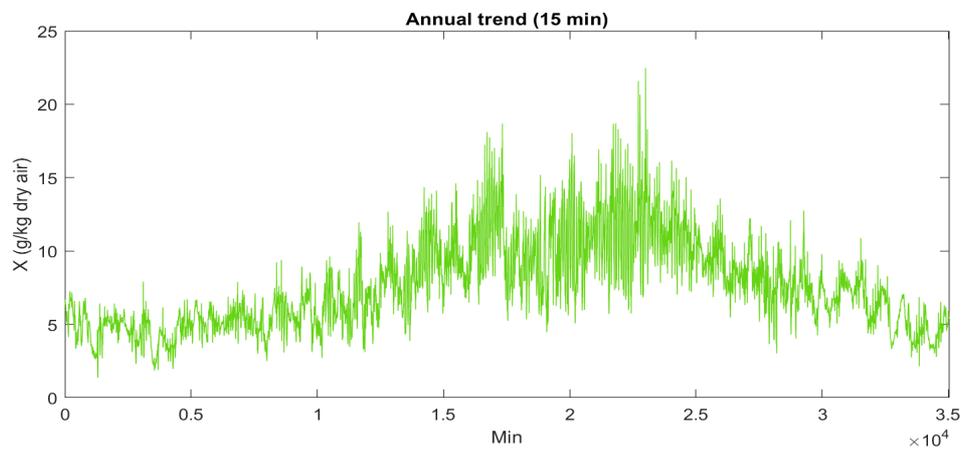
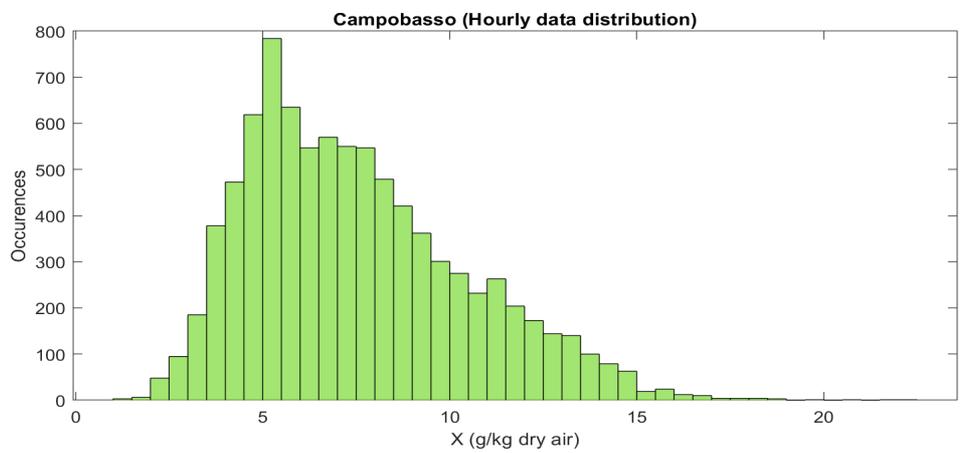
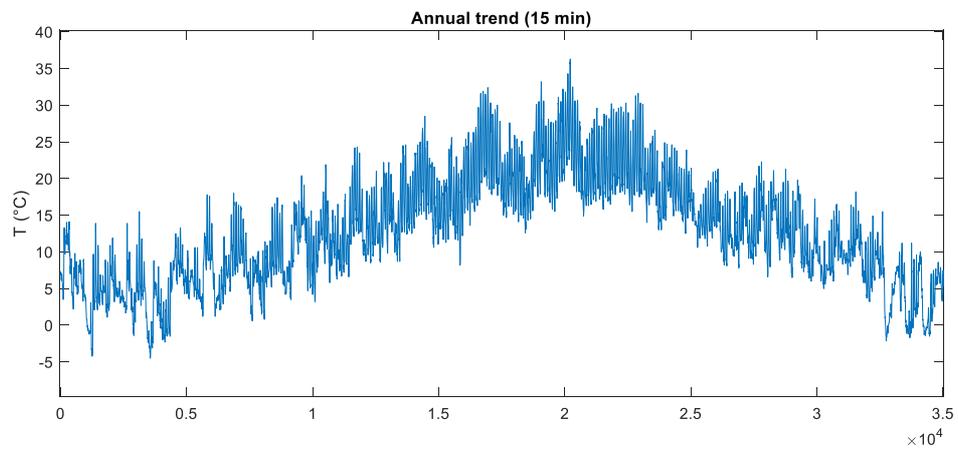
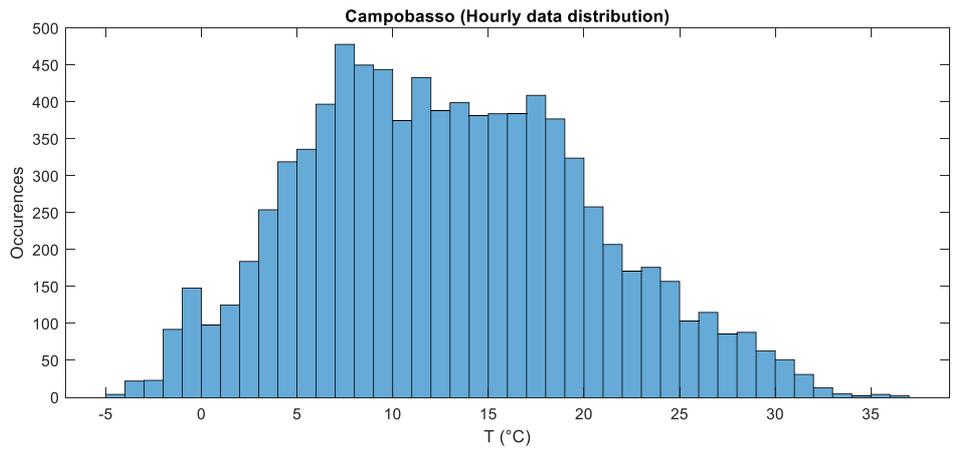


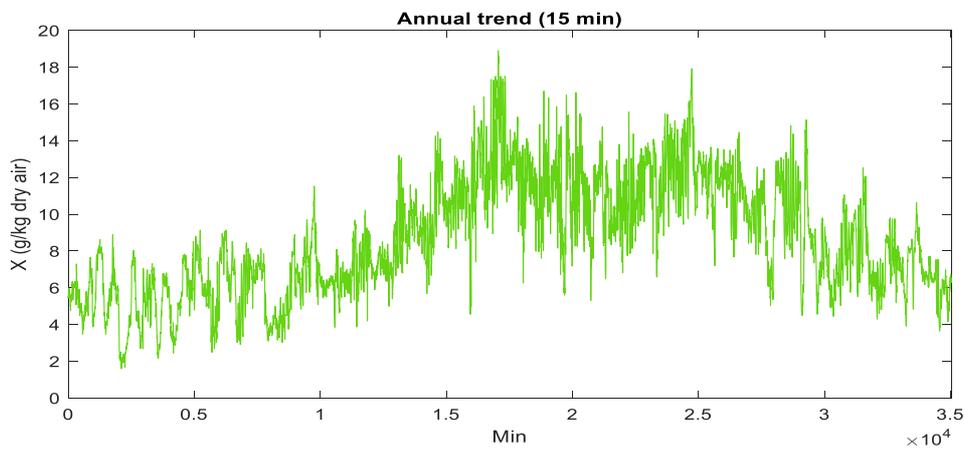
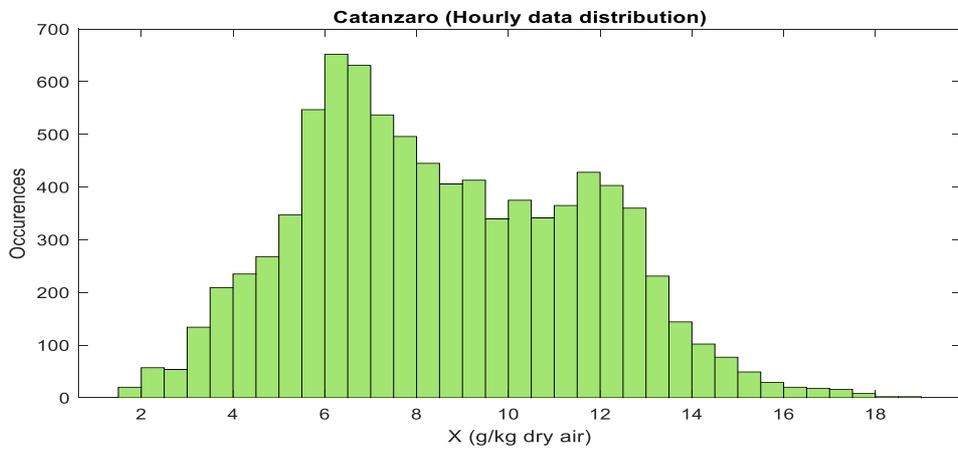
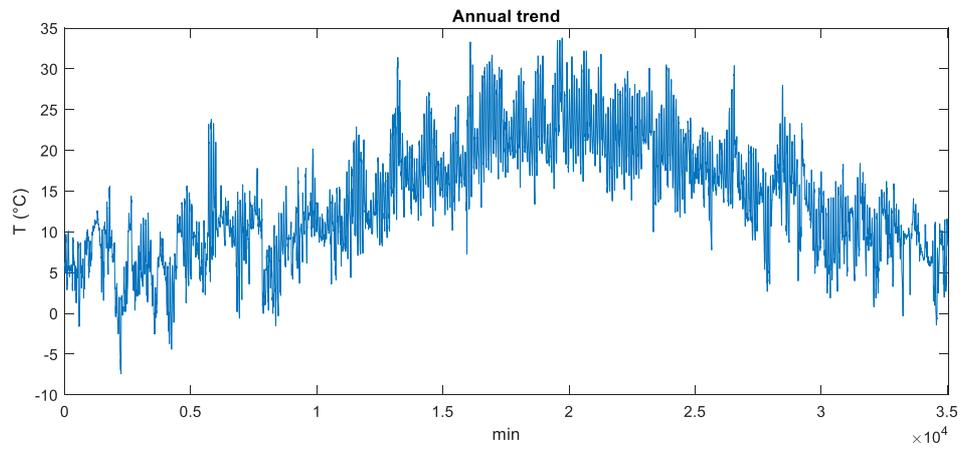
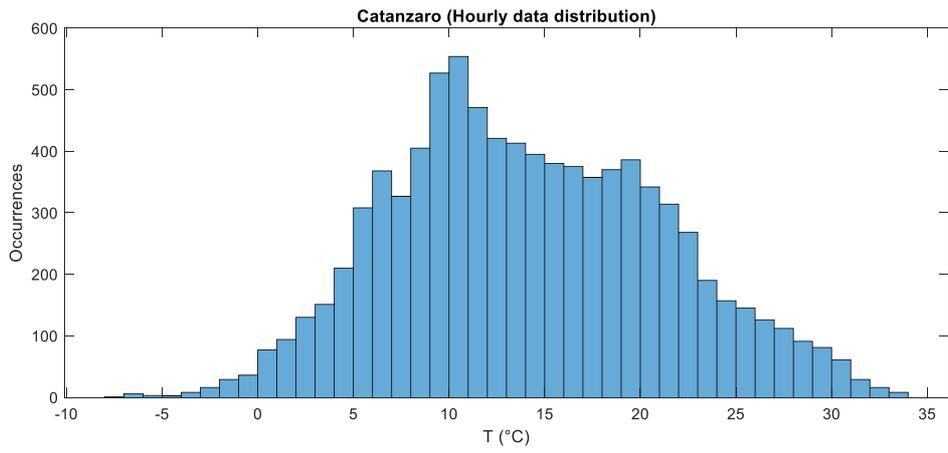


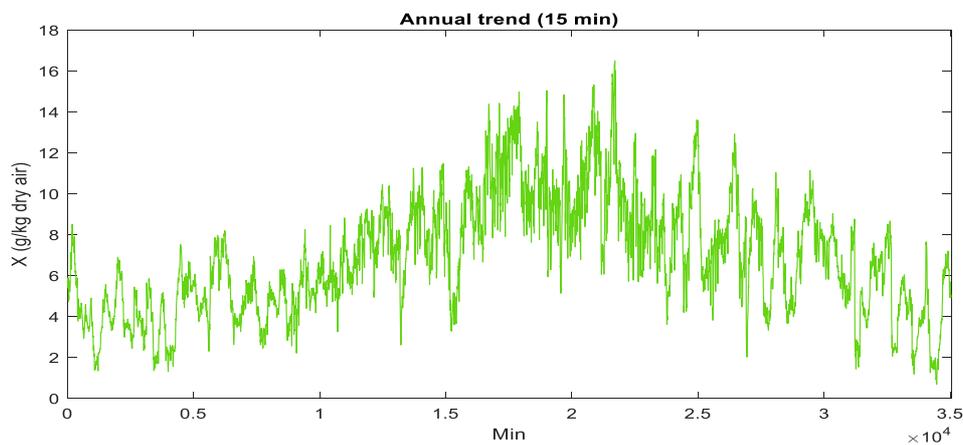
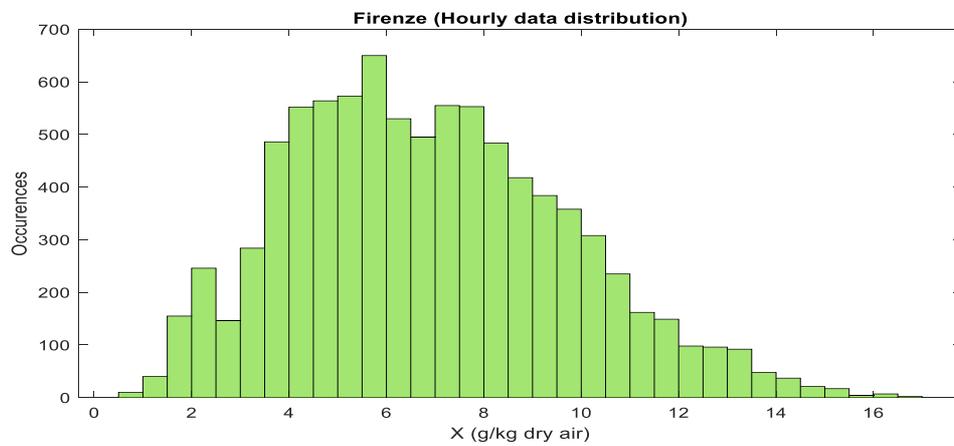
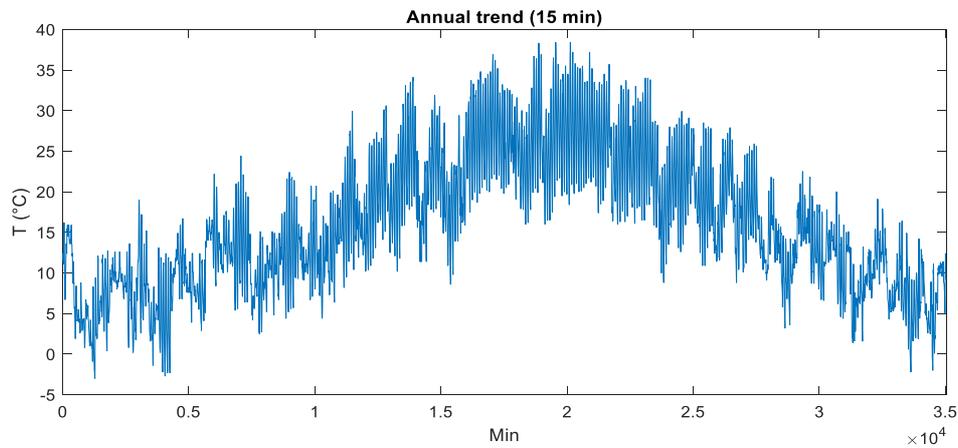
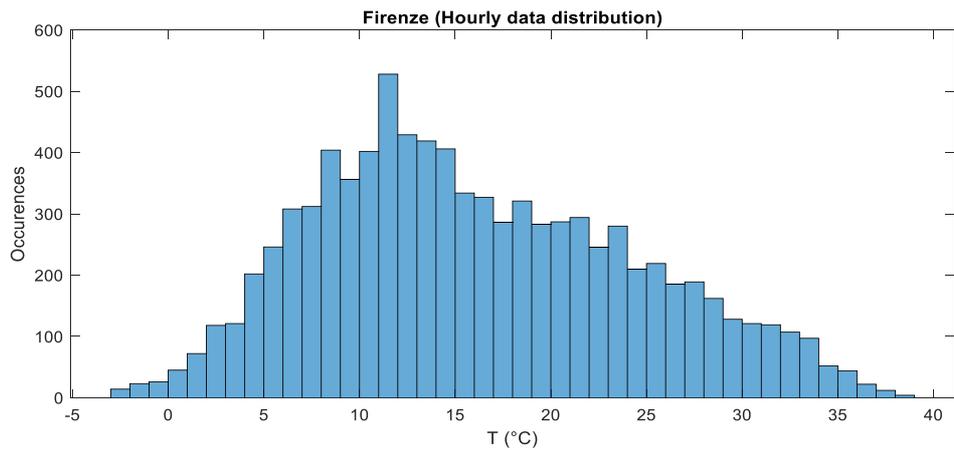


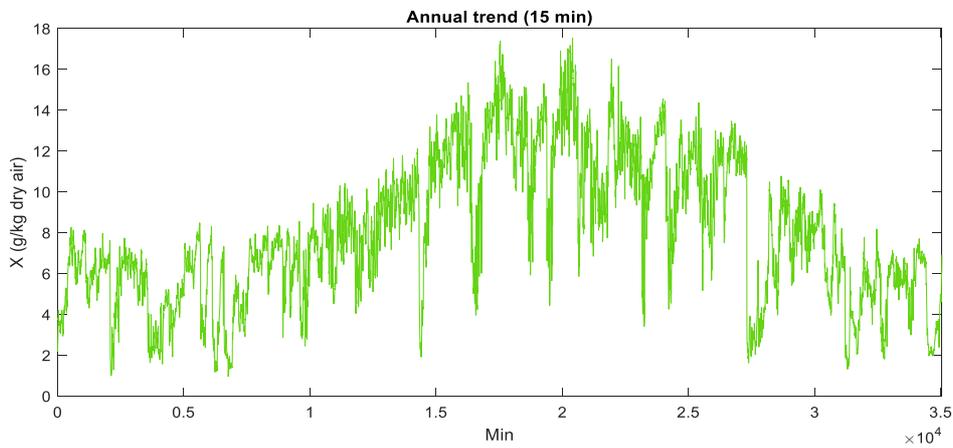
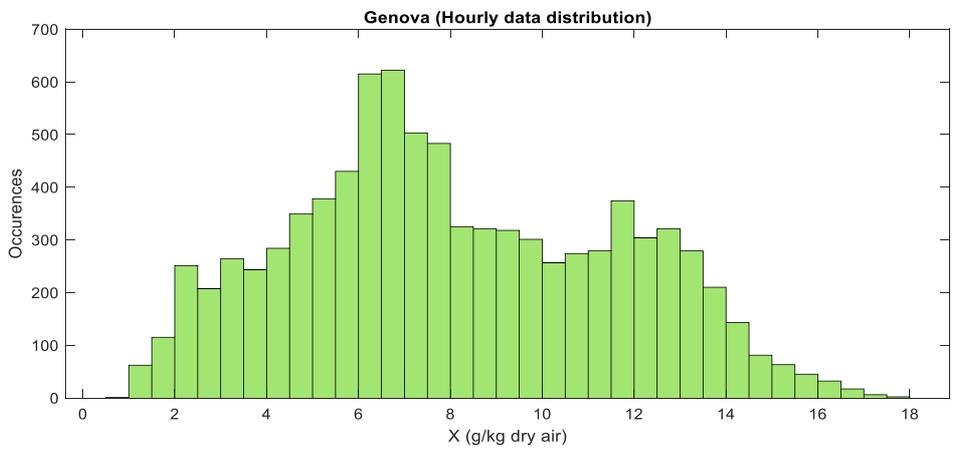
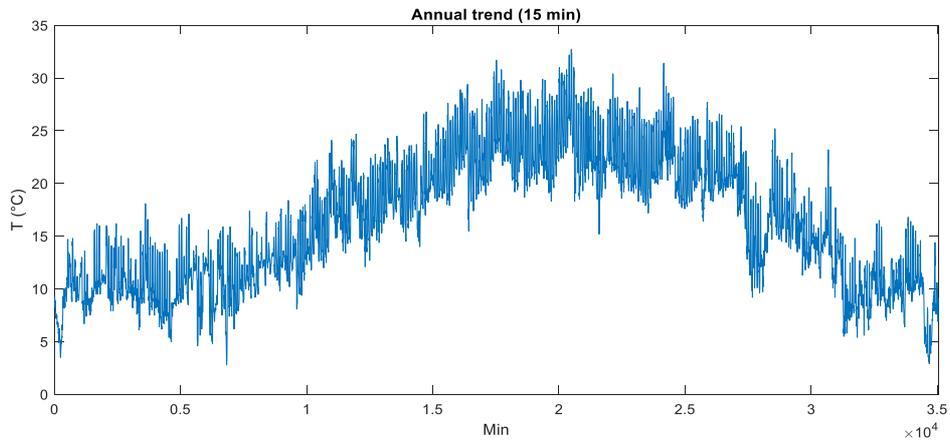
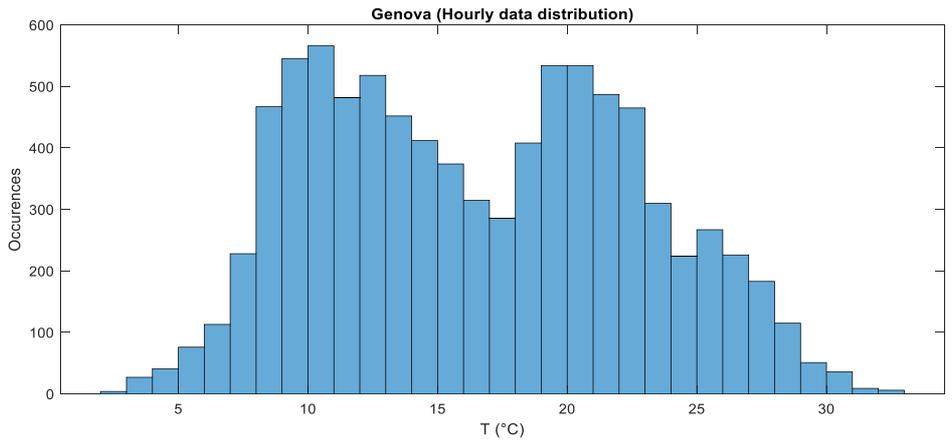


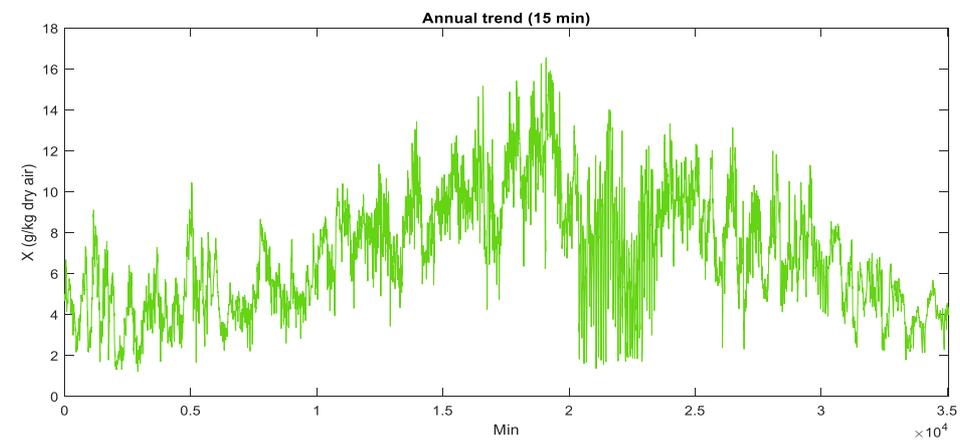
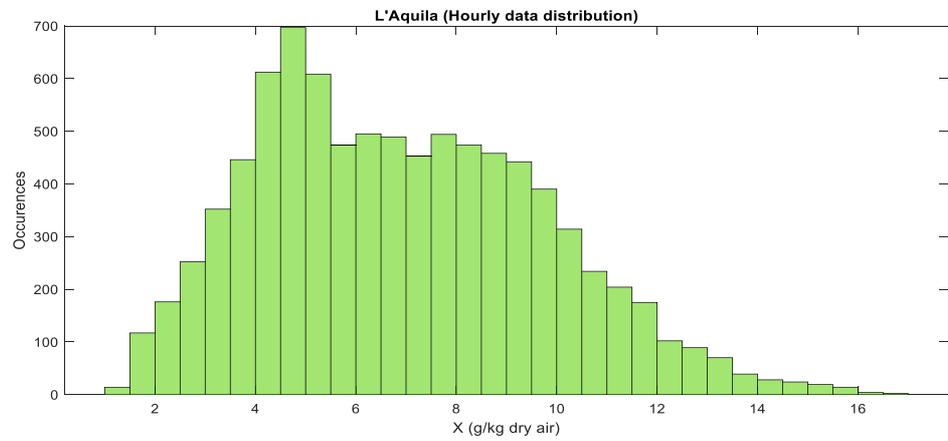
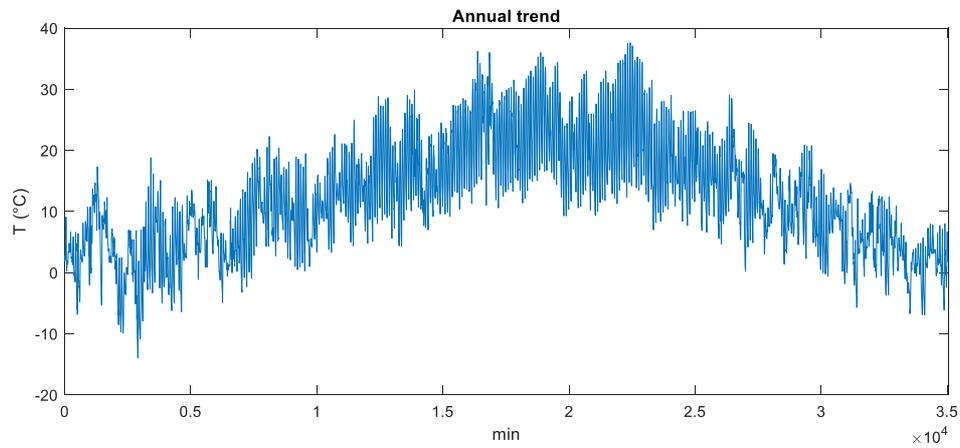
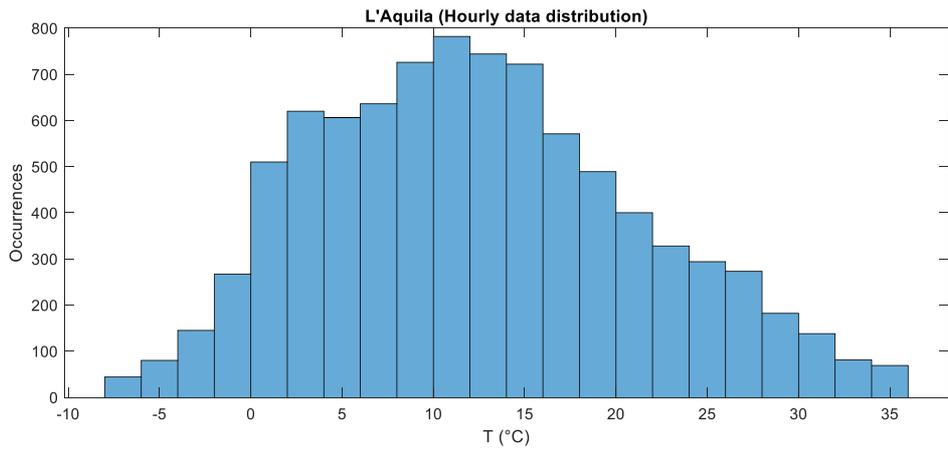


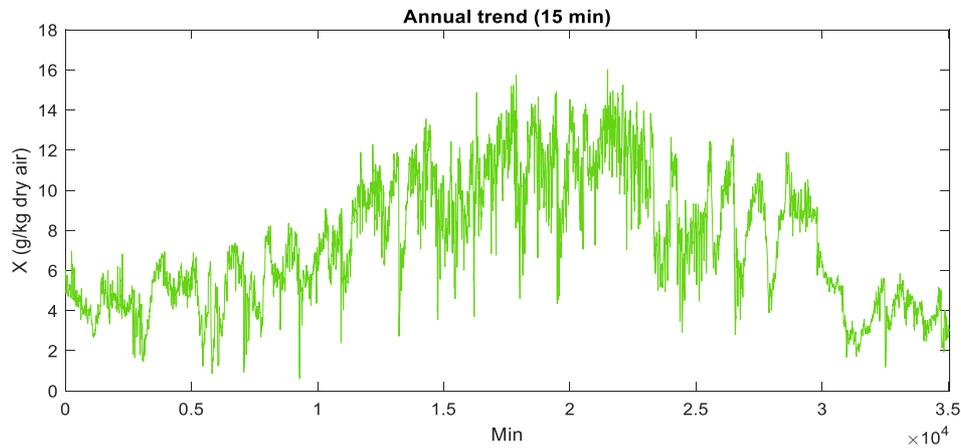
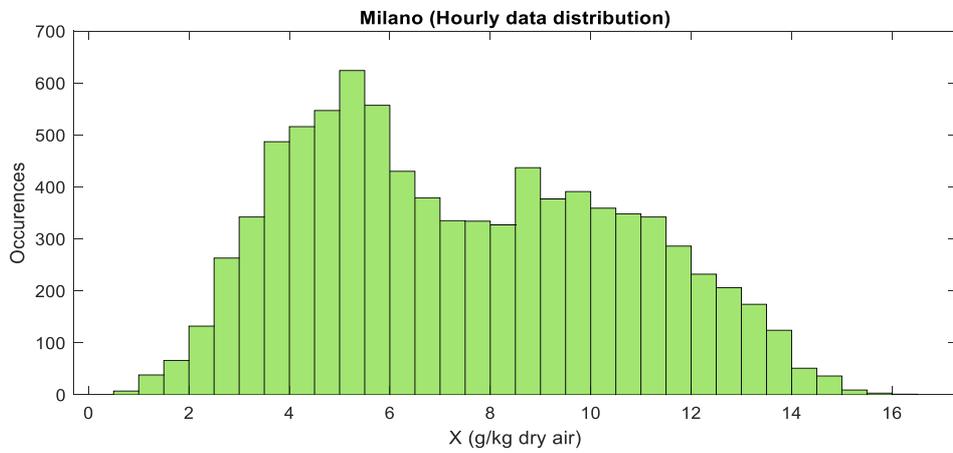
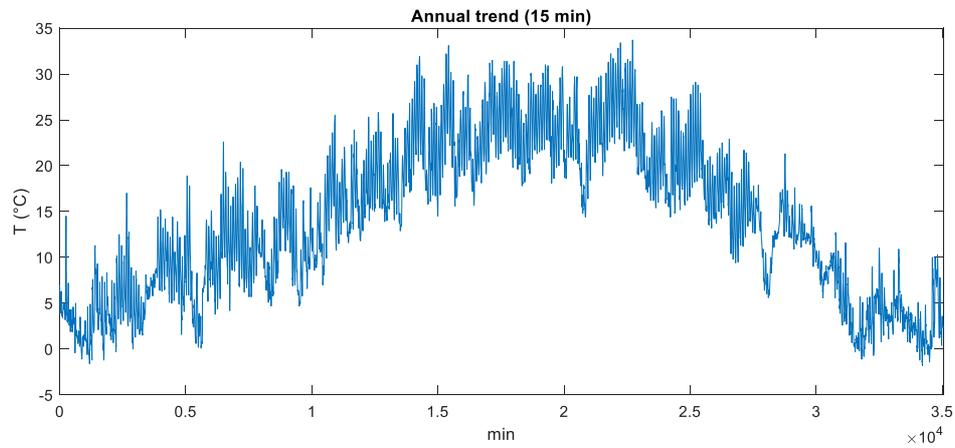
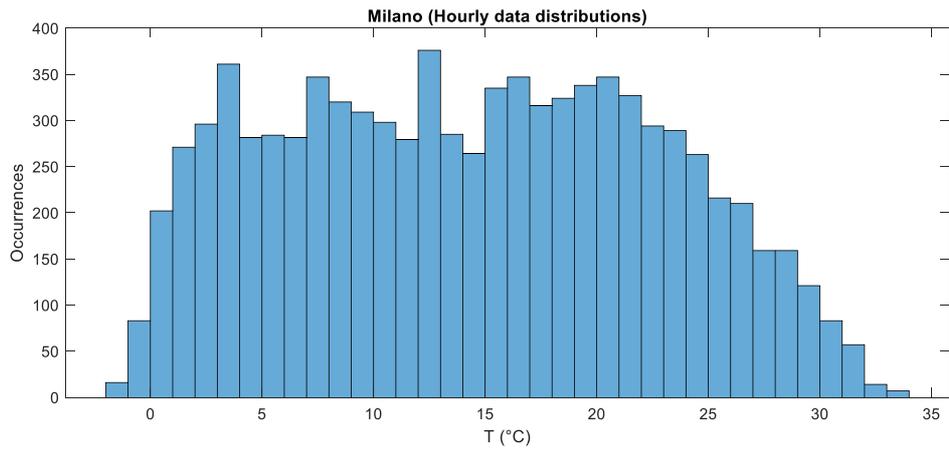


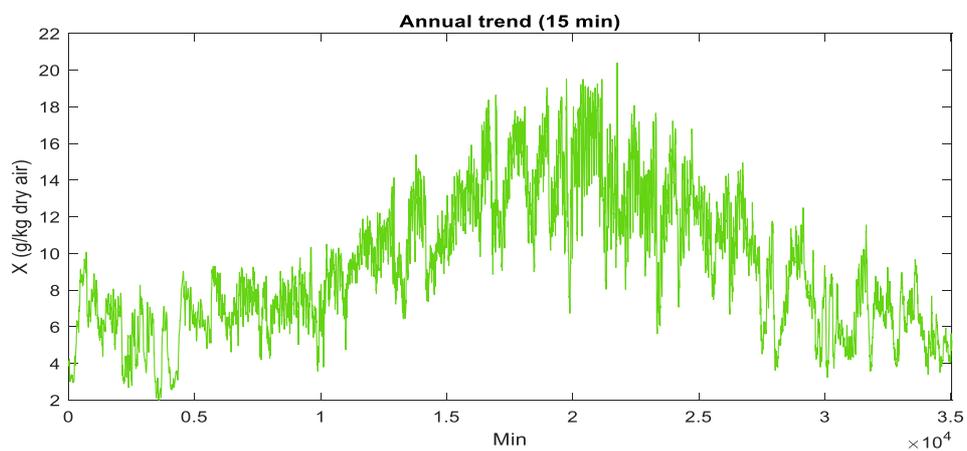
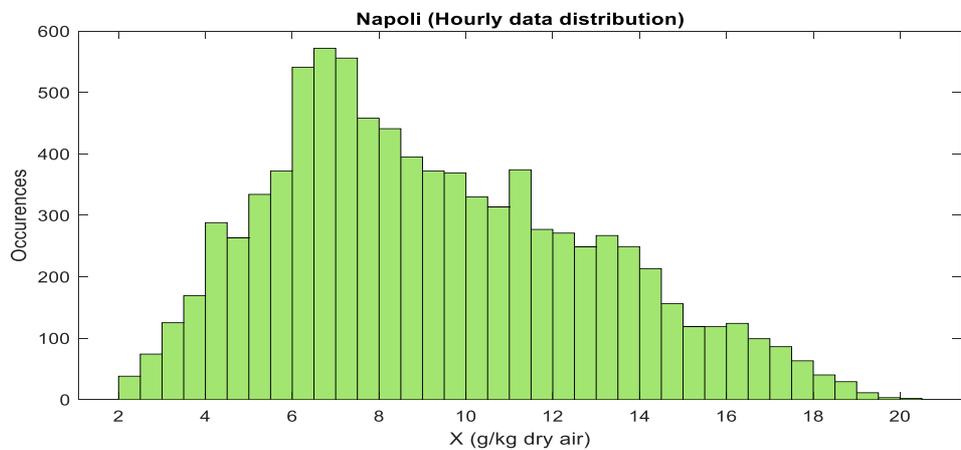
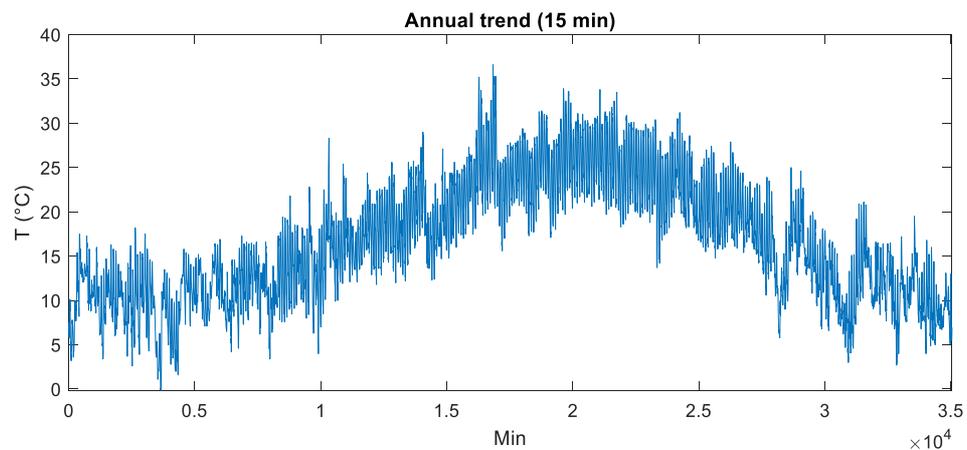
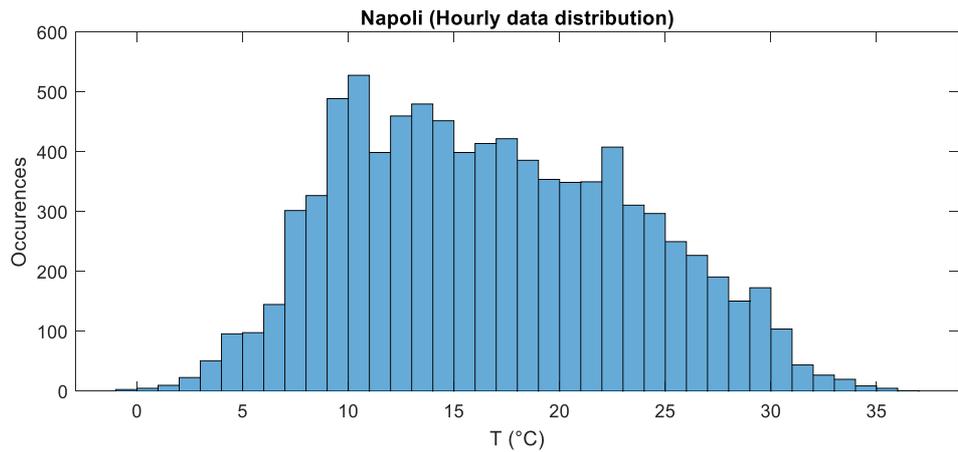


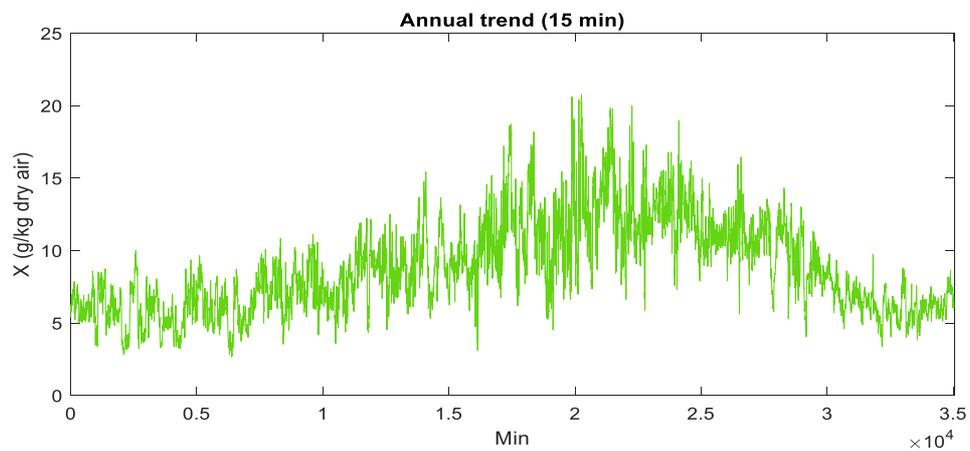
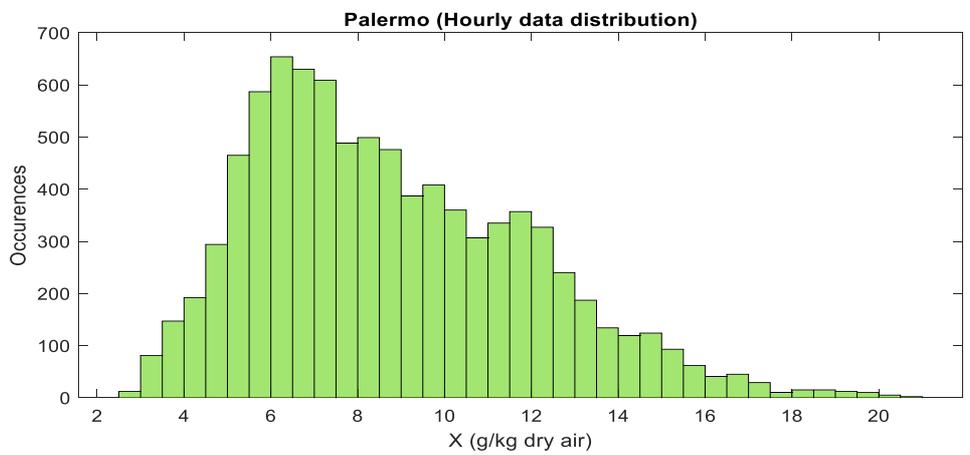
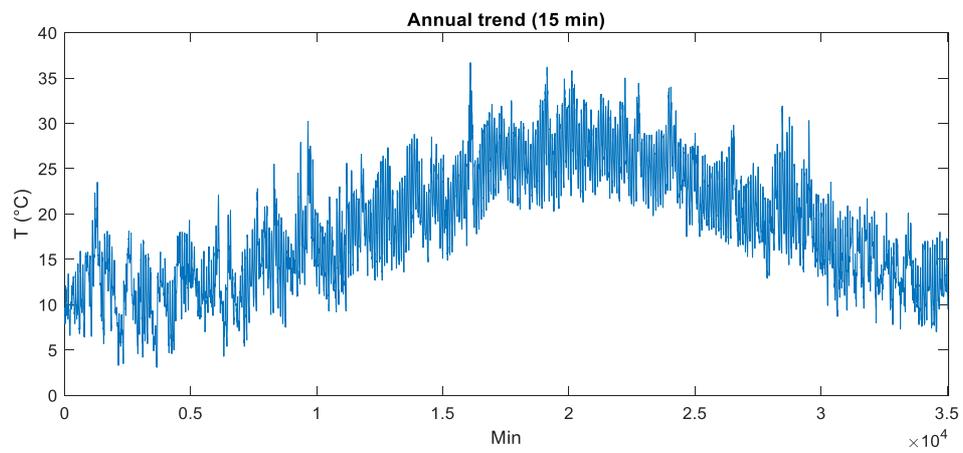
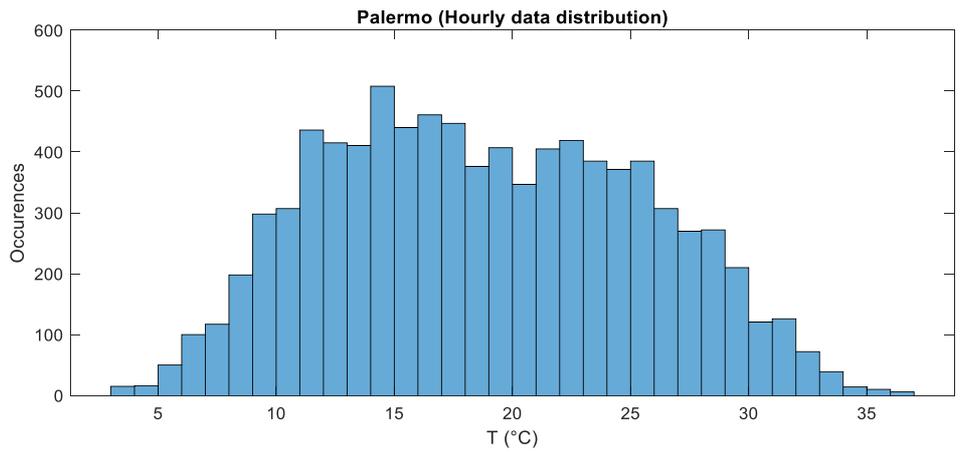


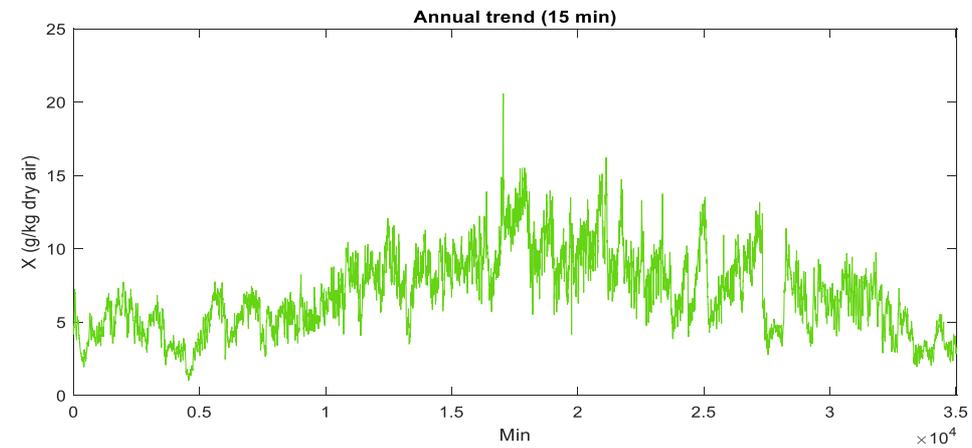
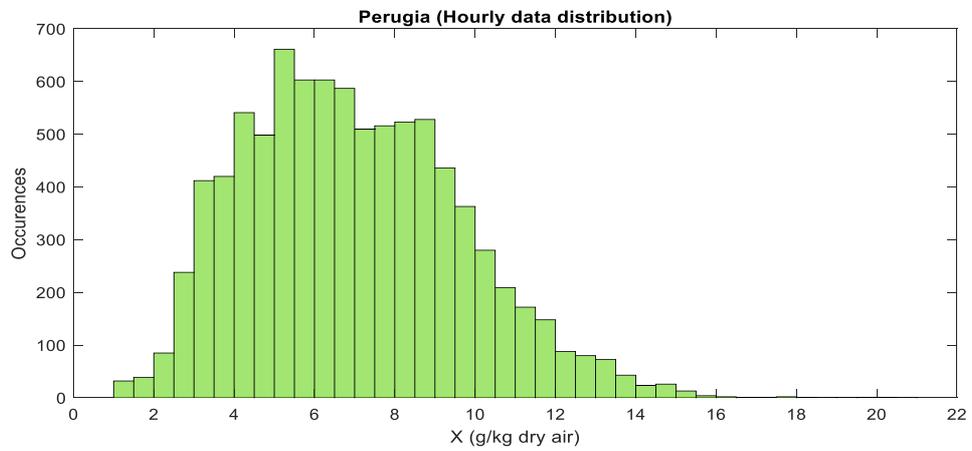
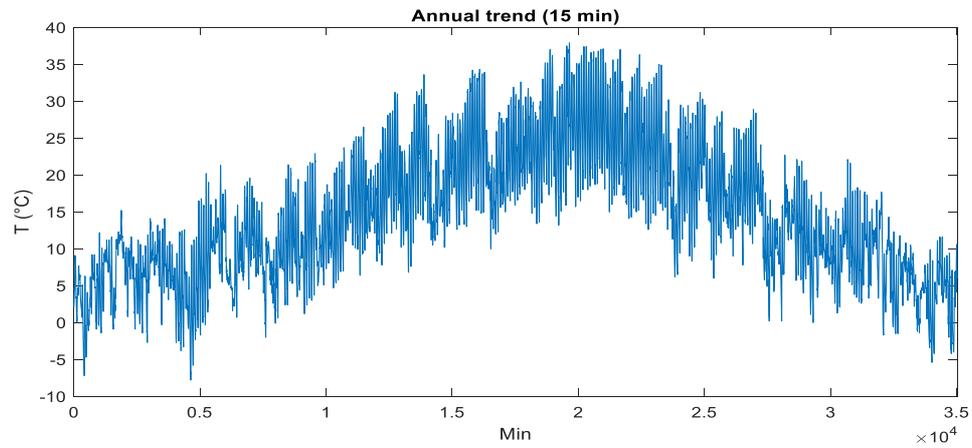
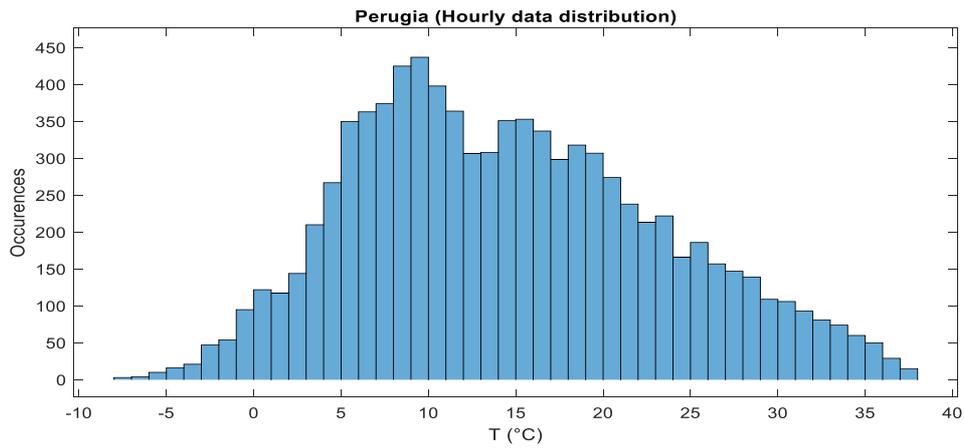


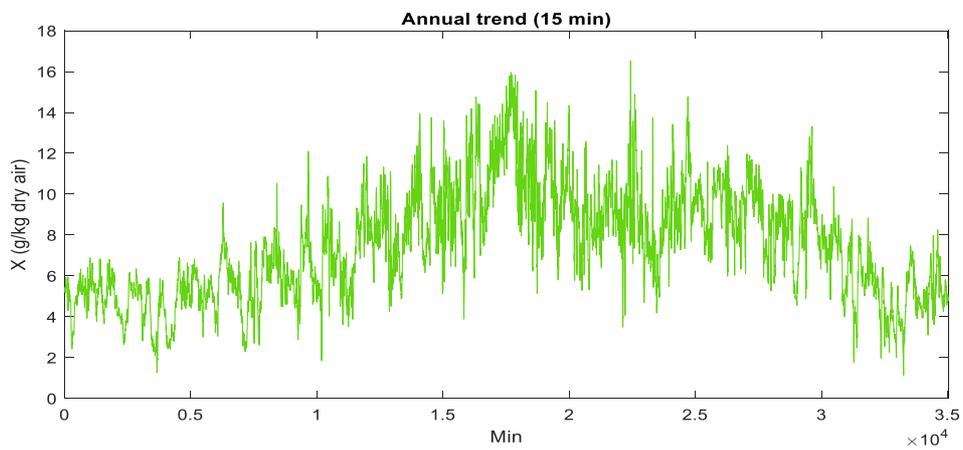
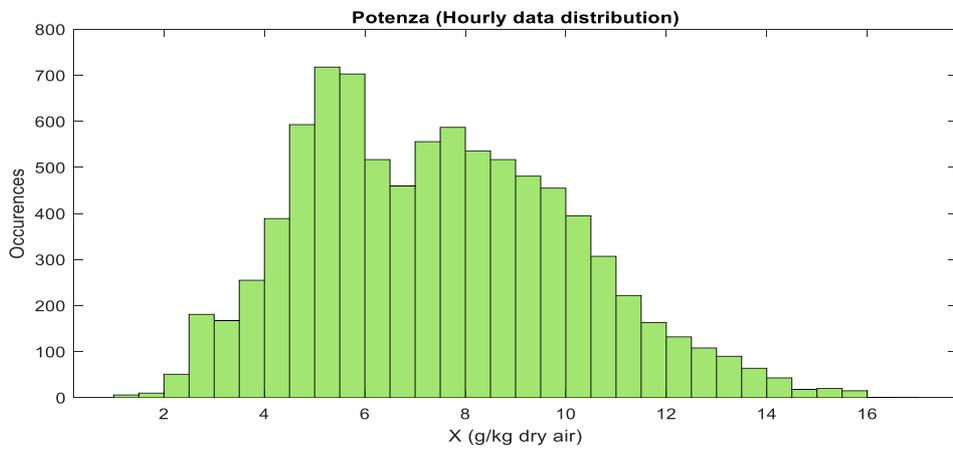
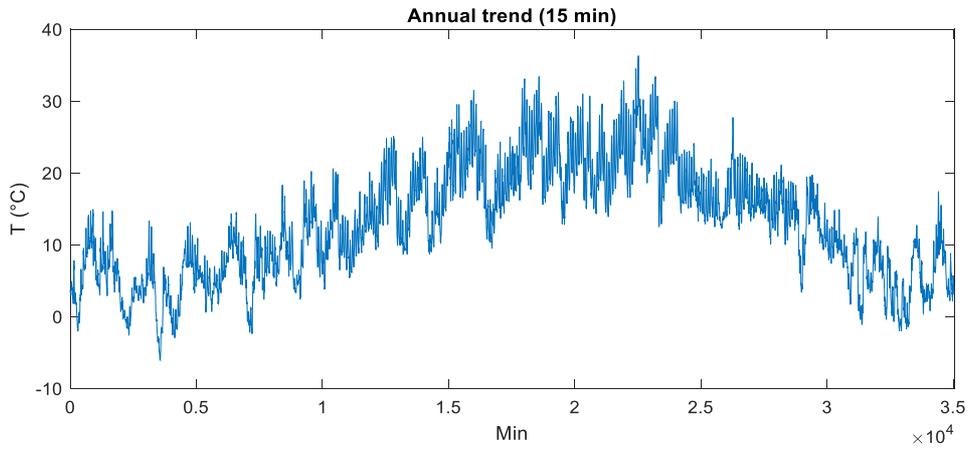
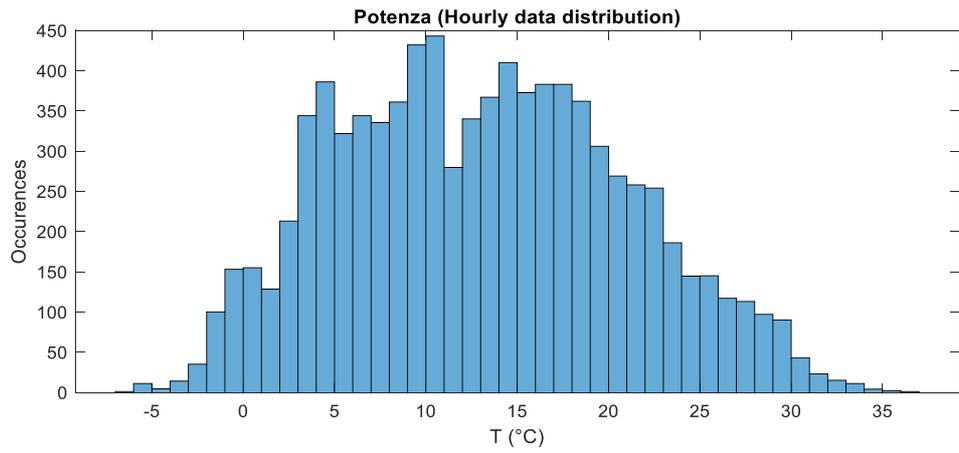


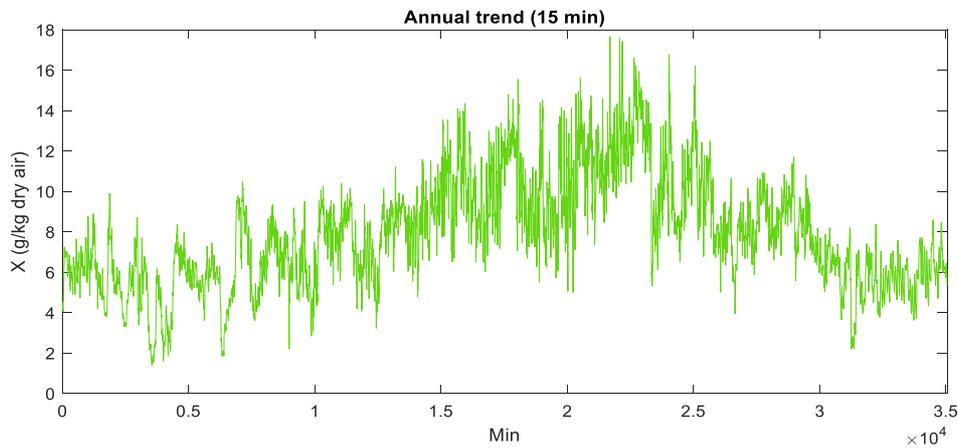
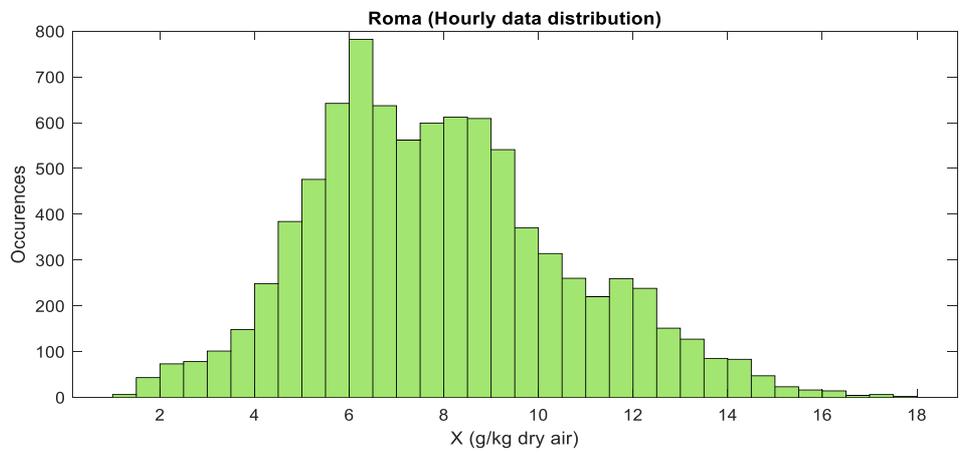
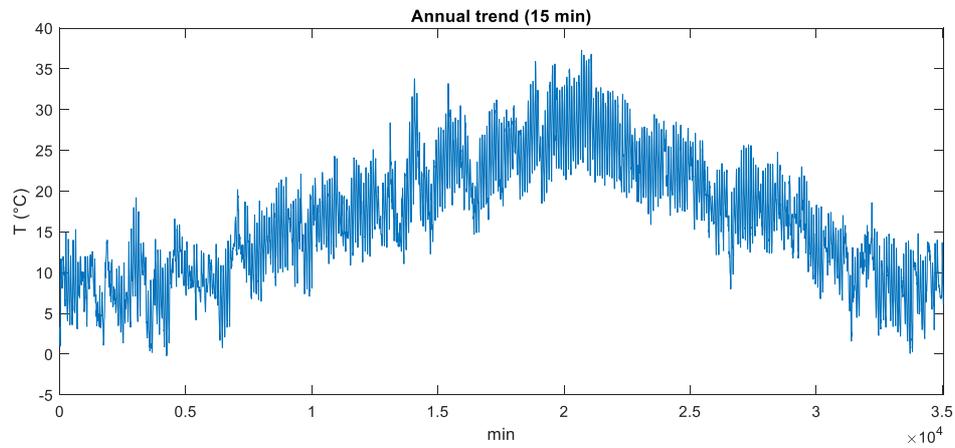
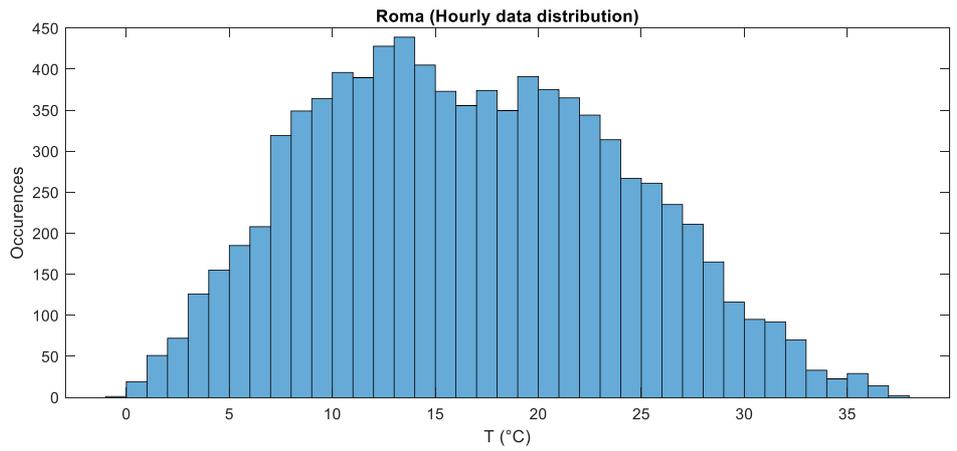


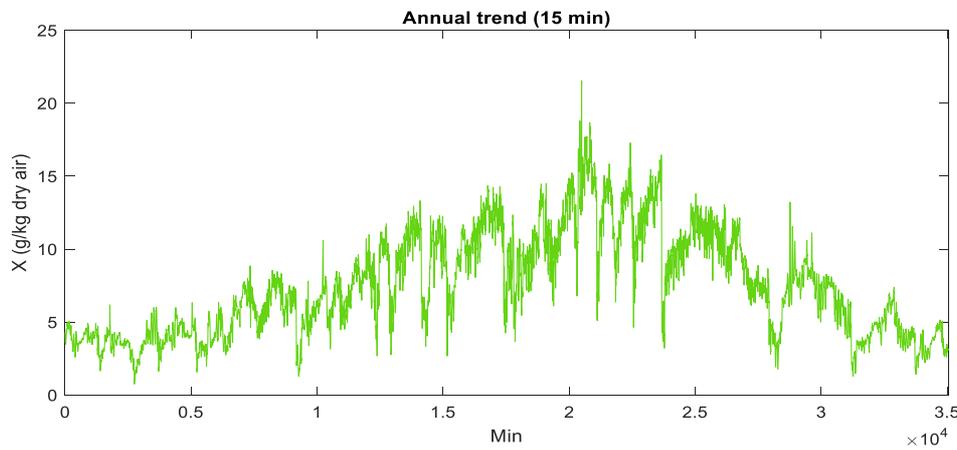
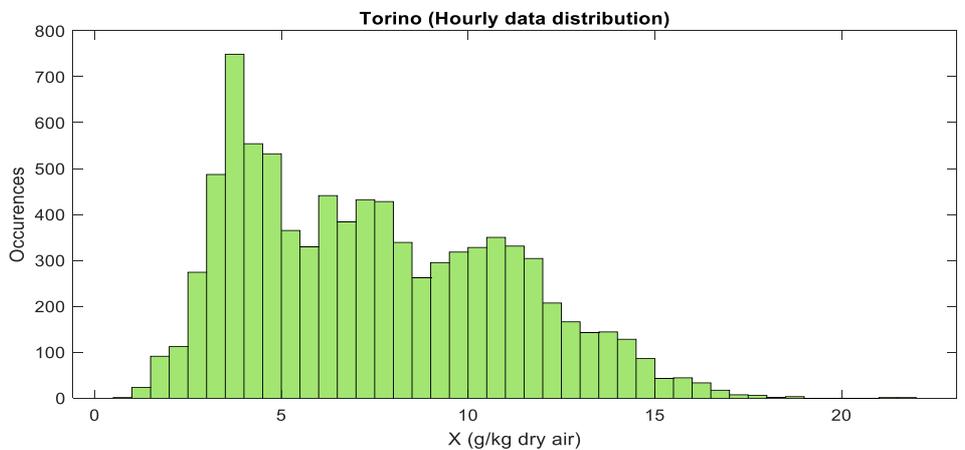
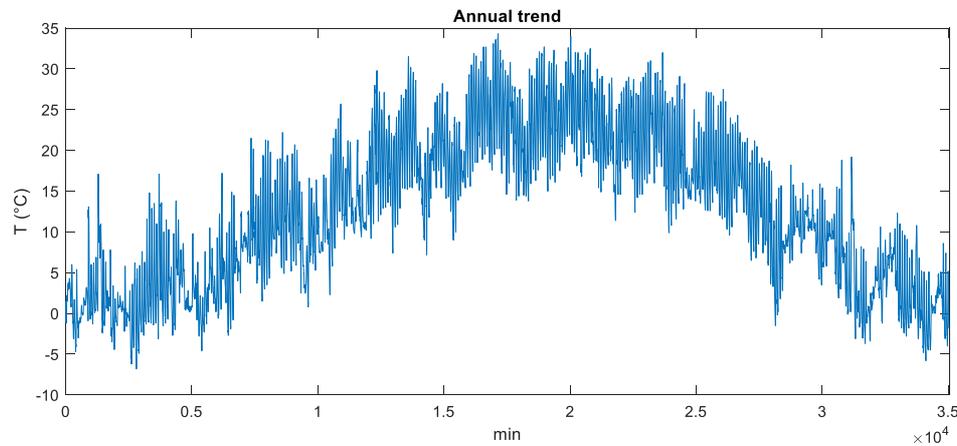
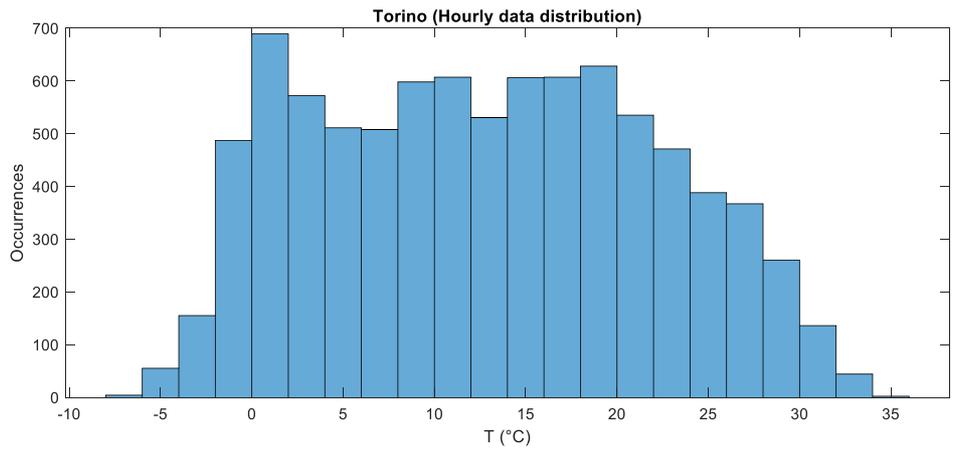


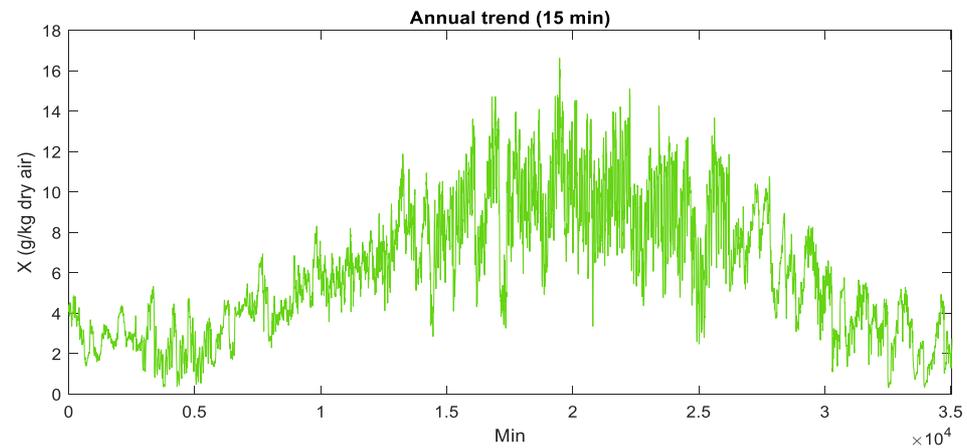
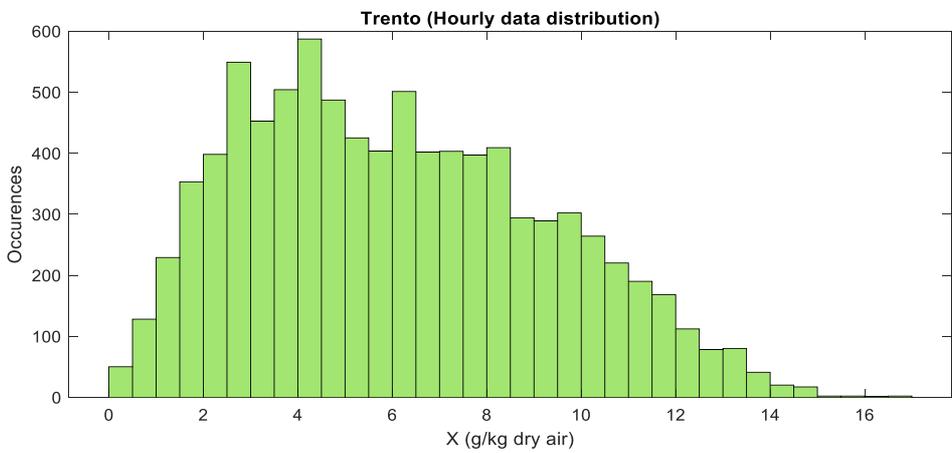
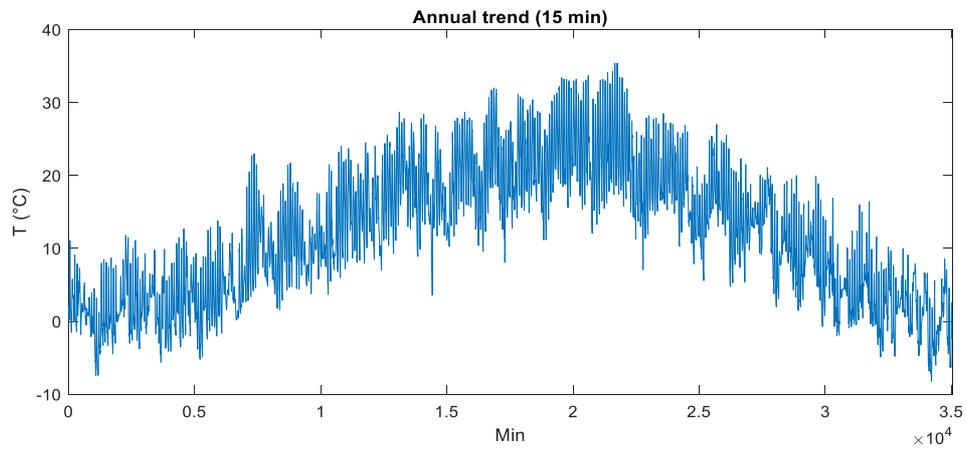
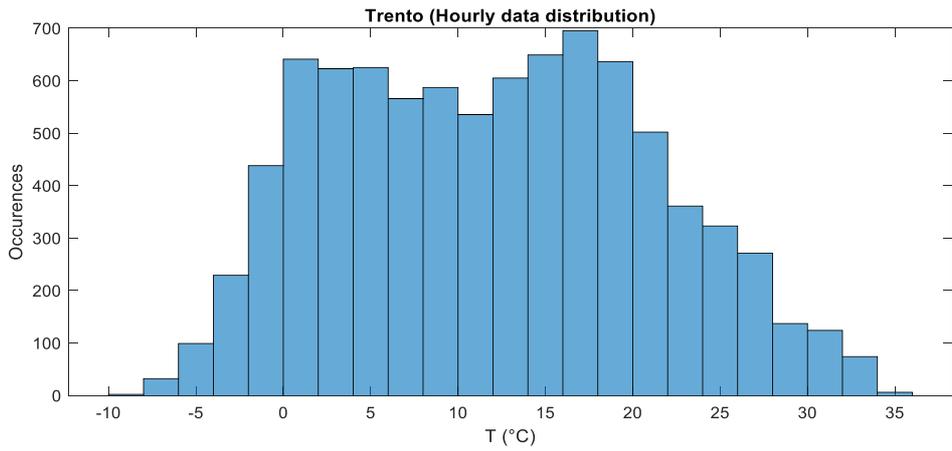


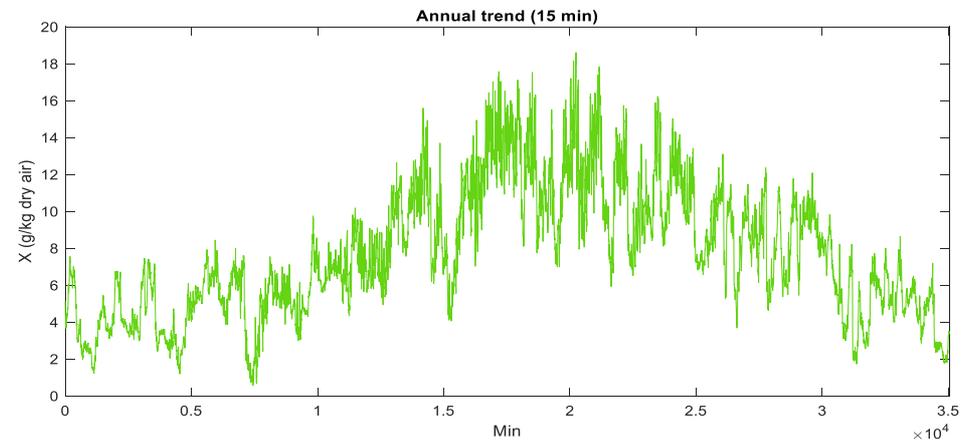
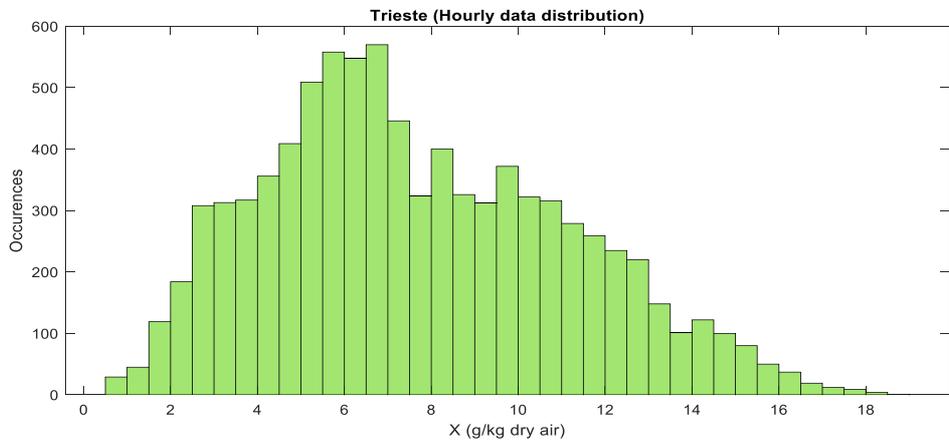
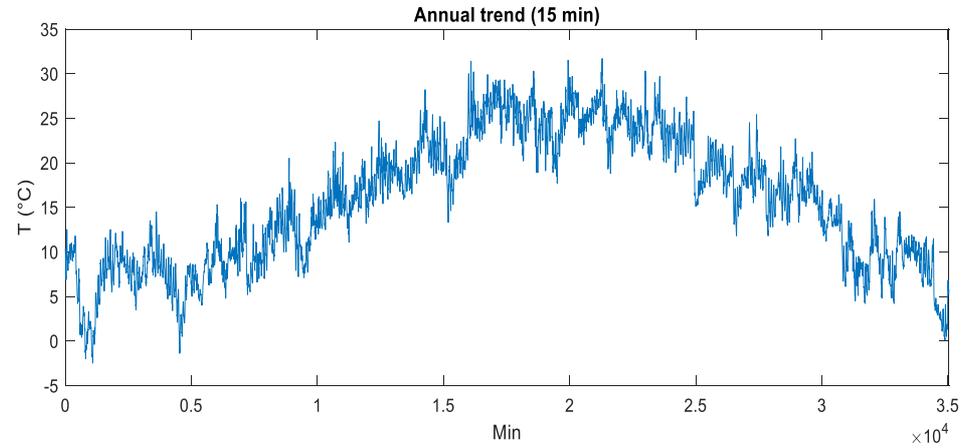
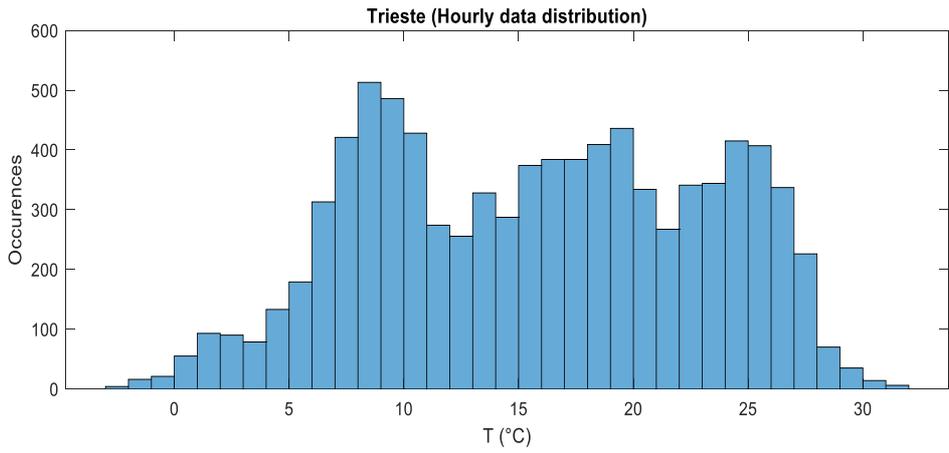


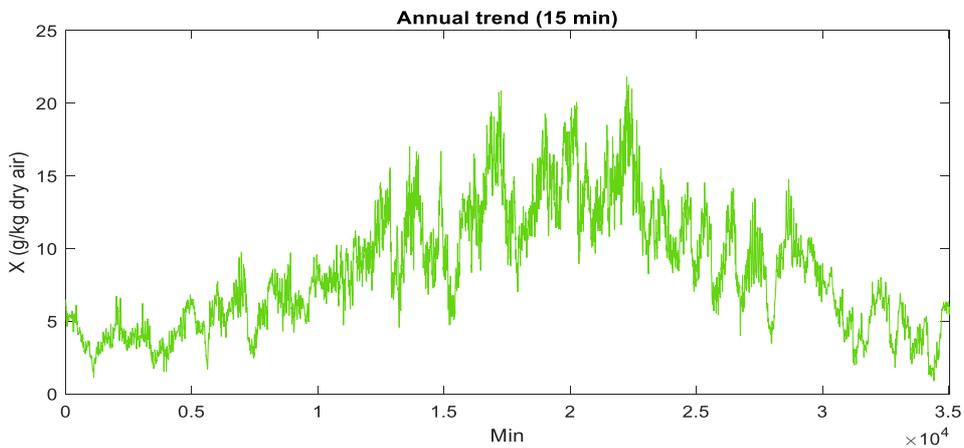
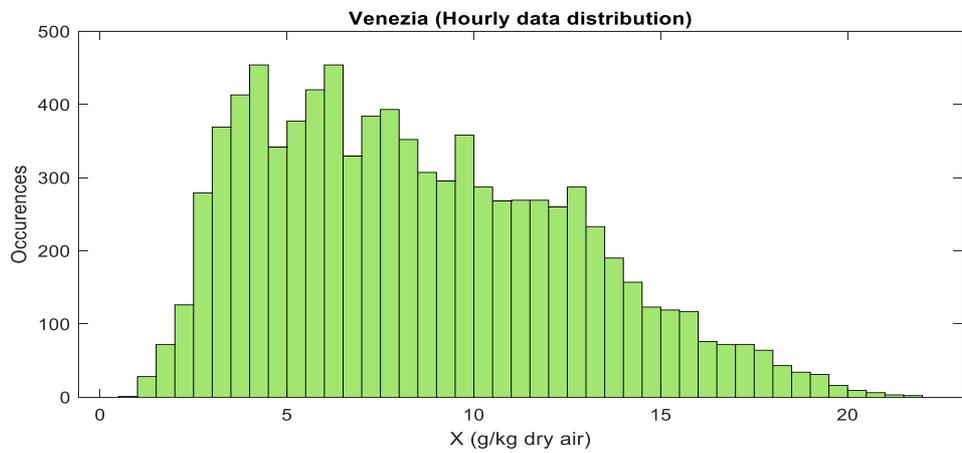
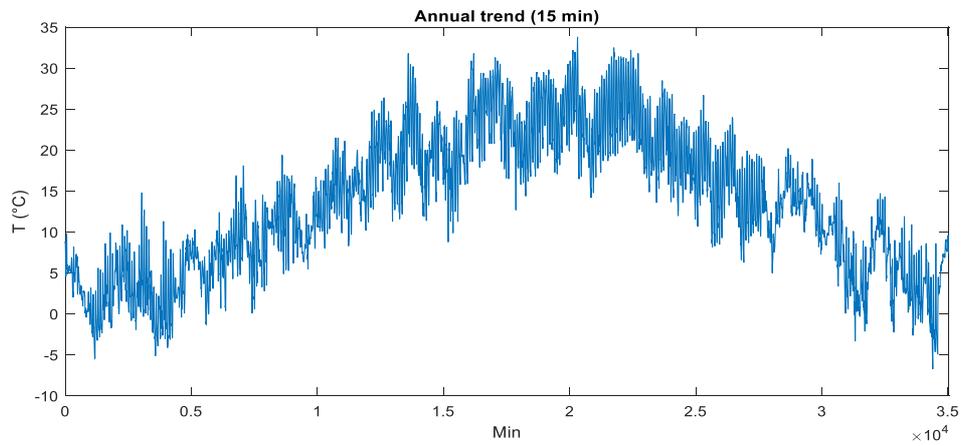
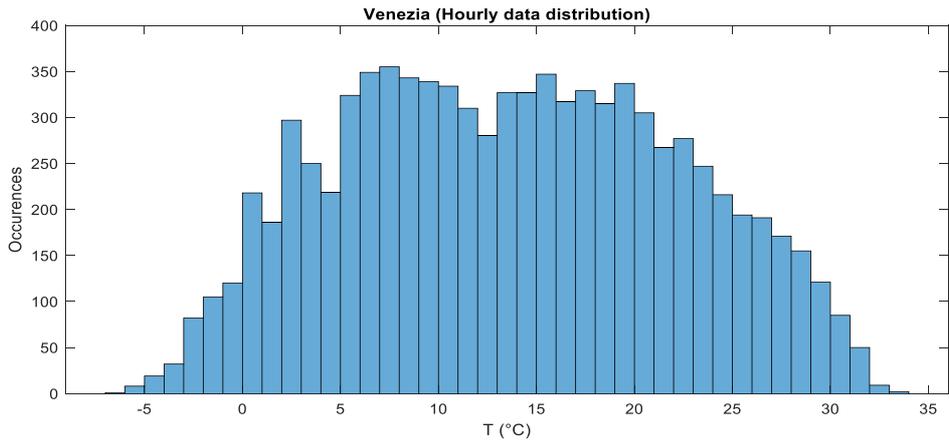




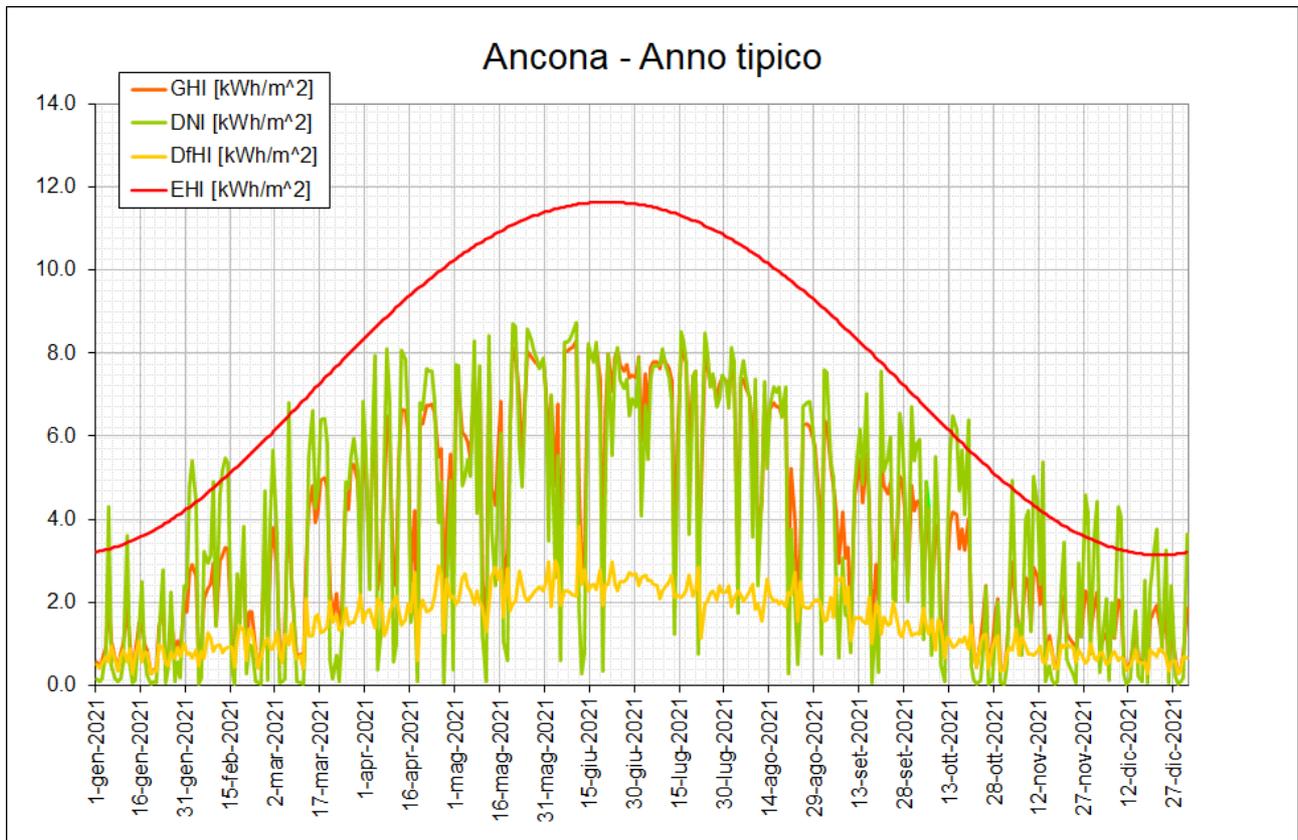






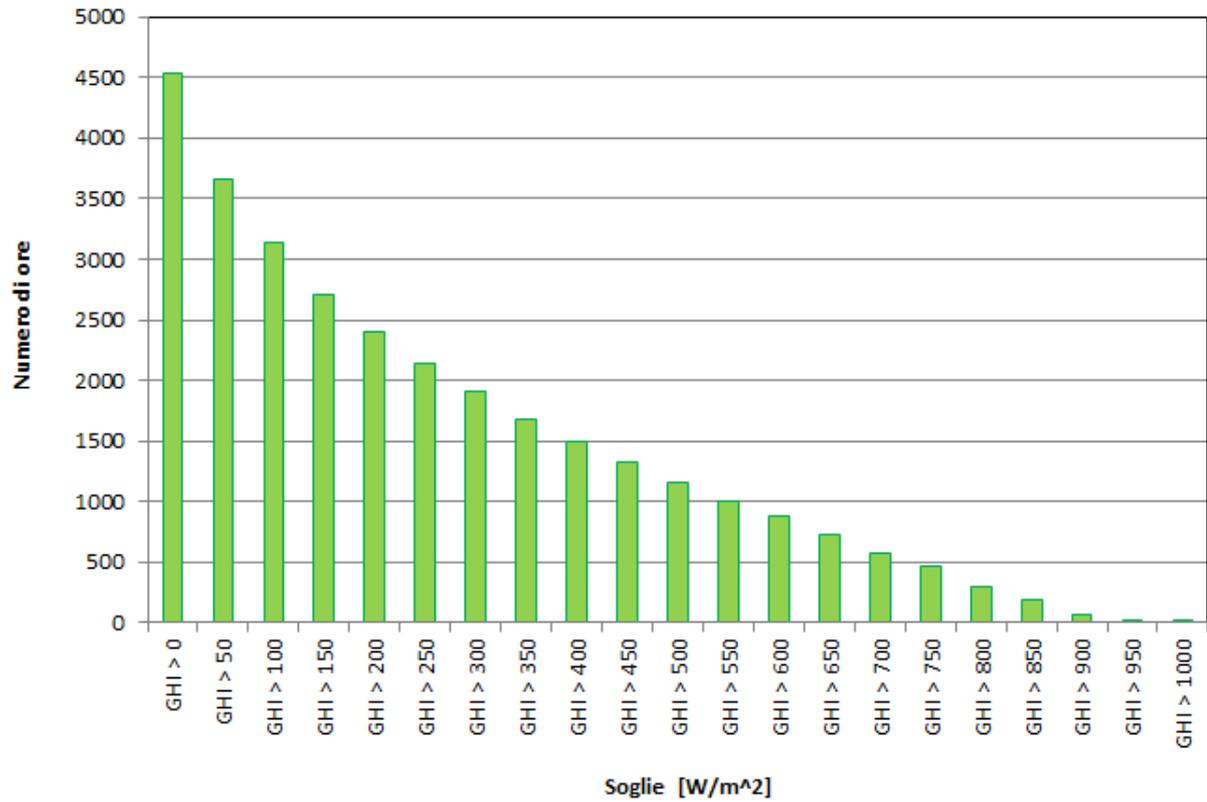


6.2.2 Irradianze

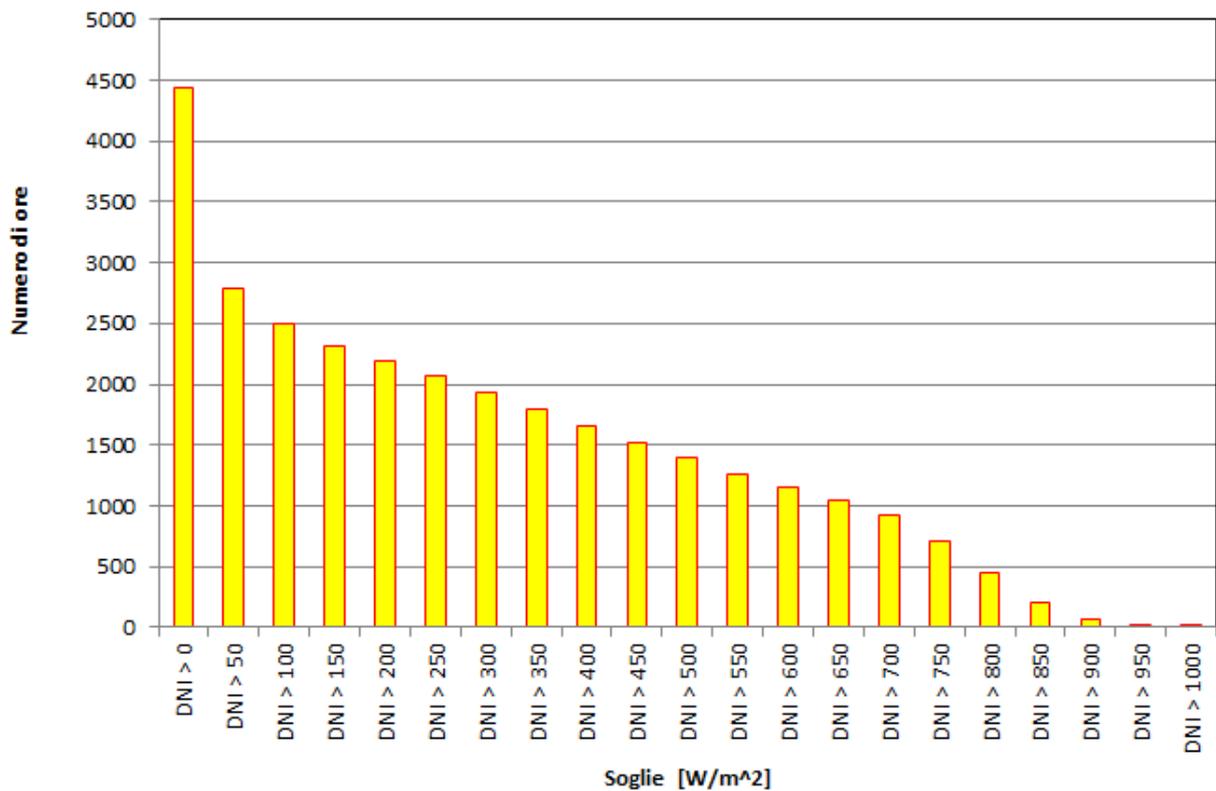


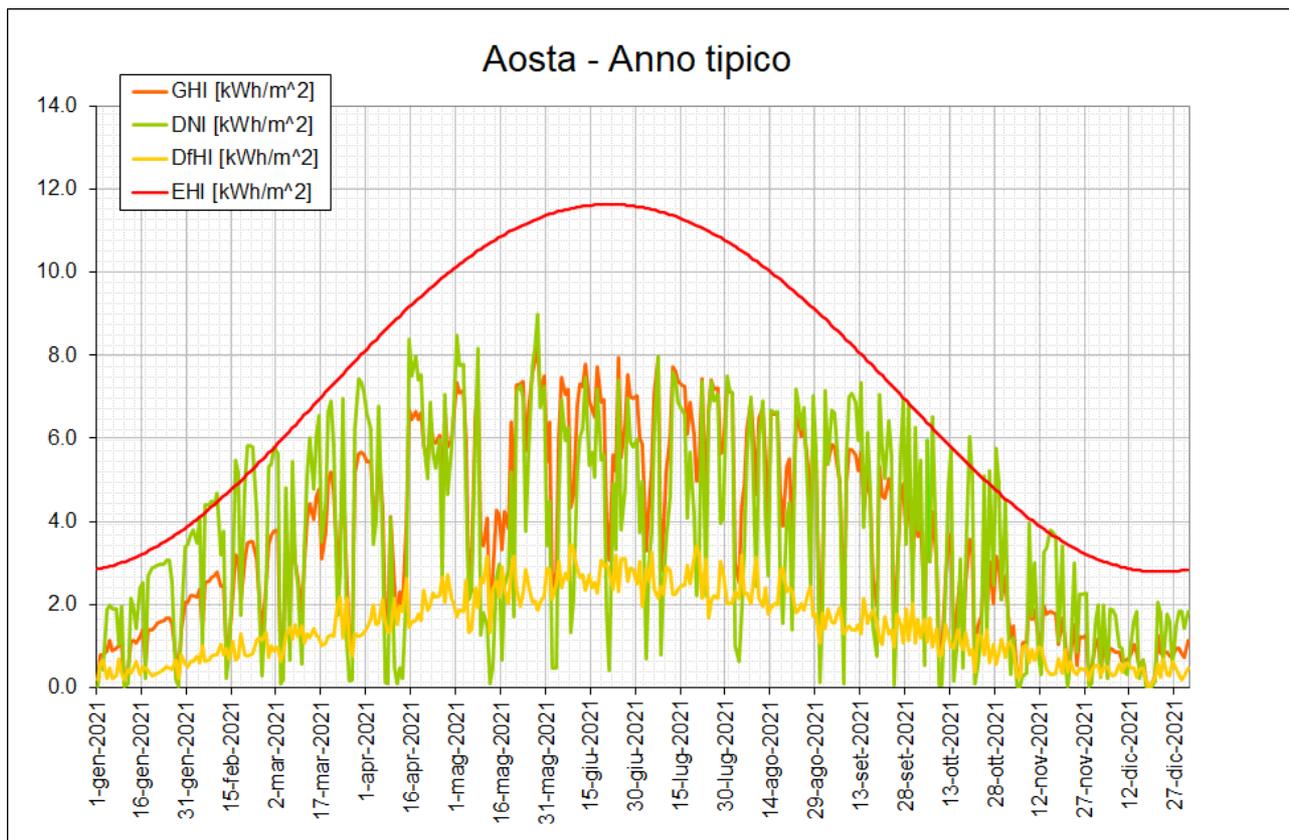
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	0.99	0.91	0.66	3.63	12.95
Feb	2.02	2.52	0.90	5.13	14.44
Mar	3.16	3.23	1.33	7.23	16.22
Apr	4.79	4.55	1.87	9.36	17.97
Mag	6.22	5.82	2.24	10.91	19.40
Giu	6.74	5.99	2.50	11.59	20.11
Lug	6.97	6.64	2.29	11.26	19.71
Ago	5.62	5.32	2.07	9.99	18.41
Set	4.15	4.15	1.70	8.08	16.76
Ott	2.53	2.85	1.07	5.92	15.00
Nov	1.64	2.11	0.81	4.09	13.36
Dic	1.13	1.53	0.62	3.22	12.46
anno	1401	1390	550	2756	5992

Ancona - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



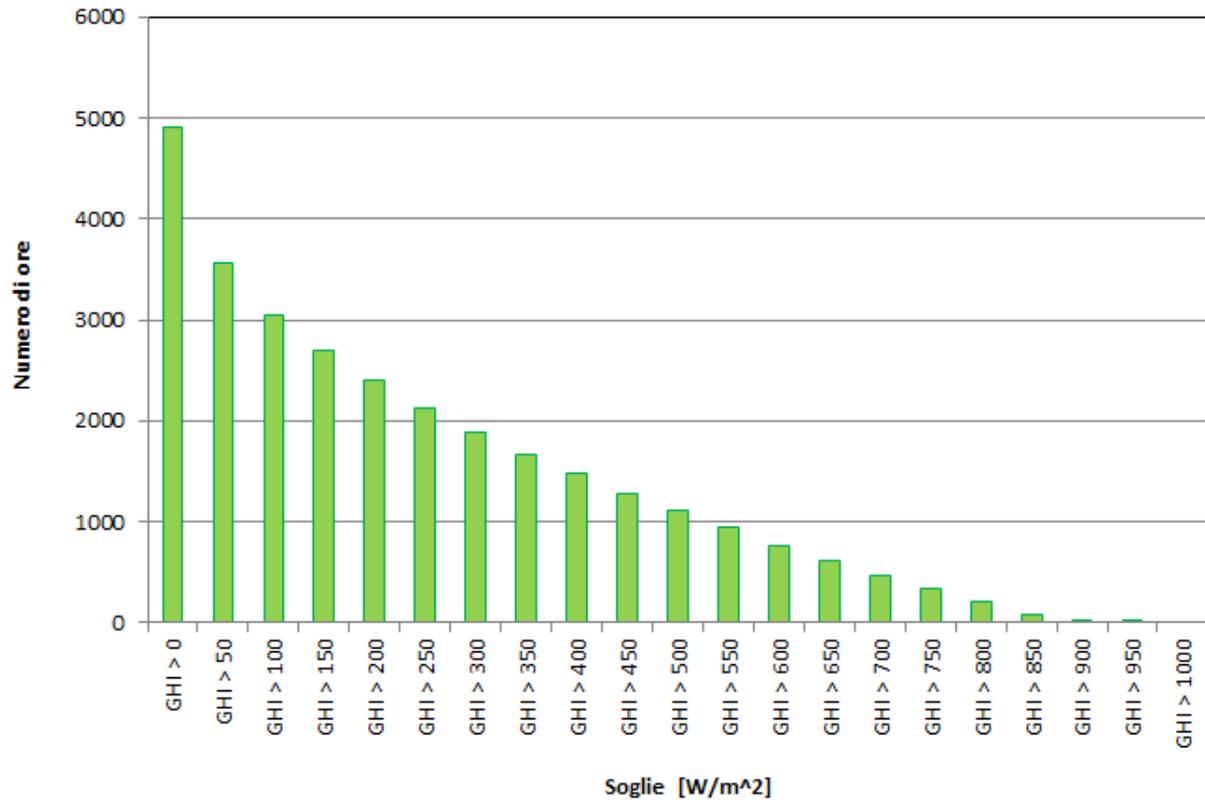
Ancona - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



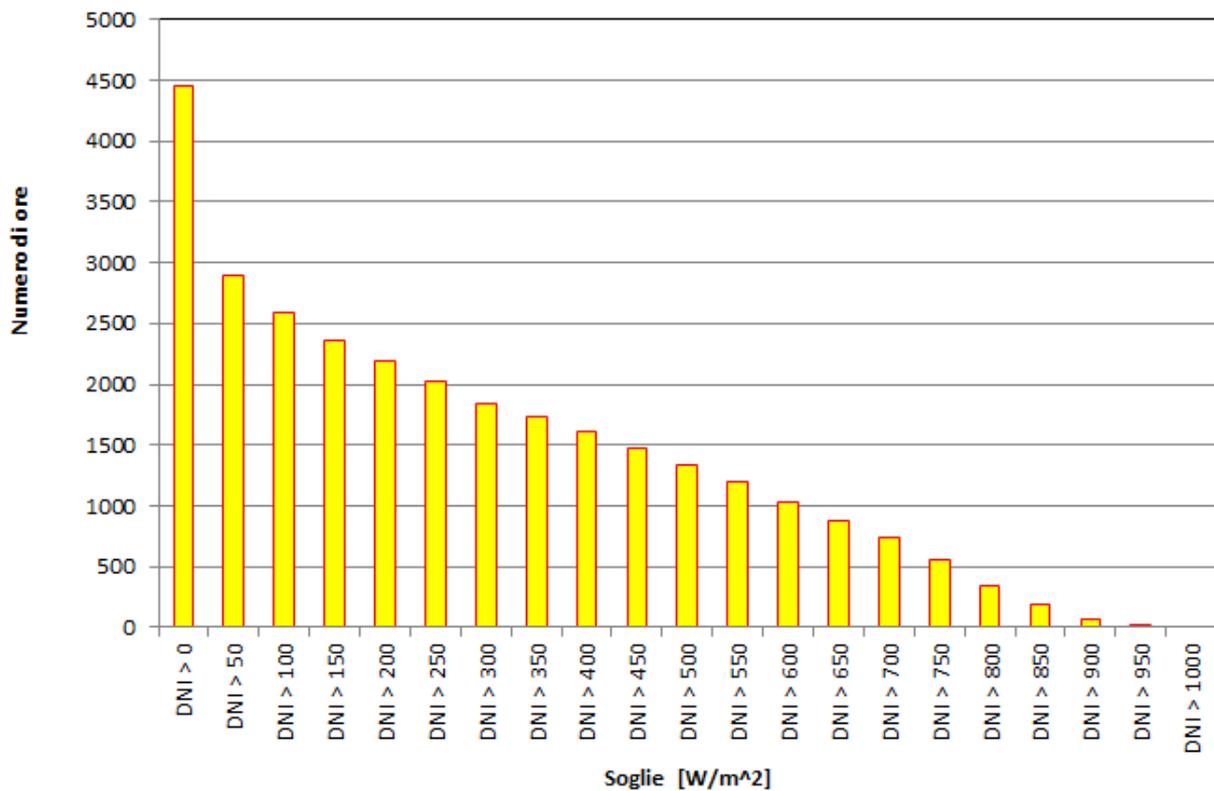


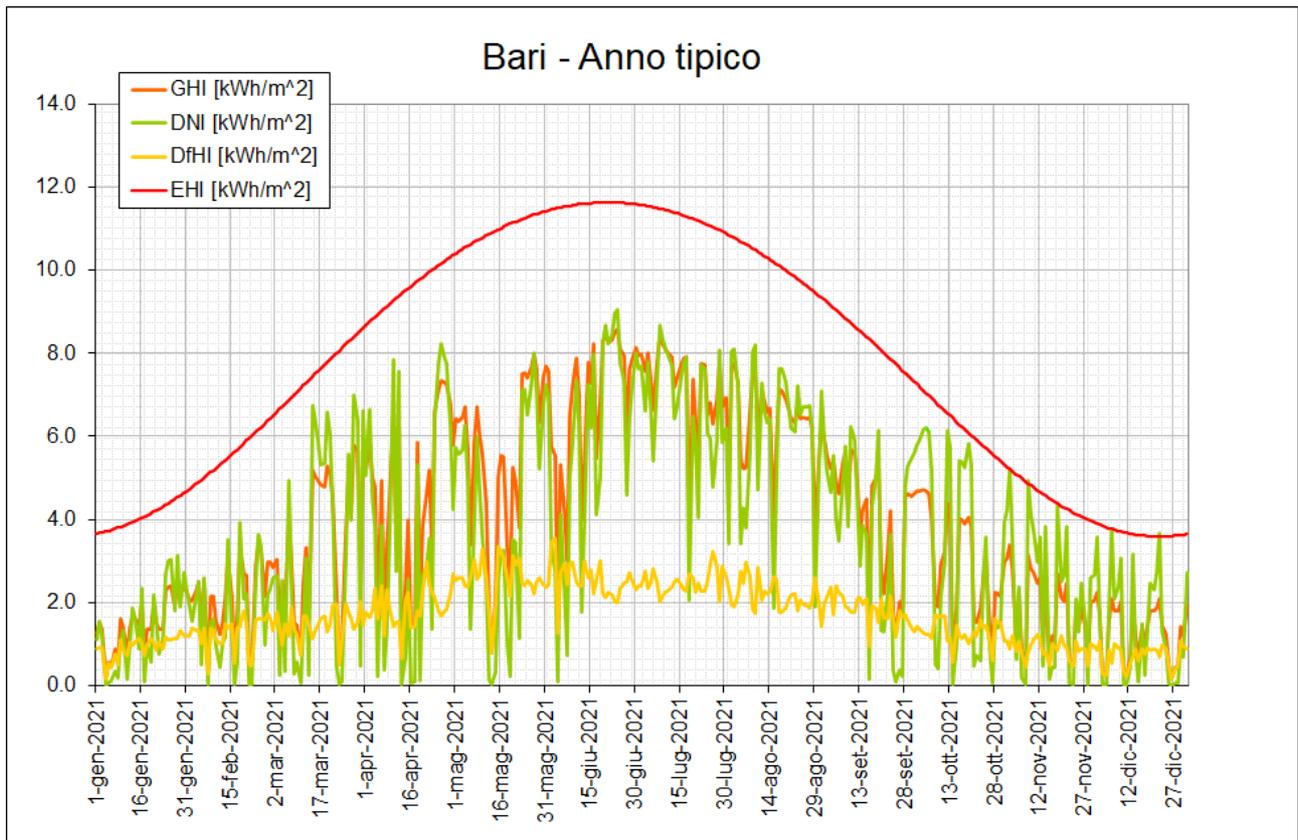
Aosta - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.13	1.84	0.43	3.27	12.62
Feb	2.53	3.68	0.86	4.78	14.25
Mar	3.58	4.16	1.26	6.94	16.19
Apr	4.89	4.63	1.90	9.18	18.10
Mag	5.50	4.64	2.27	10.84	19.67
Giu	6.18	4.77	2.74	11.58	20.46
Lug	6.15	5.05	2.54	11.22	20.03
Ago	5.19	4.39	2.18	9.86	18.60
Set	4.50	4.99	1.52	7.84	16.80
Ott	2.60	3.23	1.08	5.59	14.88
Nov	1.22	1.64	0.59	3.73	13.08
Dic	0.74	1.13	0.38	2.86	12.09
anno	1346	1341	540	2673	5992

Aosta - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



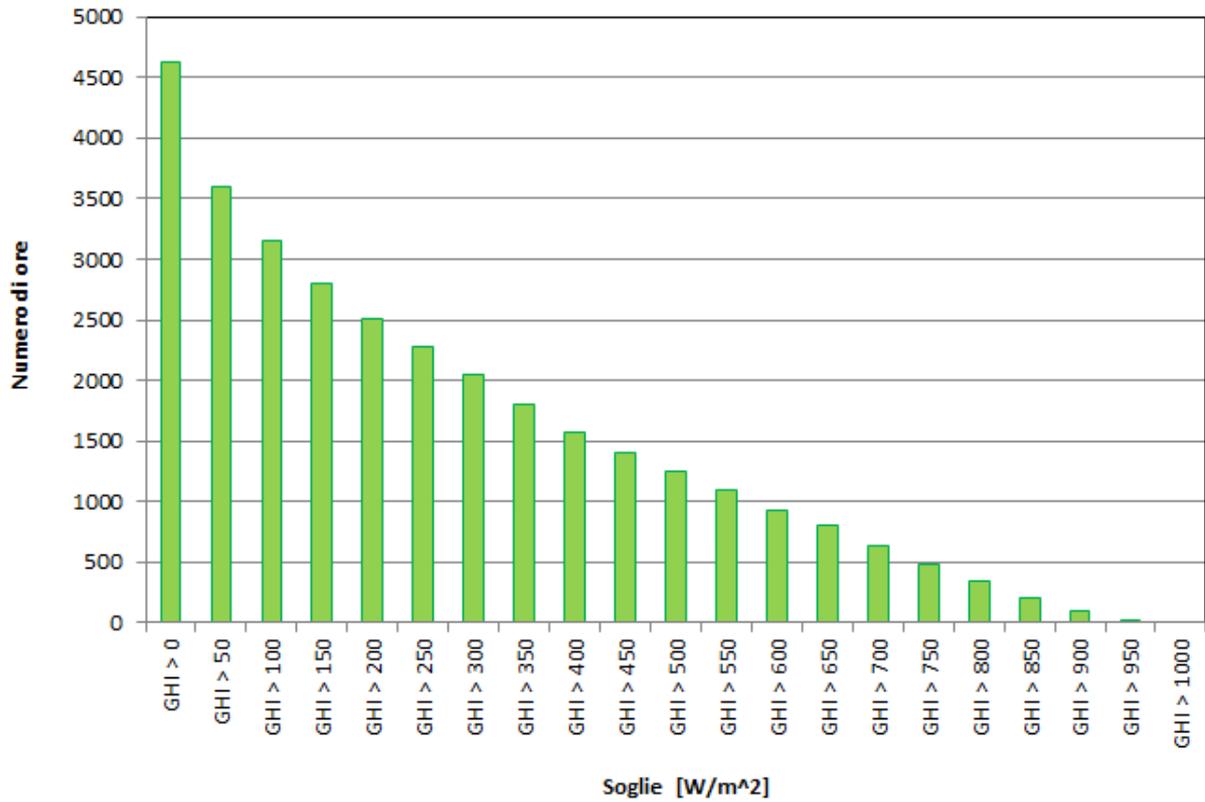
Aosta - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



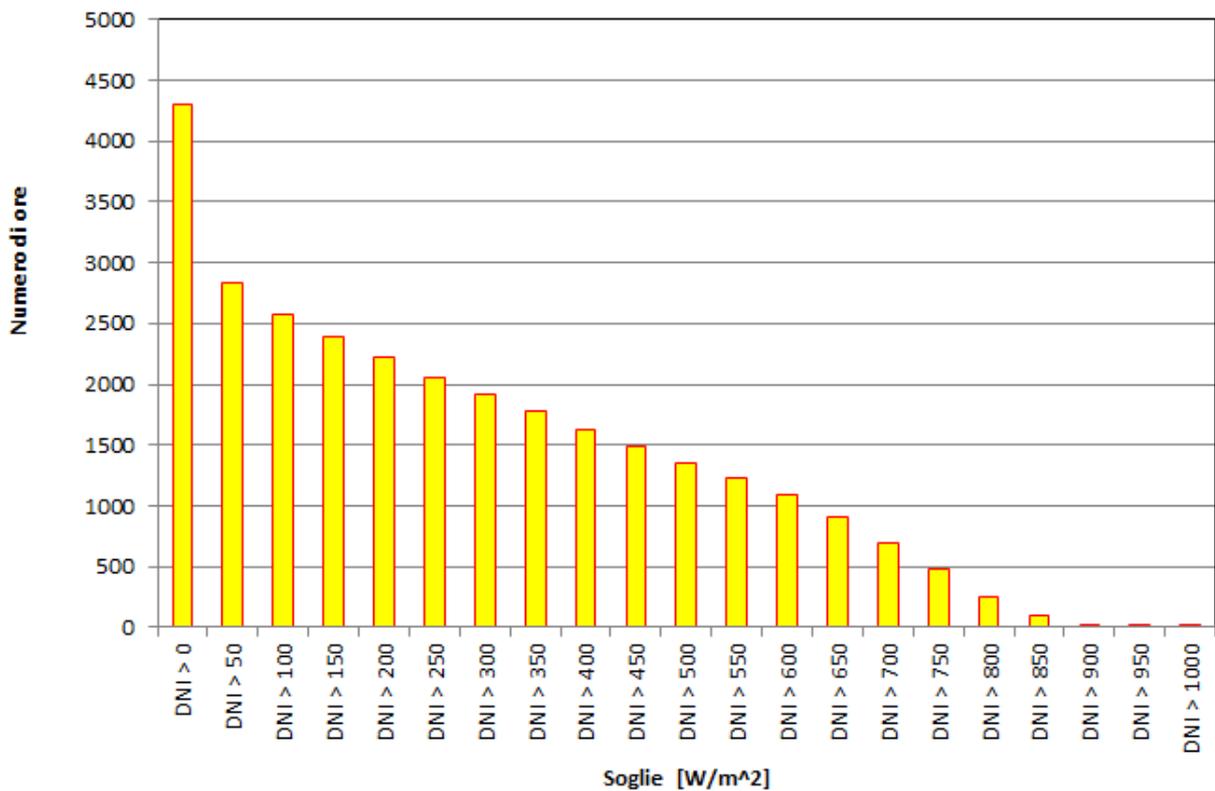


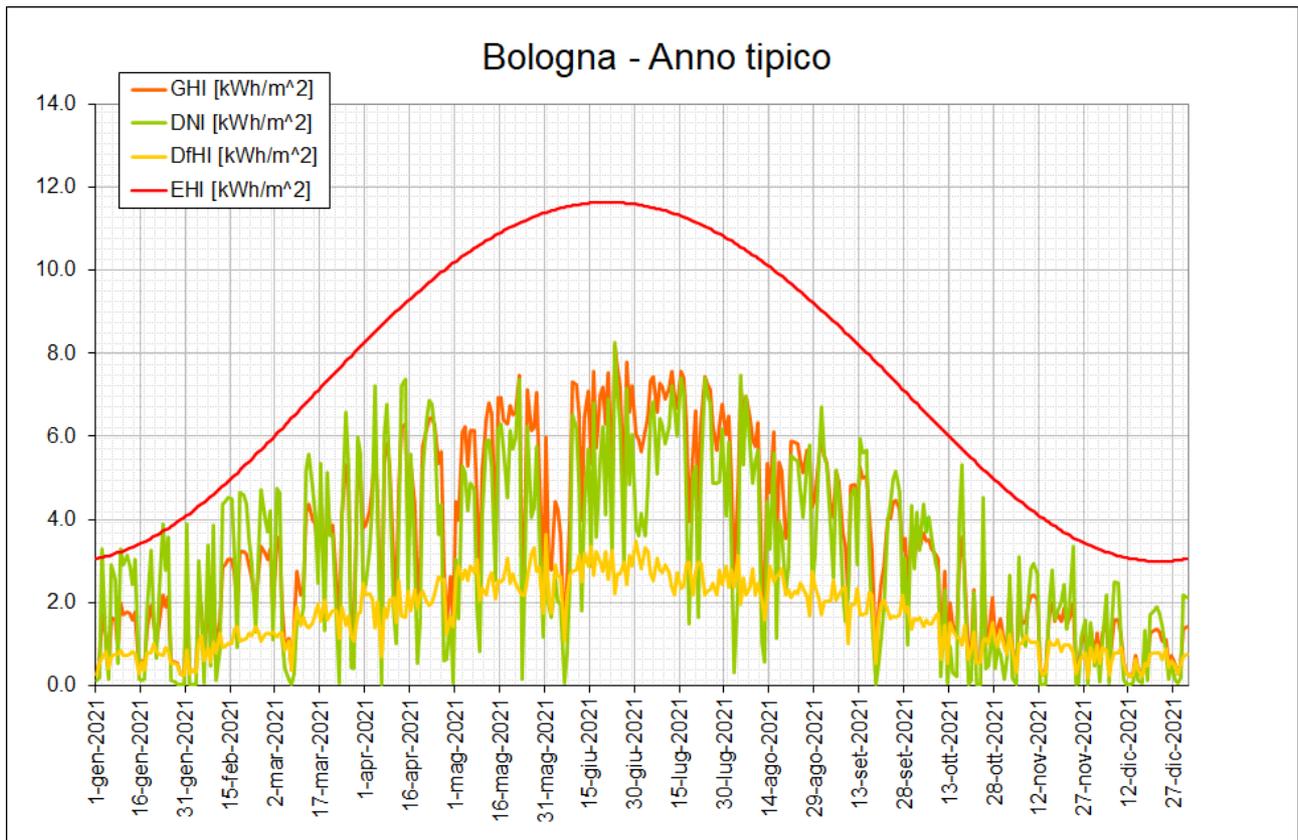
Bari - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.50	1.37	0.93	4.08	13.31
Feb	2.08	1.66	1.26	5.55	14.65
Mar	3.40	3.28	1.46	7.57	16.25
Apr	4.53	3.84	1.89	9.57	17.82
Mag	5.52	4.23	2.55	10.99	19.09
Giu	6.75	5.80	2.53	11.59	19.72
Lug	7.19	6.65	2.47	11.29	19.36
Ago	6.40	6.15	2.15	10.14	18.20
Set	4.14	3.70	1.84	8.36	16.71
Ott	3.09	3.38	1.29	6.31	15.13
Nov	1.84	2.23	0.88	4.53	13.67
Dic	1.25	1.41	0.71	3.67	12.87
anno	1455	1335	608	2854	5992

Bari - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



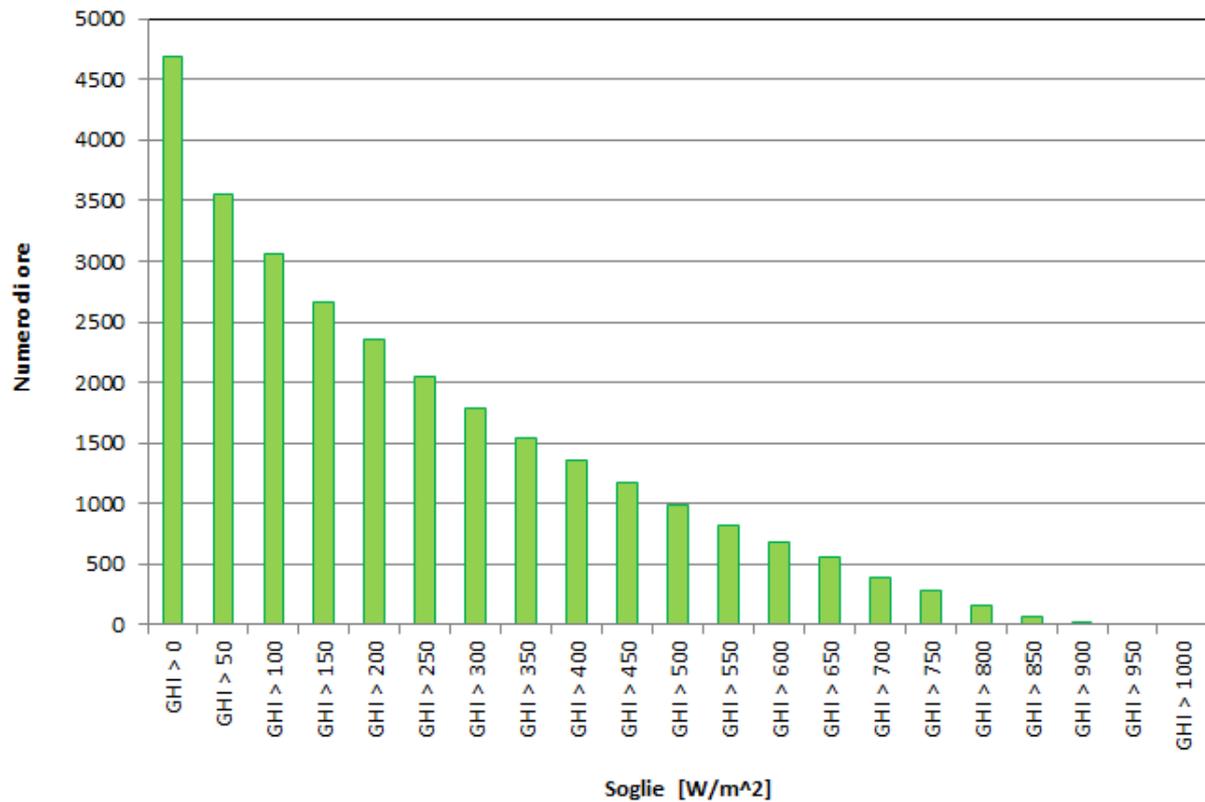
Bari - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



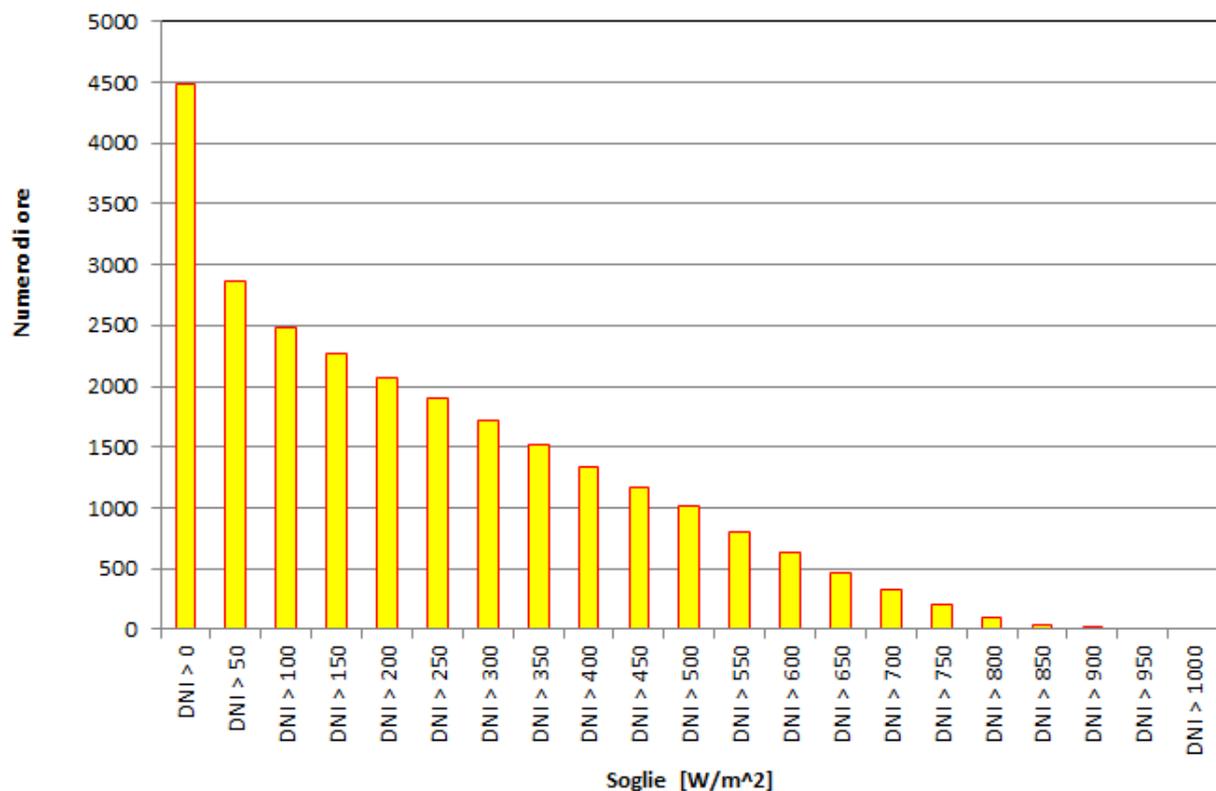


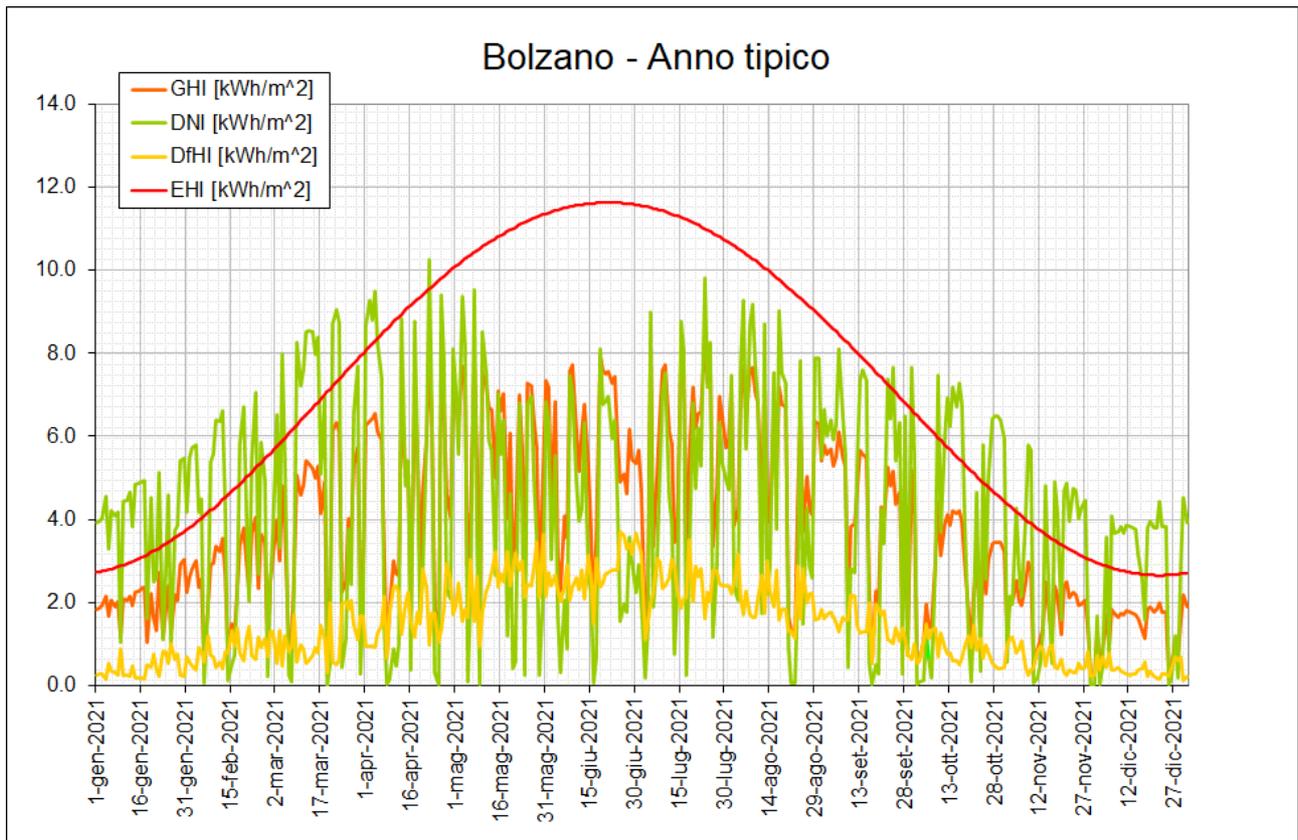
Bologna - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.23	1.69	0.65	3.48	12.82
Feb	2.24	2.73	1.01	4.98	14.36
Mar	3.07	2.92	1.50	7.11	16.21
Apr	4.40	3.84	1.95	9.28	18.02
Mag	5.61	4.34	2.61	10.88	19.51
Giu	5.71	4.27	2.72	11.59	20.25
Lug	6.54	5.44	2.66	11.25	19.84
Ago	5.12	4.20	2.35	9.94	18.49
Set	3.89	3.47	1.87	7.98	16.78
Ott	2.13	1.90	1.20	5.78	14.95
Nov	1.33	1.44	0.80	3.94	13.24
Dic	0.87	0.93	0.59	3.07	12.31
anno	1284	1132	607	2722	5992

Bologna - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



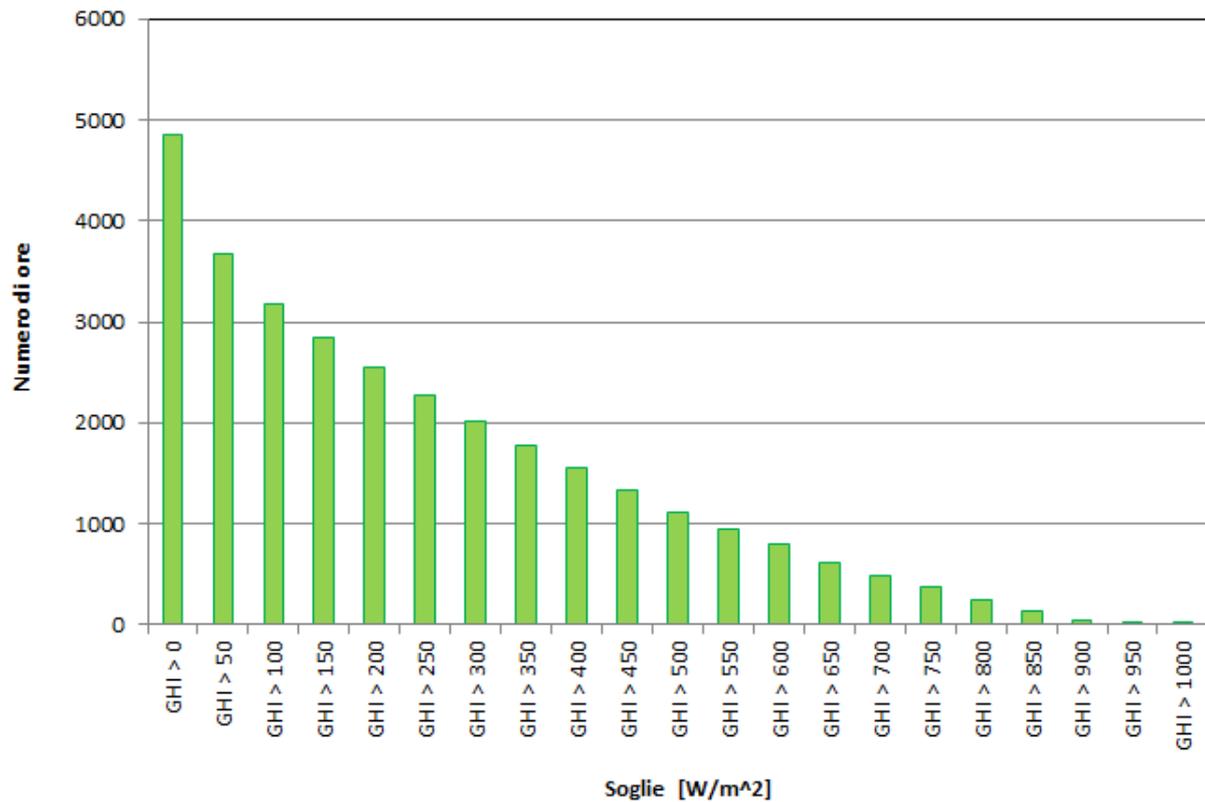
Bologna - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



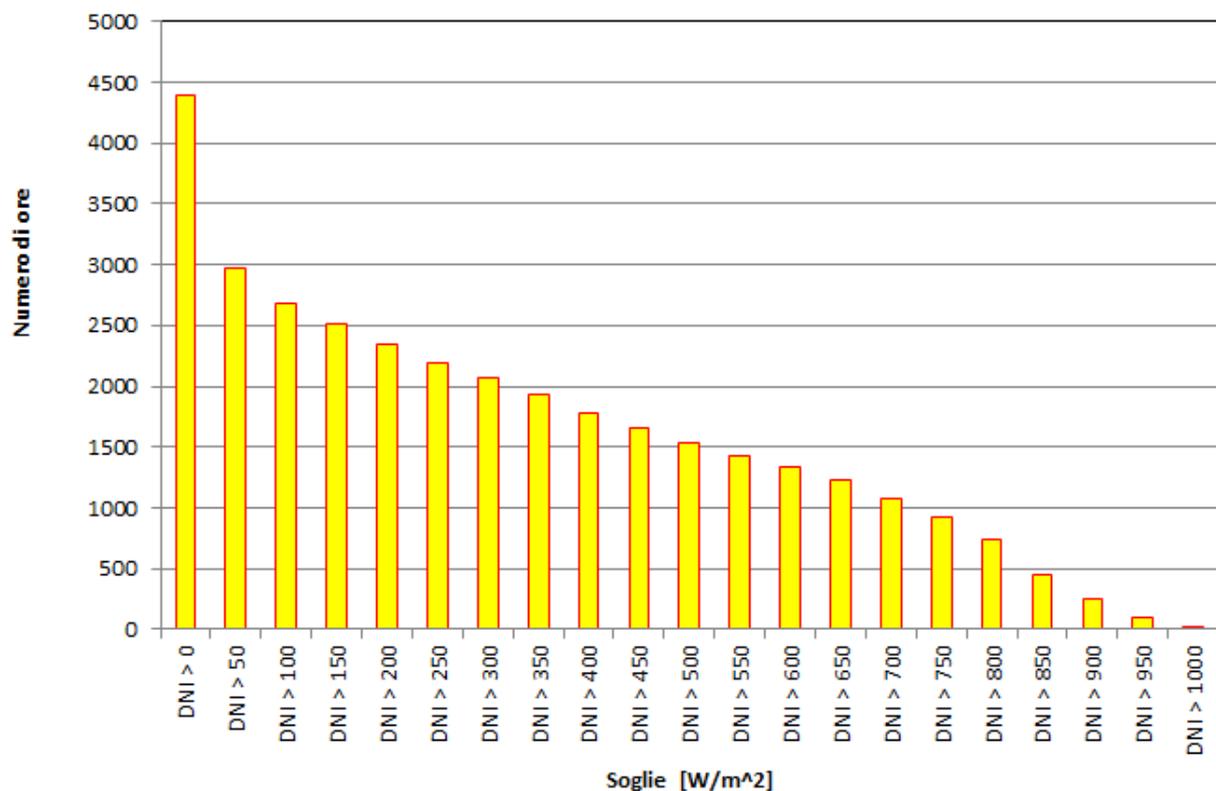


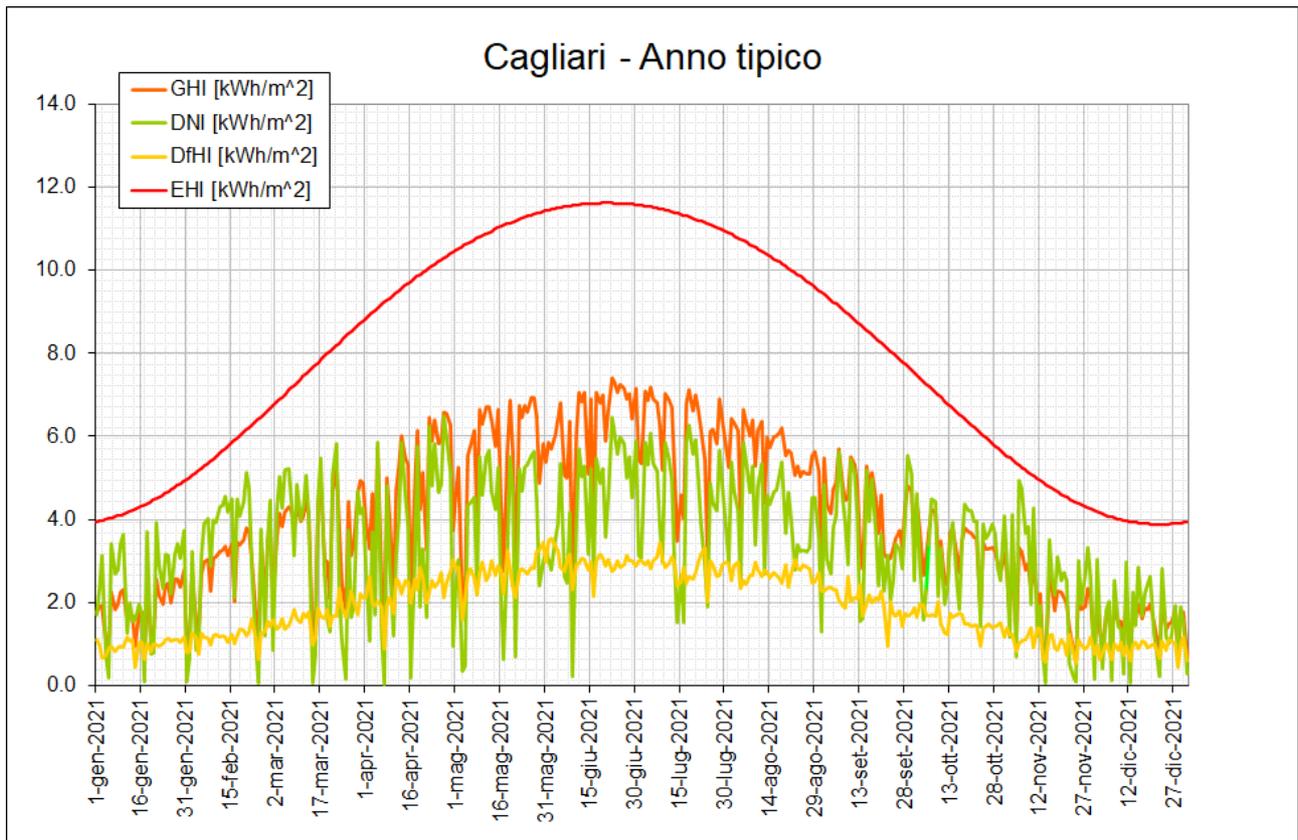
Bolzano - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	2.00	3.82	0.42	3.14	12.50
Feb	2.61	4.03	0.84	4.65	14.18
Mar	3.94	5.09	1.11	6.84	16.18
Apr	4.81	4.89	1.68	9.11	18.15
Mag	5.66	4.66	2.45	10.81	19.77
Giu	5.59	3.96	2.71	11.58	20.59
Lug	5.76	4.69	2.45	11.21	20.15
Ago	5.42	5.20	2.03	9.81	18.68
Set	4.25	4.75	1.44	7.75	16.82
Ott	2.84	4.07	0.85	5.47	14.83
Nov	1.80	2.88	0.61	3.60	12.98
Dic	1.47	2.84	0.38	2.73	11.95
anno	1406	1549	517	2643	5992

Bolzano - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



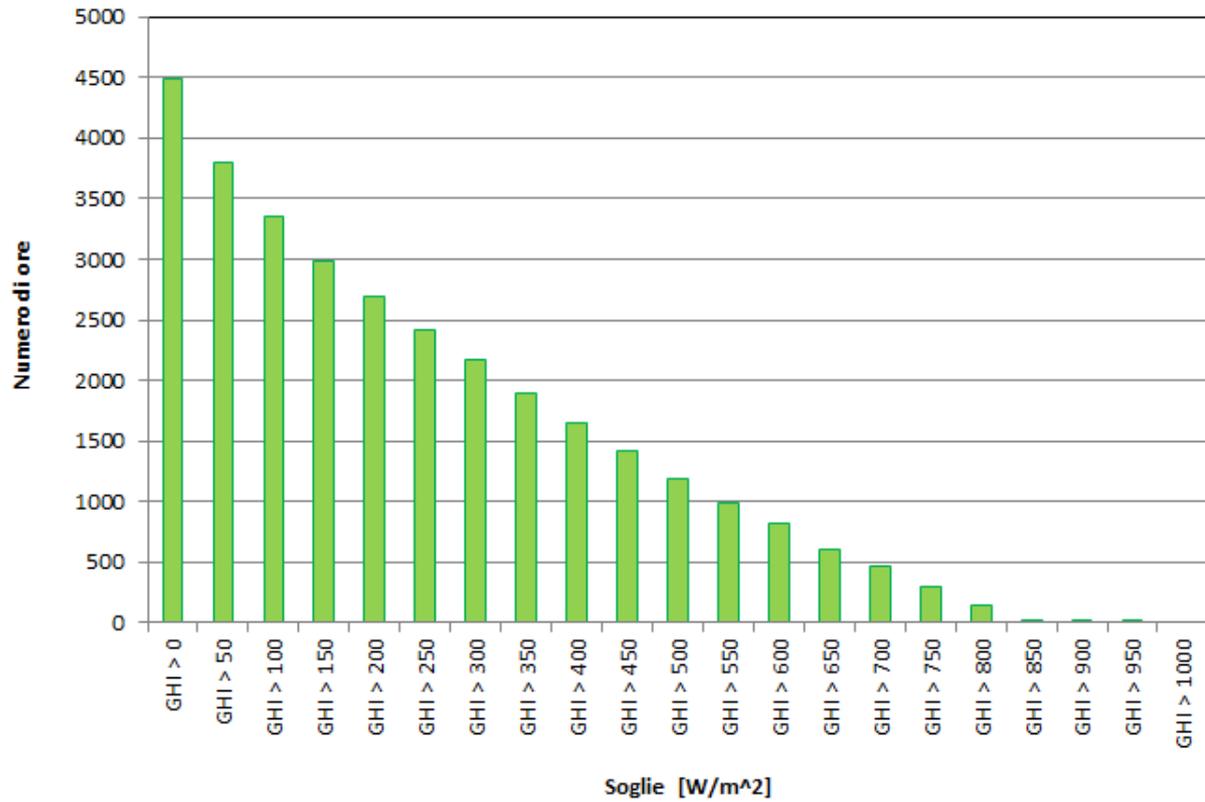
Bolzano - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



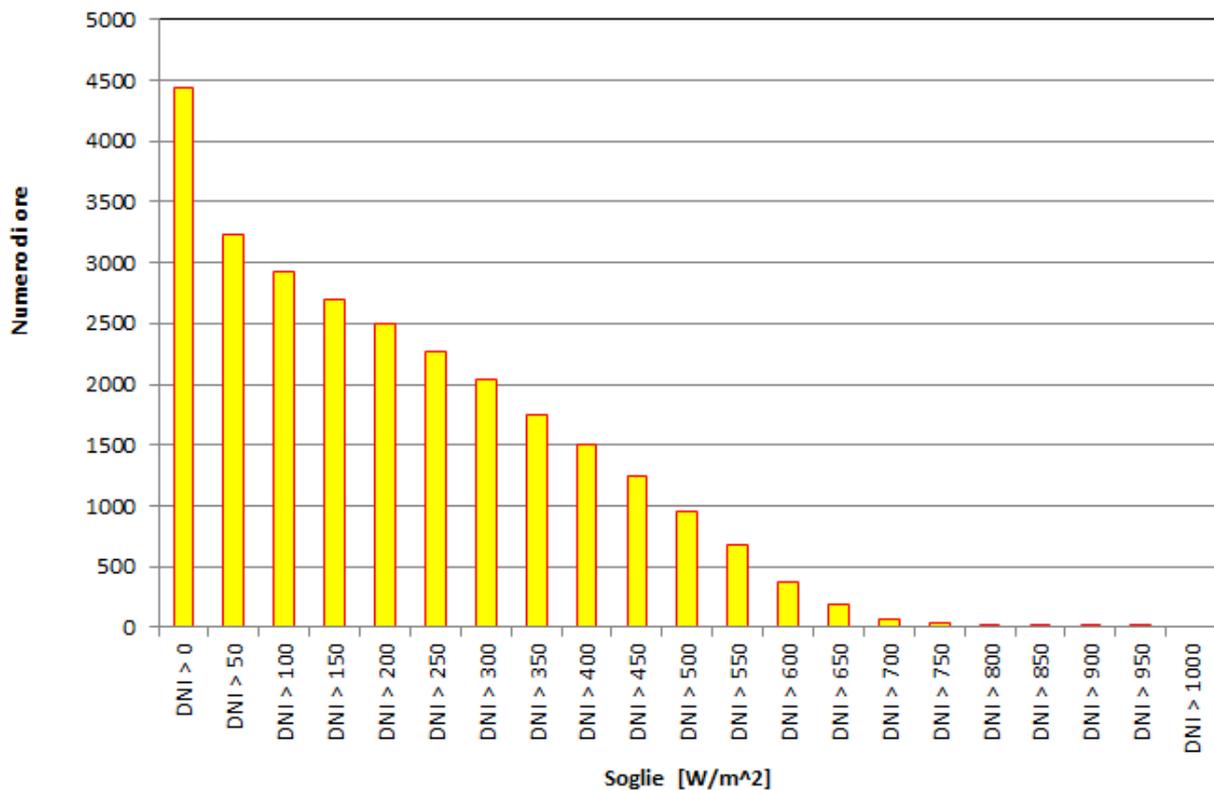


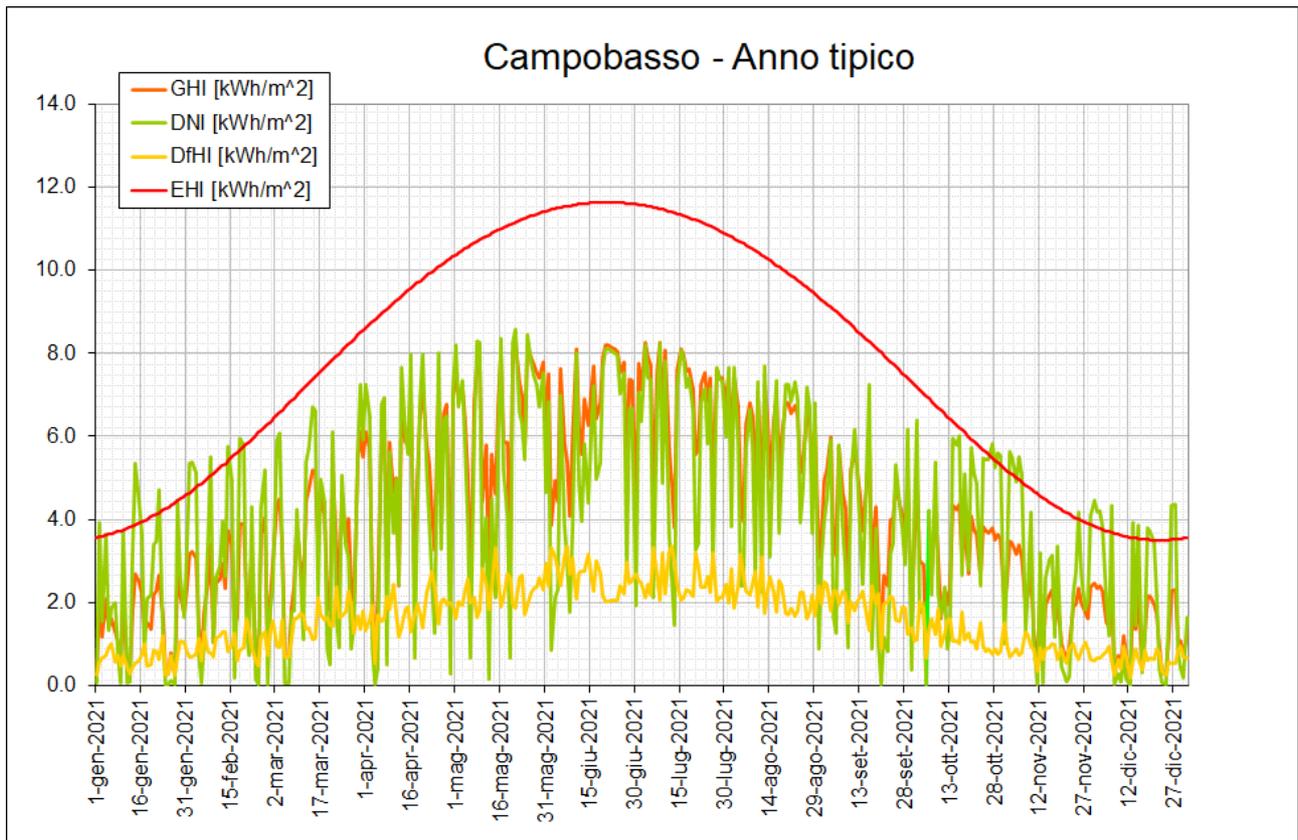
Cagliari - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.86	2.27	0.95	4.37	13.53
Feb	2.80	3.27	1.18	5.82	14.78
Mar	3.68	3.41	1.69	7.78	16.27
Apr	4.72	3.59	2.29	9.69	17.73
Mag	5.53	3.84	2.71	11.03	18.91
Giu	6.31	4.45	2.97	11.58	19.49
Lug	6.01	4.31	2.86	11.30	19.15
Ago	5.59	4.14	2.68	10.22	18.07
Set	4.33	3.70	1.99	8.54	16.68
Ott	3.33	3.27	1.55	6.55	15.21
Nov	2.05	2.33	1.02	4.81	13.85
Dic	1.49	1.55	0.89	3.96	13.12
anno	1453	1220	694	2915	5992

Cagliari - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



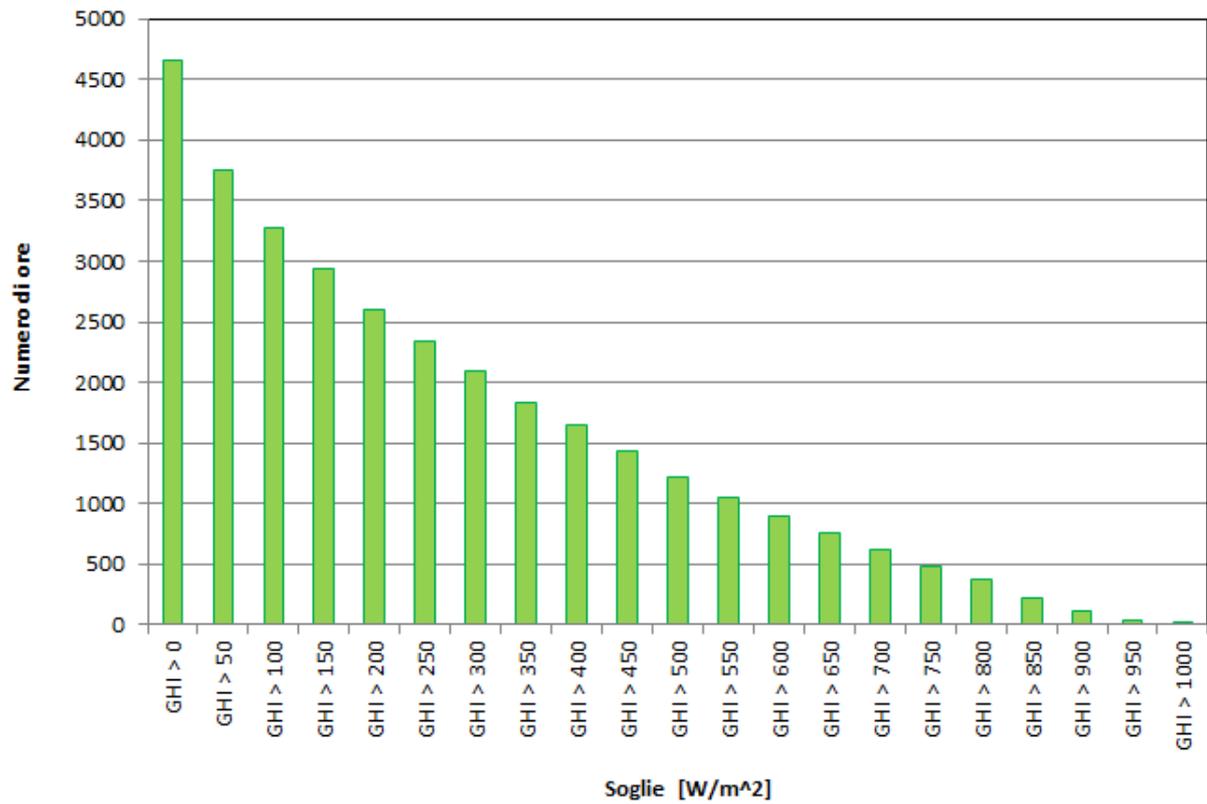
Cagliari - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



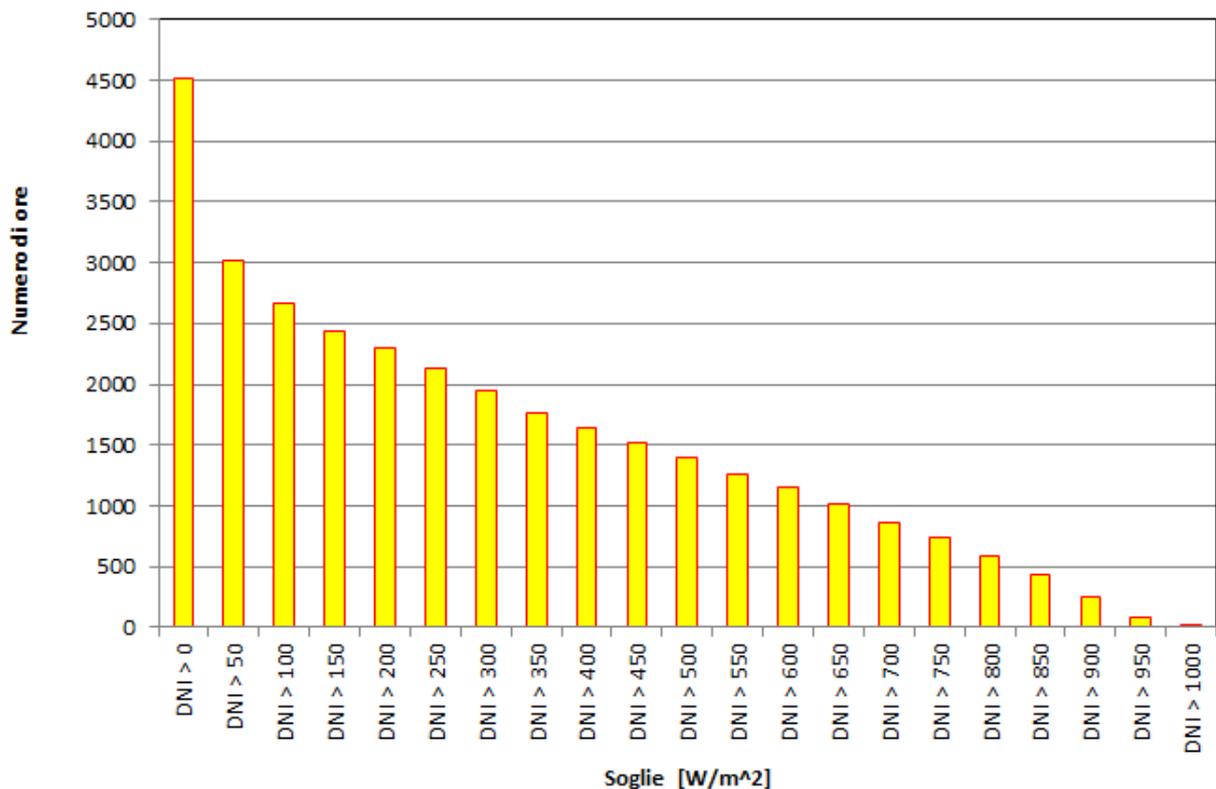


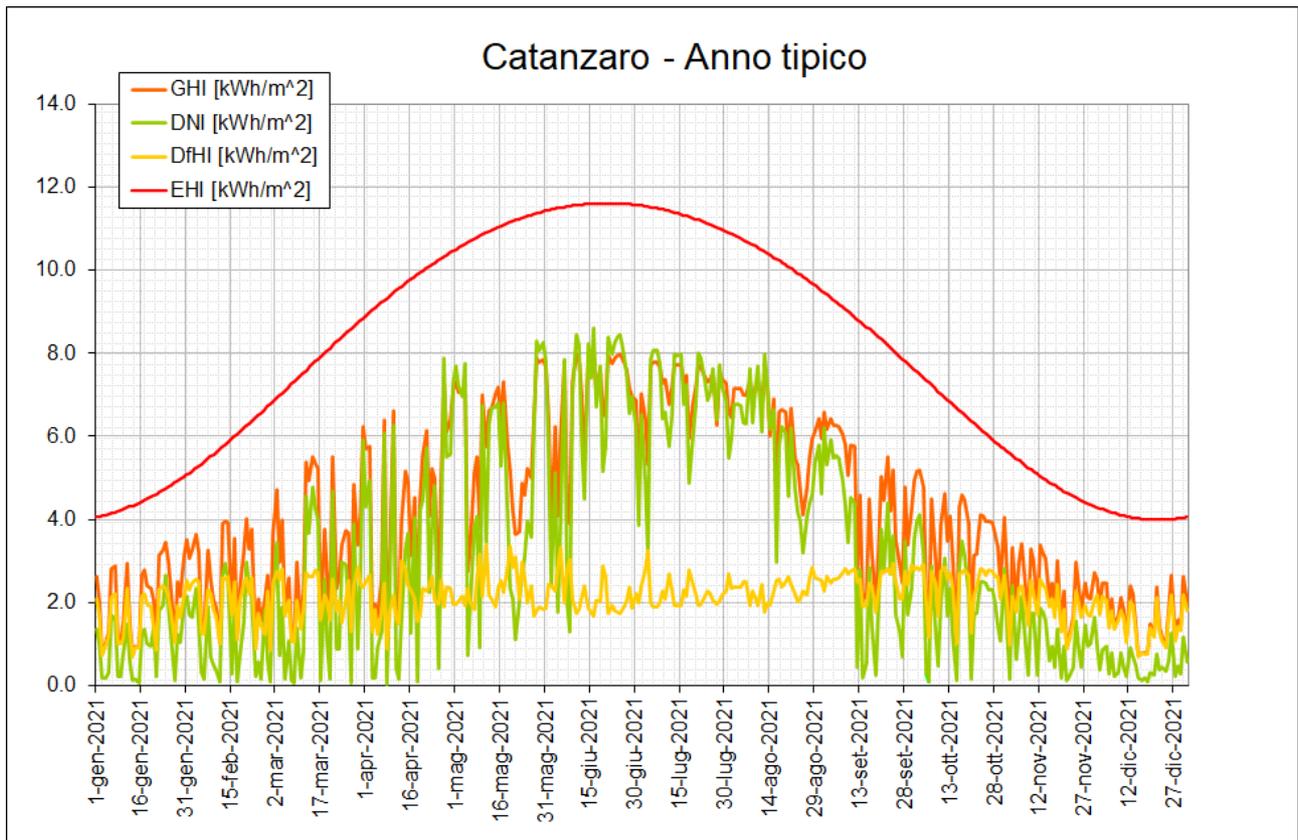
Campobasso - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.51	2.11	0.65	3.99	13.24
Feb	2.40	2.94	0.97	5.47	14.61
Mar	3.53	3.48	1.51	7.51	16.24
Apr	4.93	4.59	1.80	9.53	17.85
Mag	6.41	5.75	2.26	10.97	19.15
Giu	6.62	5.41	2.60	11.59	19.80
Lug	6.97	6.15	2.50	11.29	19.43
Ago	5.89	5.29	2.19	10.11	18.24
Set	4.05	3.42	1.92	8.31	16.72
Ott	3.27	3.89	1.20	6.23	15.10
Nov	2.01	2.68	0.82	4.44	13.61
Dic	1.37	1.89	0.63	3.58	12.79
anno	1493	1451	581	2835	5992

Campobasso - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



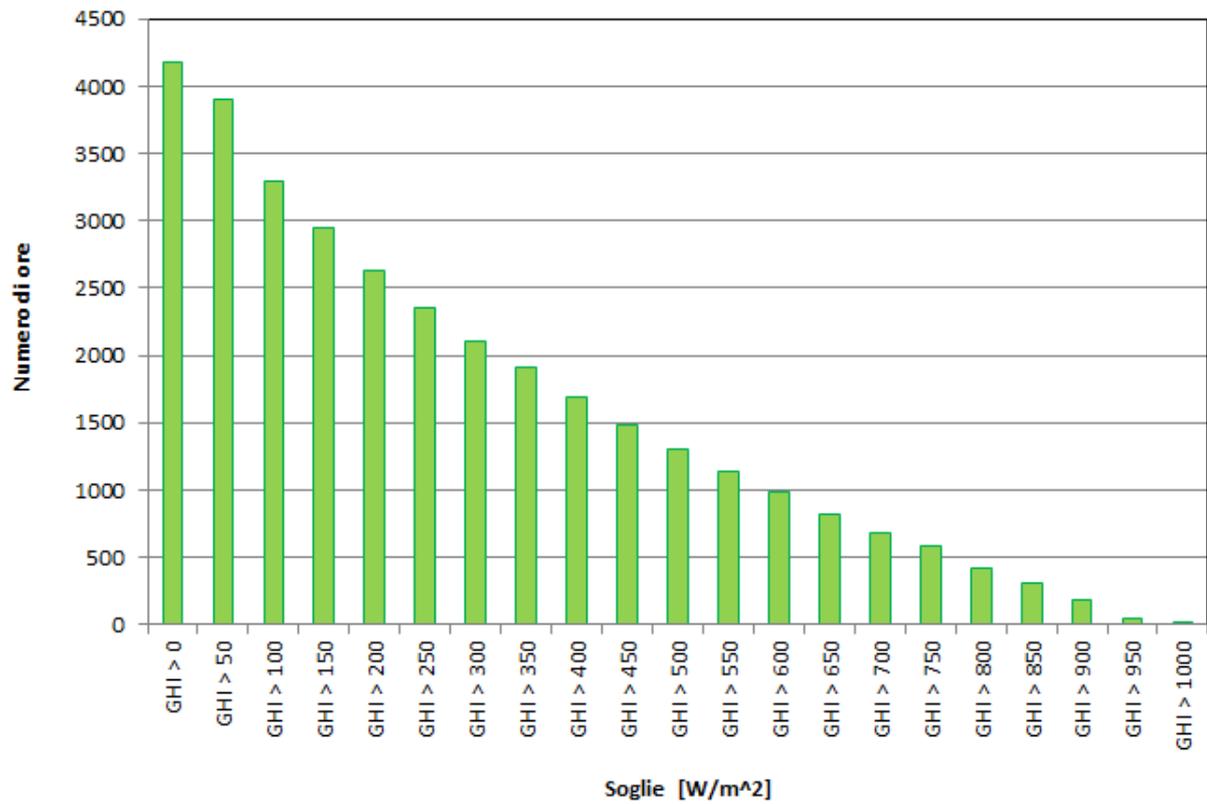
Campobasso - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



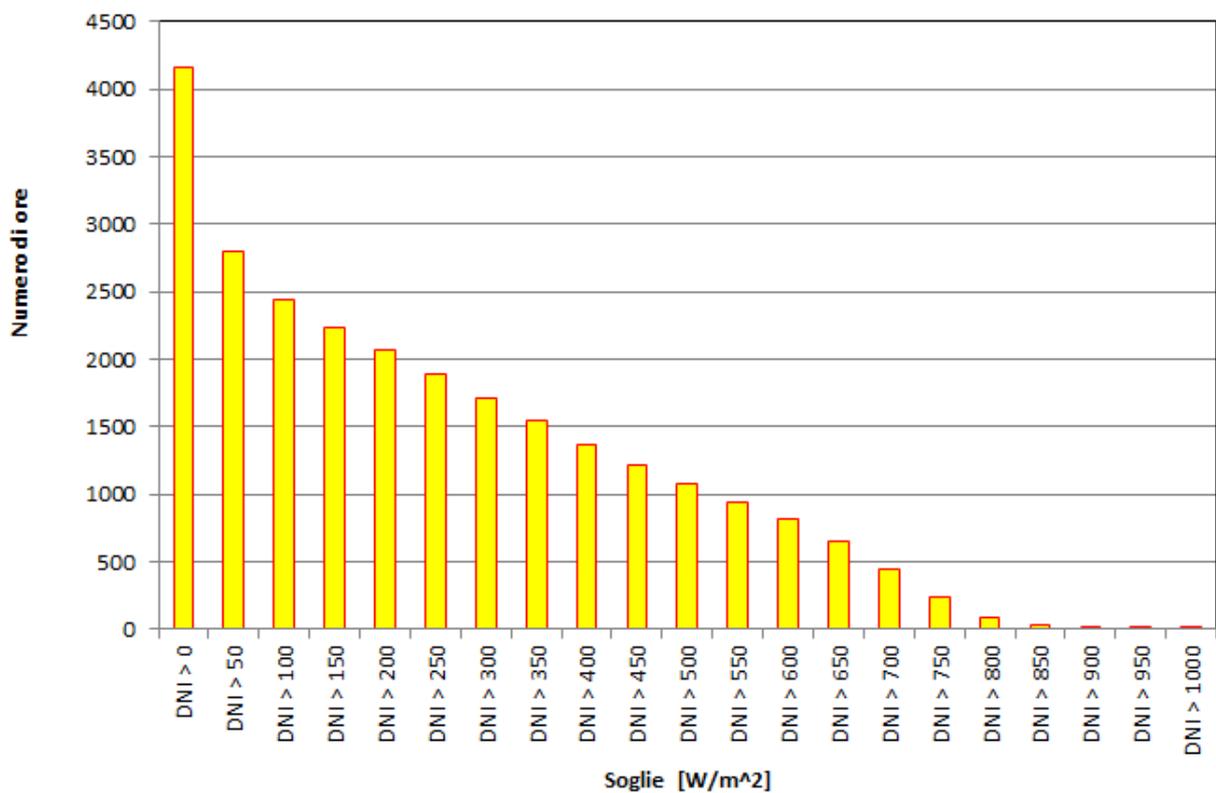


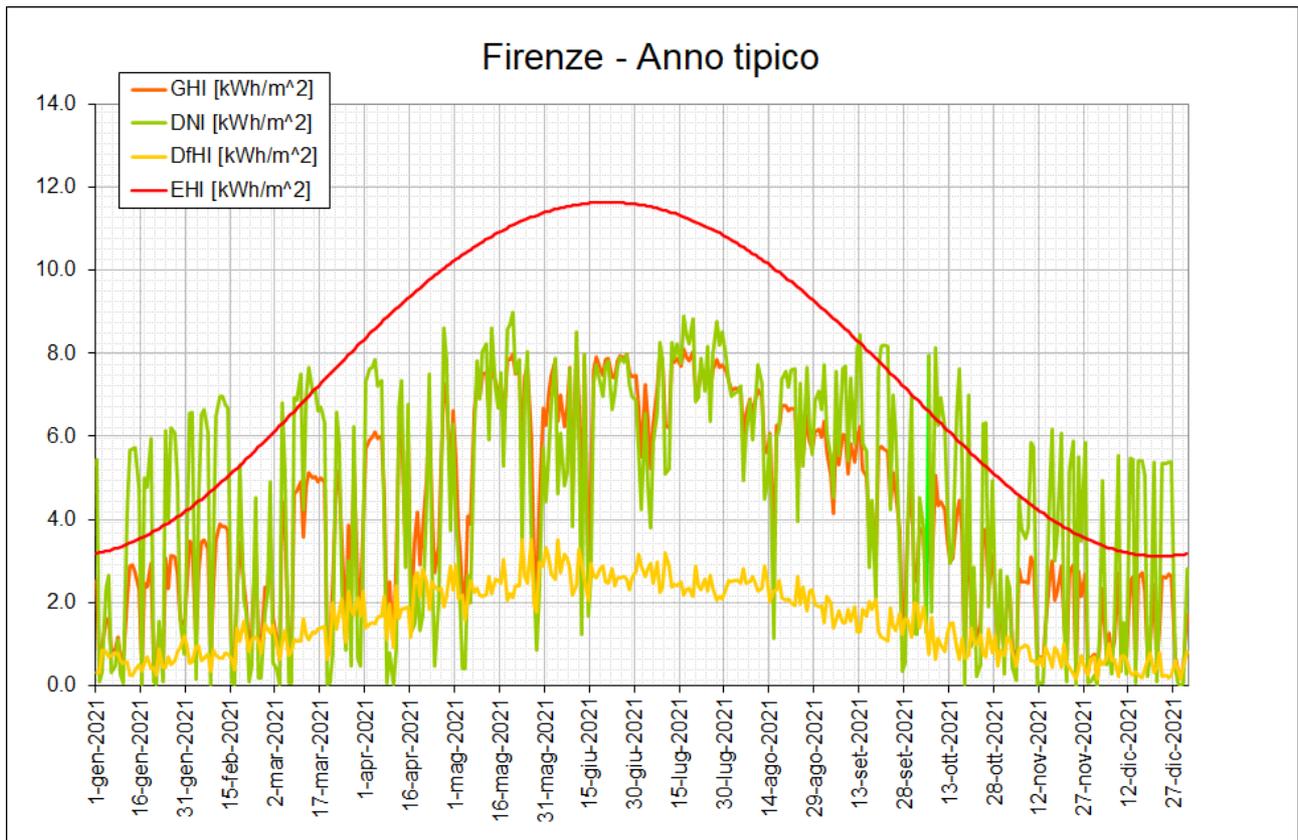
Catanzaro - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	2.08	1.03	1.64	4.48	13.61
Feb	2.56	1.25	1.96	5.92	14.82
Mar	3.41	2.09	2.14	7.86	16.27
Apr	4.25	3.21	2.07	9.74	17.69
Mag	5.91	4.96	2.32	11.04	18.84
Giu	6.85	6.34	2.18	11.58	19.40
Lug	7.13	6.76	2.22	11.31	19.07
Ago	6.32	5.76	2.32	10.25	18.02
Set	4.55	3.15	2.51	8.60	16.67
Ott	3.59	2.09	2.45	6.64	15.24
Nov	2.34	1.04	1.89	4.92	13.92
Dic	1.68	0.51	1.50	4.07	13.21
anno	1545	1167	767	2938	5992

Catanzaro - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



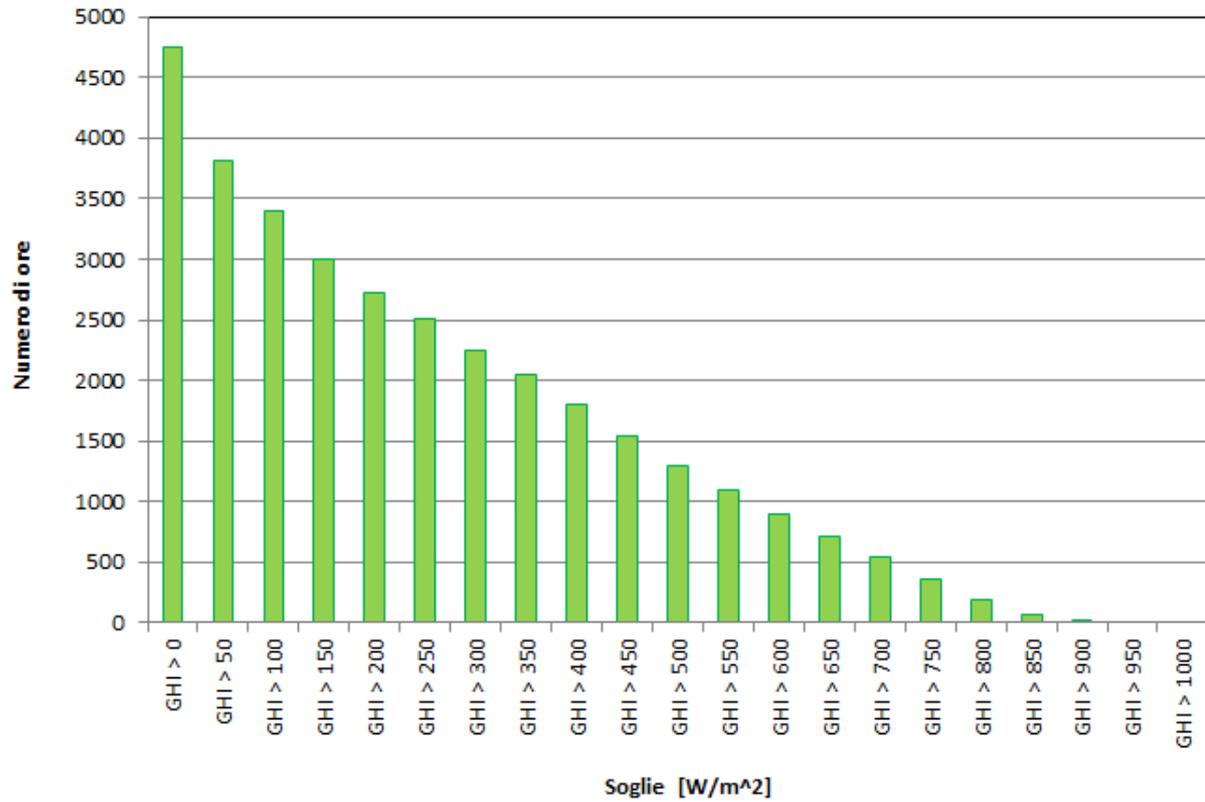
Catanzaro - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



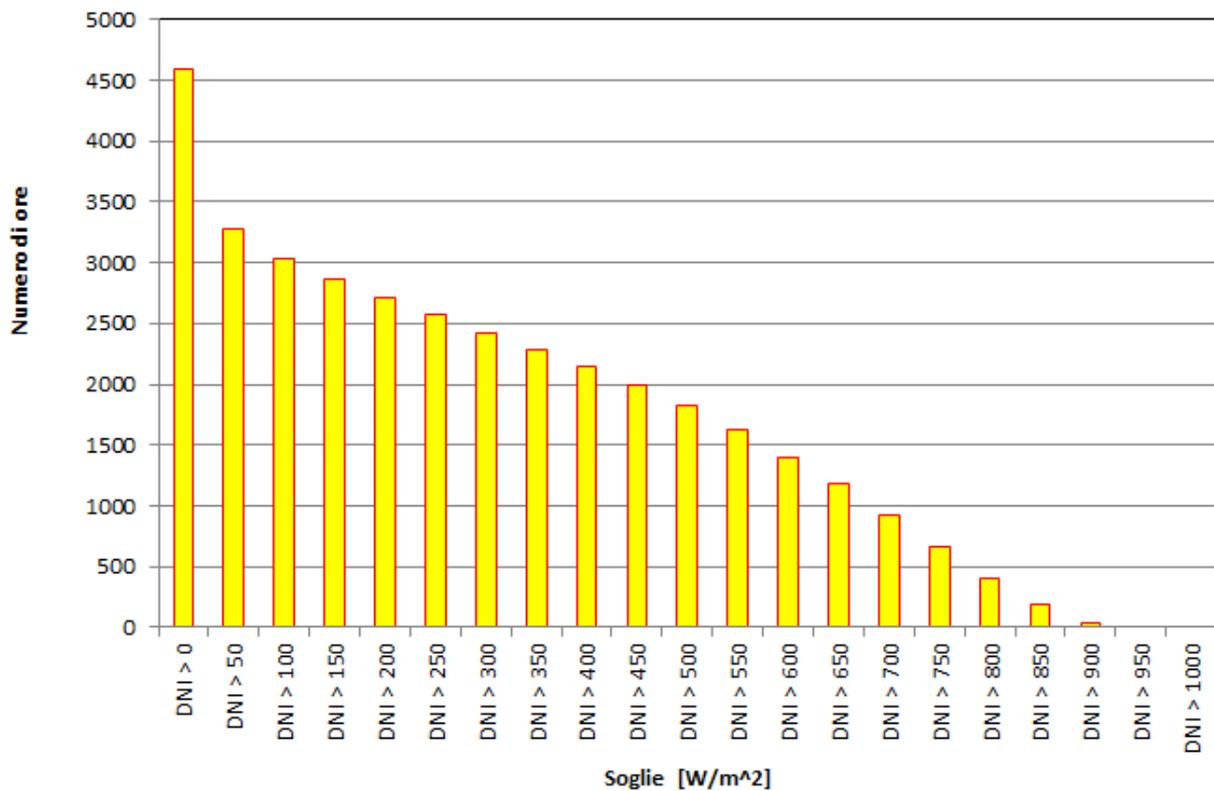


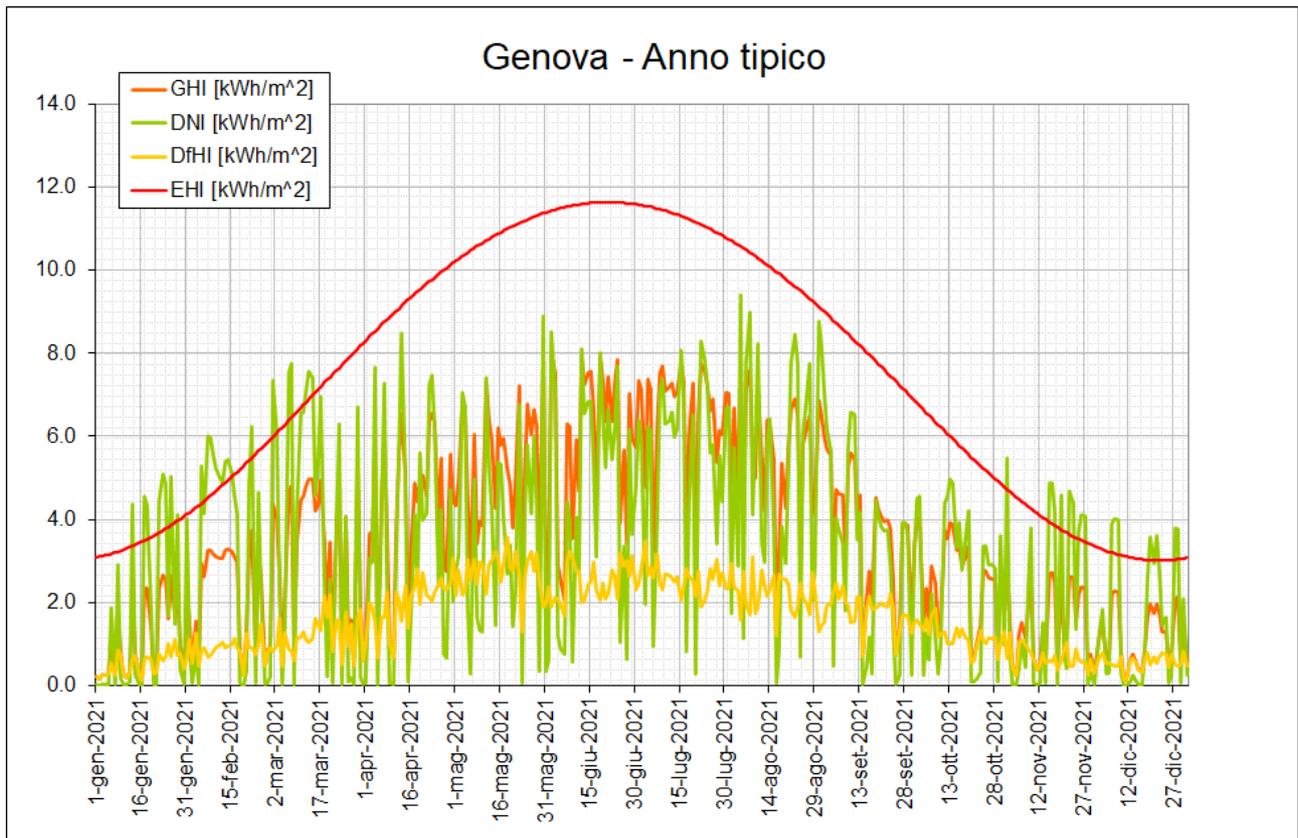
Firenze - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.75	2.88	0.59	3.61	12.92
Feb	2.48	3.58	0.89	5.10	14.42
Mar	3.37	3.79	1.37	7.21	16.21
Apr	4.63	4.37	1.98	9.35	17.97
Mag	6.05	5.48	2.45	10.91	19.42
Giu	7.01	6.37	2.70	11.59	20.14
Lug	7.29	7.17	2.51	11.26	19.74
Ago	6.29	6.34	2.30	9.98	18.43
Set	4.90	5.76	1.58	8.06	16.76
Ott	2.98	3.76	1.11	5.89	14.99
Nov	1.84	2.85	0.65	4.06	13.34
Dic	1.48	2.48	0.46	3.20	12.43
anno	1526	1670	567	2750	5992

Firenze - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



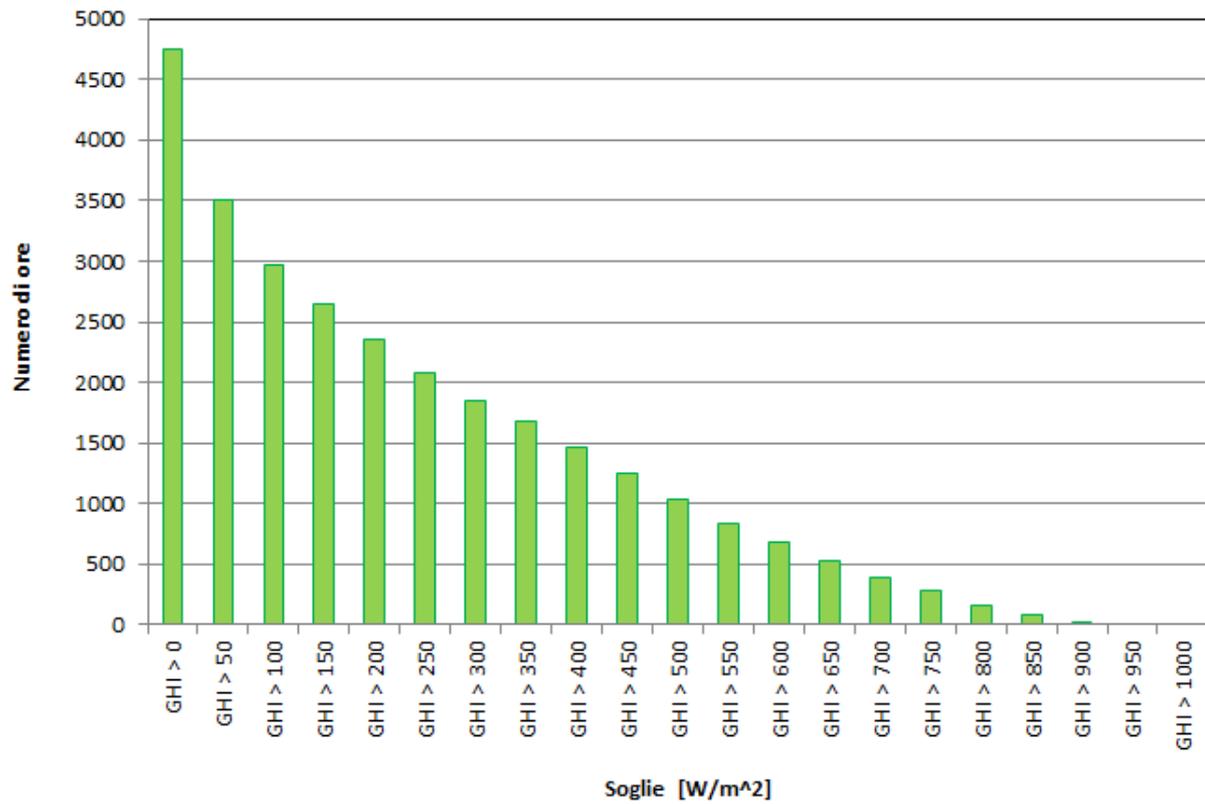
Firenze - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



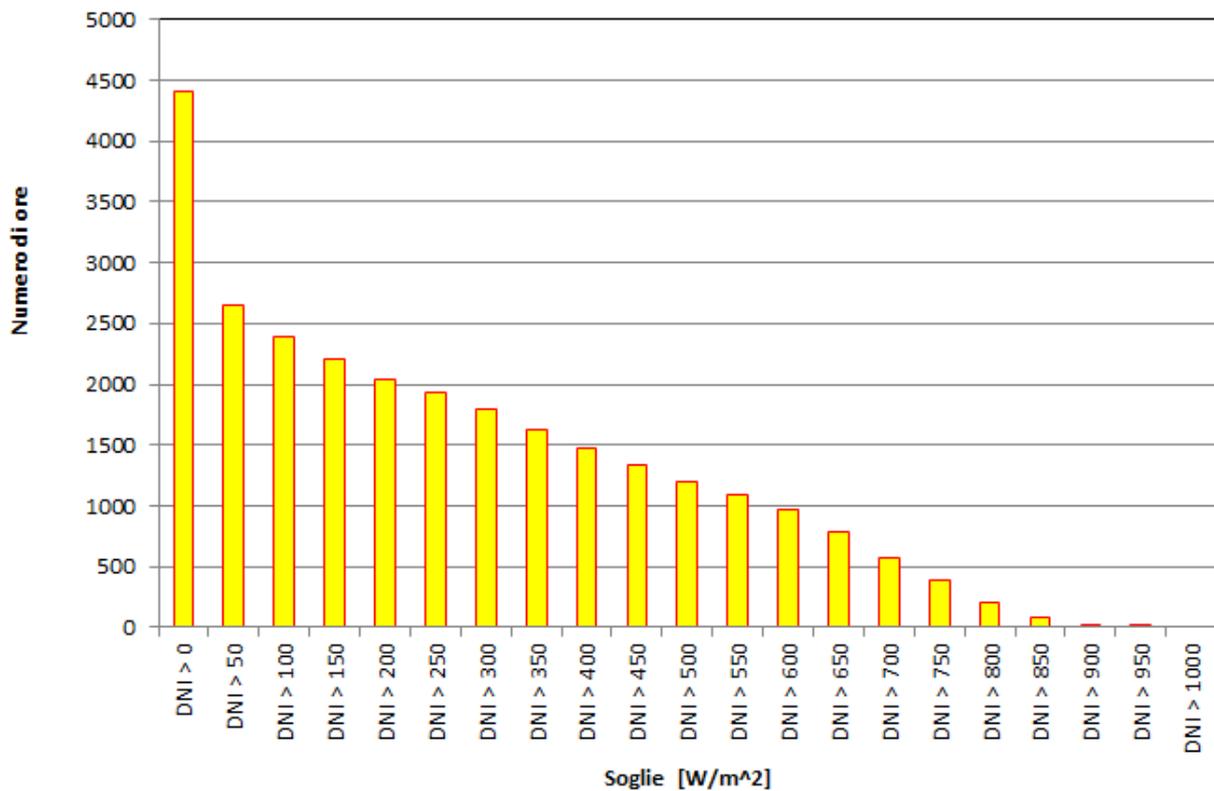


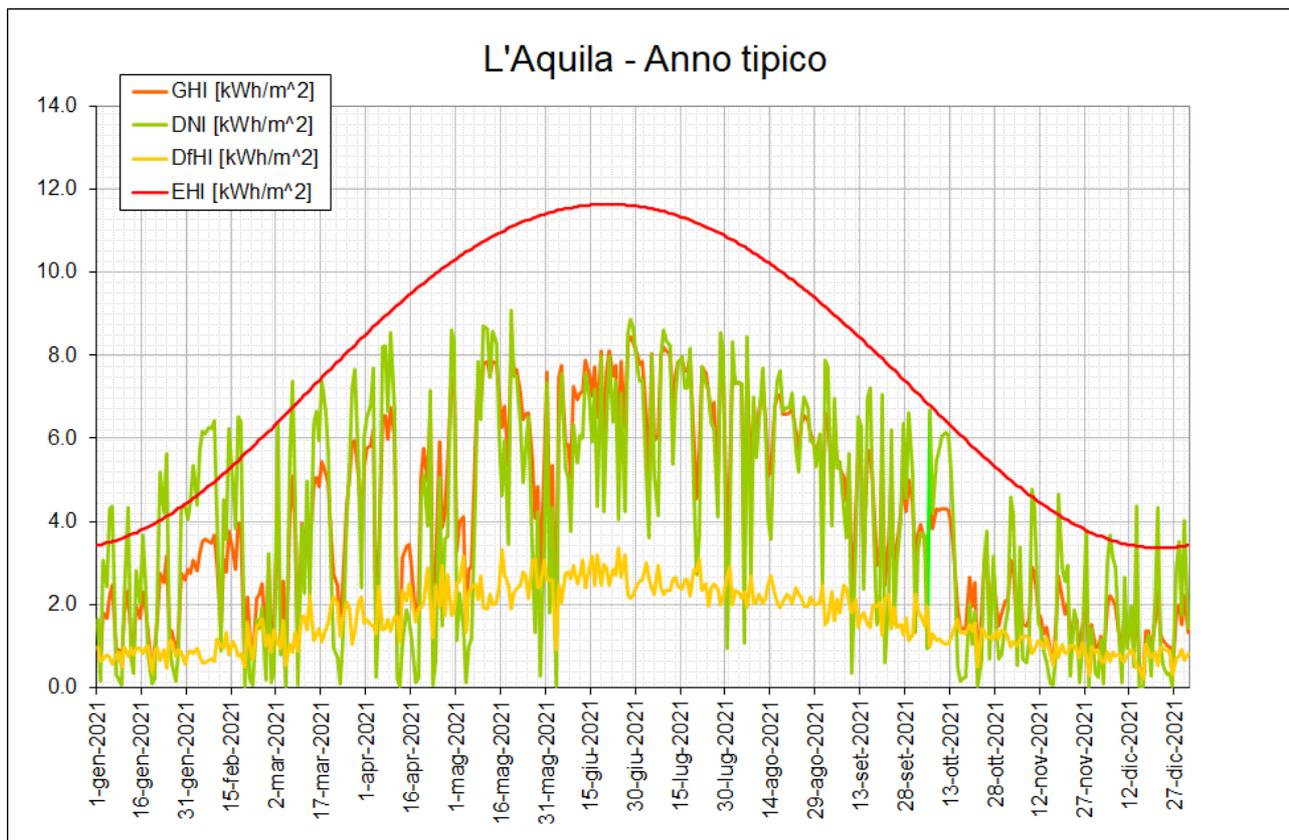
Genova - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.15	1.67	0.51	3.51	12.84
Feb	2.24	3.11	0.88	5.01	14.37
Mar	3.17	3.73	1.22	7.13	16.21
Apr	4.15	3.60	1.99	9.30	18.01
Mag	5.17	3.70	2.70	10.89	19.49
Giu	5.88	4.57	2.49	11.59	20.23
Lug	6.52	5.52	2.57	11.25	19.82
Ago	5.49	5.12	2.17	9.94	18.48
Set	3.71	3.24	1.81	7.99	16.77
Ott	2.51	2.45	1.19	5.80	14.95
Nov	1.51	1.95	0.65	3.96	13.26
Dic	1.16	1.51	0.56	3.10	12.33
anno	1301	1222	572	2727	5992

Genova - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



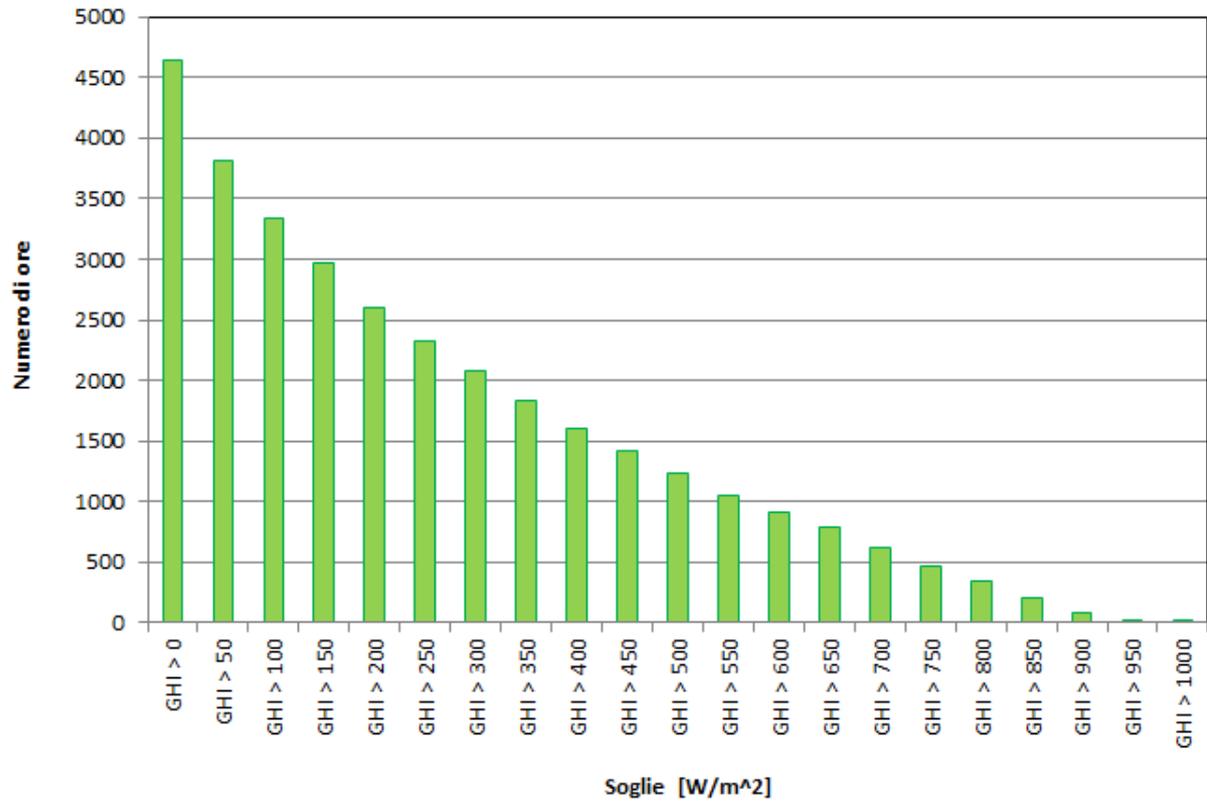
Genova - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



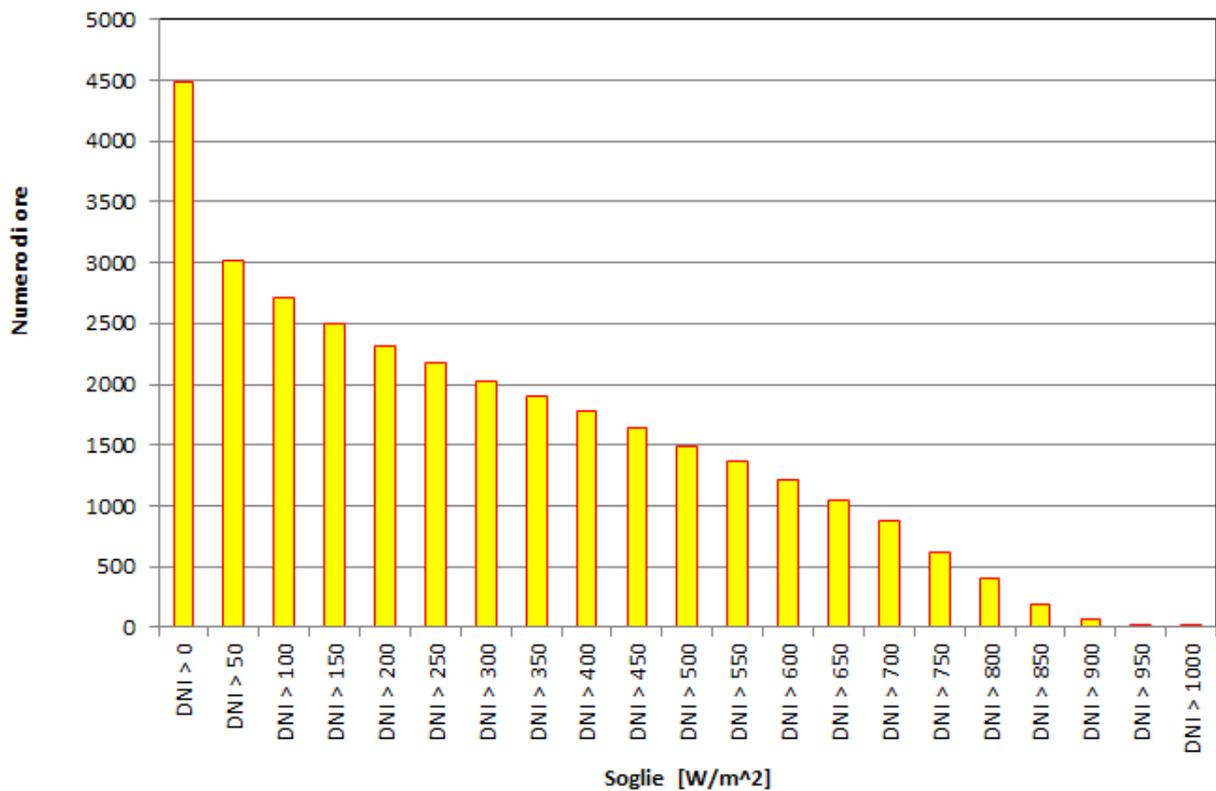


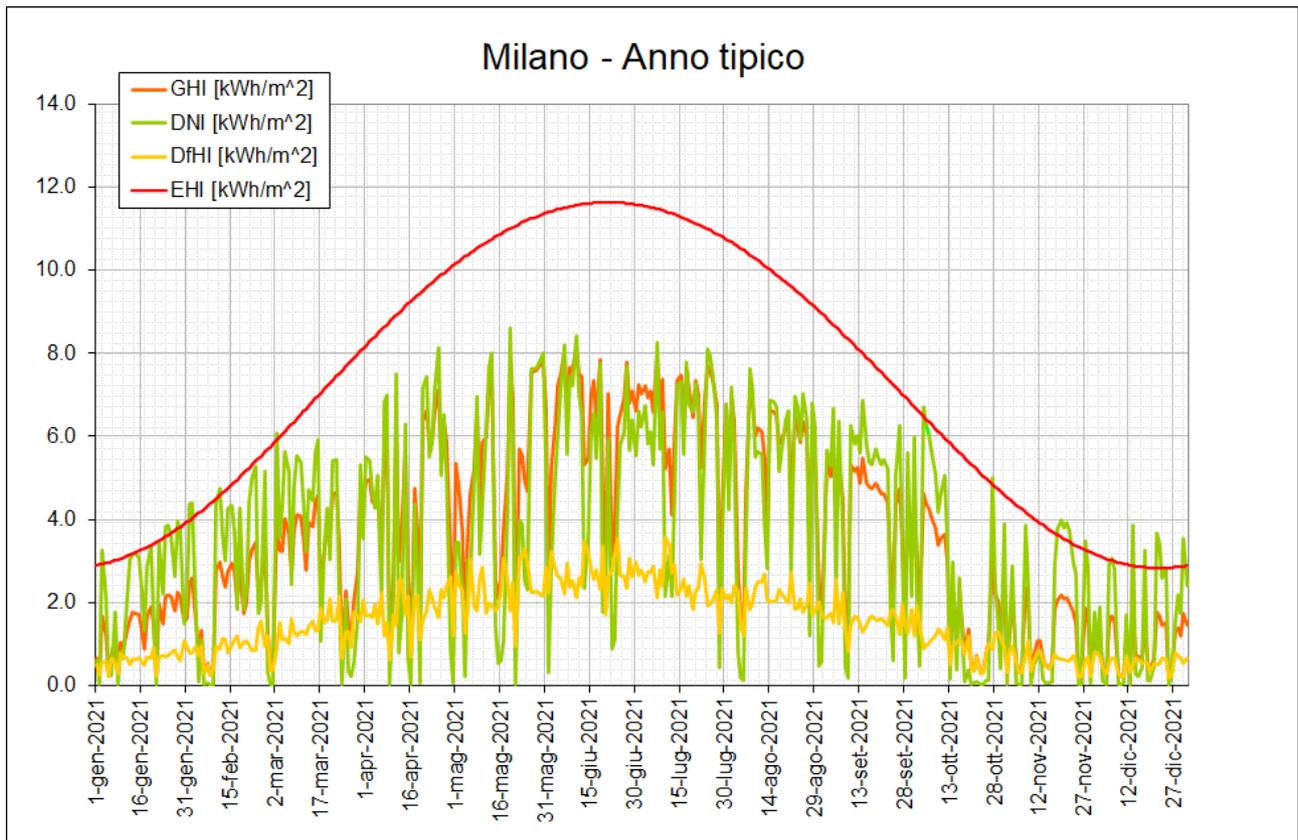
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.69	2.22	0.80	3.85	13.13
Feb	2.65	3.65	0.96	5.33	14.54
Mar	3.78	3.95	1.48	7.40	16.23
Apr	4.49	3.99	1.89	9.46	17.89
Mag	5.91	5.02	2.44	10.95	19.25
Giu	6.82	5.99	2.62	11.59	19.92
Lug	6.88	6.33	2.51	11.28	19.54
Ago	6.29	6.08	2.18	10.06	18.31
Set	4.61	4.62	1.76	8.22	16.74
Ott	2.81	2.71	1.35	6.11	15.06
Nov	1.72	1.82	0.95	4.30	13.51
Dic	1.37	1.63	0.73	3.44	12.66
anno	1493	1461	600	2804	5992

L'Aquila - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



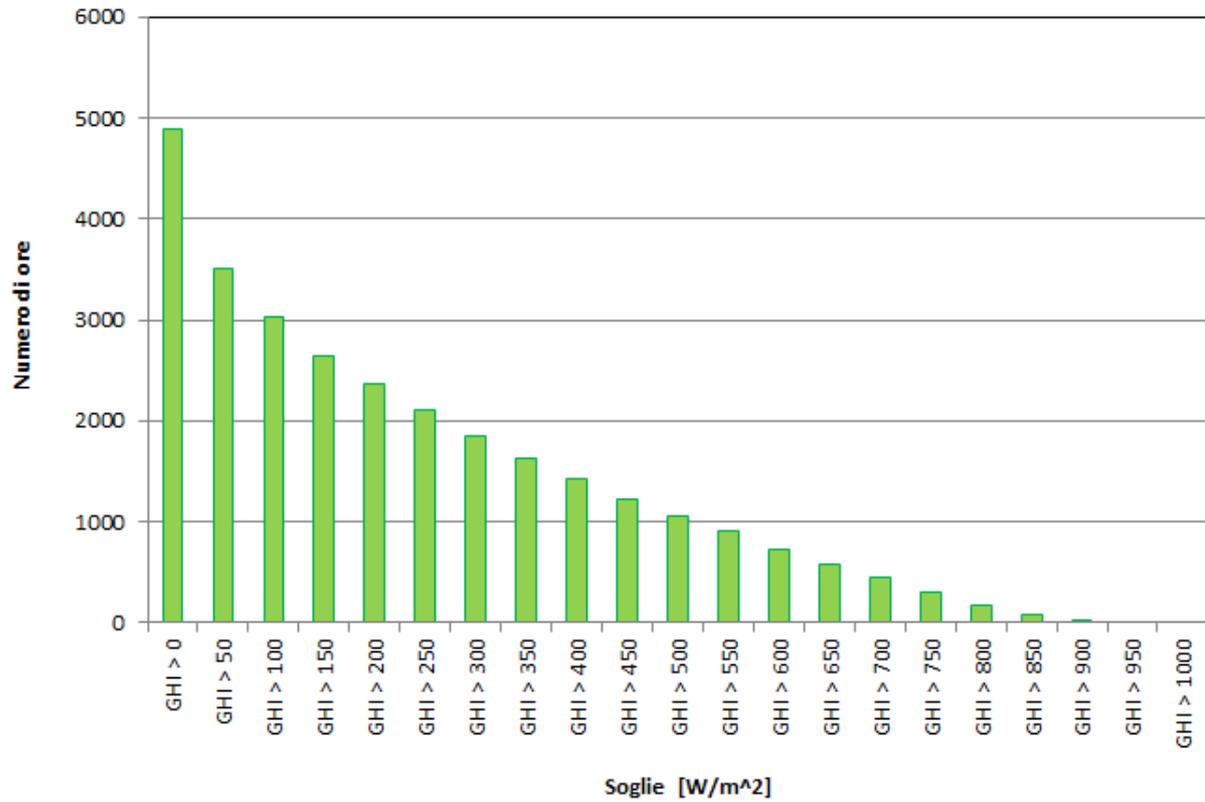
L'Aquila - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



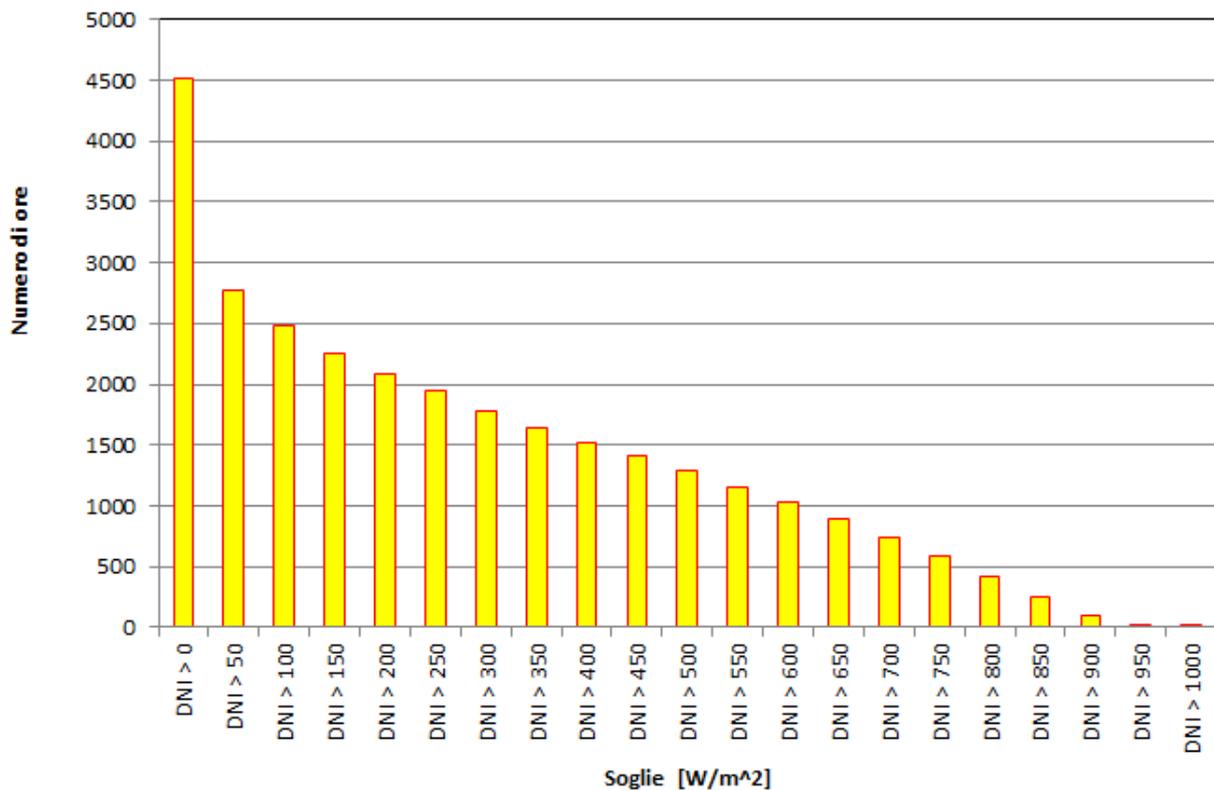


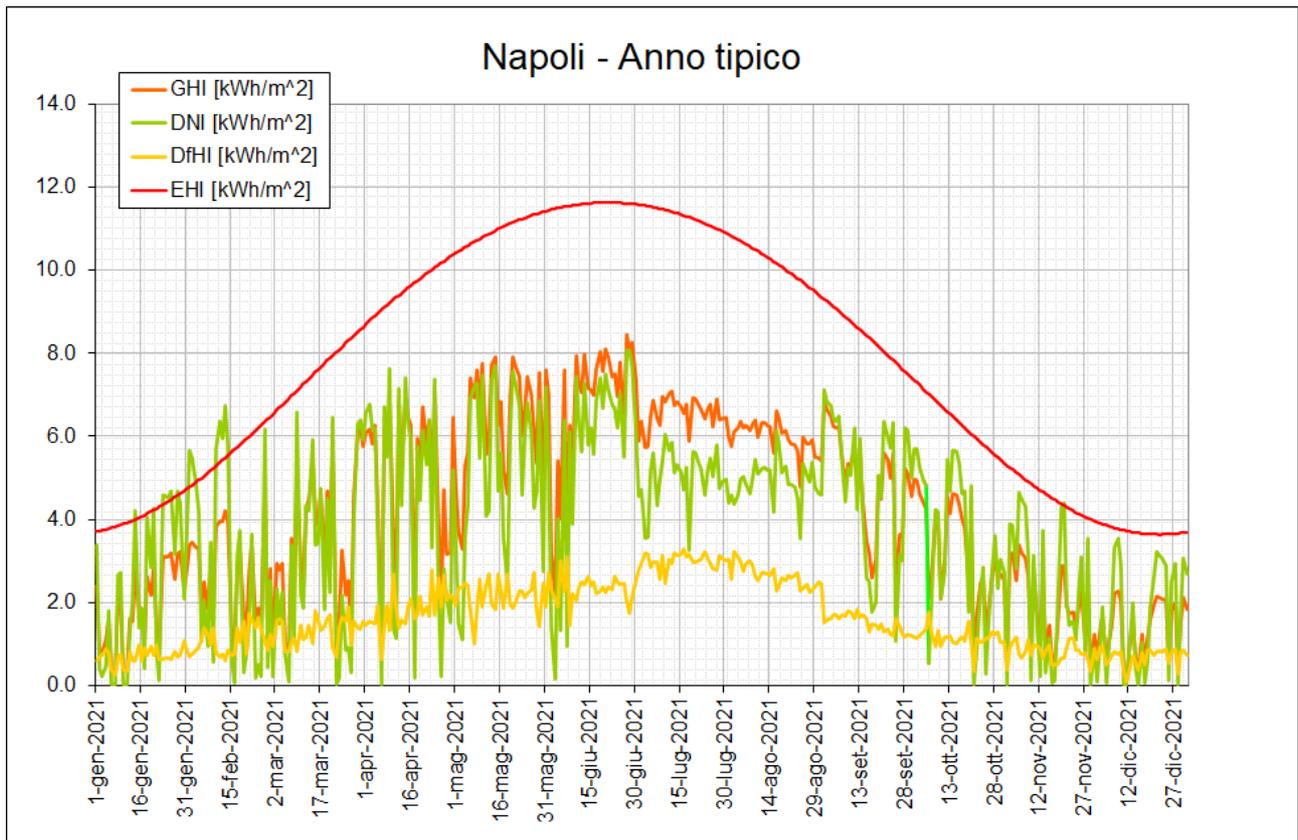
Milano - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.38	2.14	0.62	3.32	12.66
Feb	2.05	2.63	0.89	4.82	14.27
Mar	3.27	3.54	1.39	6.98	16.19
Apr	4.46	4.19	1.81	9.20	18.08
Mag	5.30	4.37	2.31	10.85	19.63
Giu	6.34	5.22	2.71	11.58	20.41
Lug	6.47	5.77	2.45	11.23	19.99
Ago	5.29	4.88	2.07	9.88	18.58
Set	4.20	4.43	1.60	7.87	16.79
Ott	2.22	2.49	0.99	5.63	14.89
Nov	1.19	1.64	0.58	3.78	13.12
Dic	1.00	1.49	0.52	2.91	12.14
anno	1316	1303	547	2684	5992

Milano - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



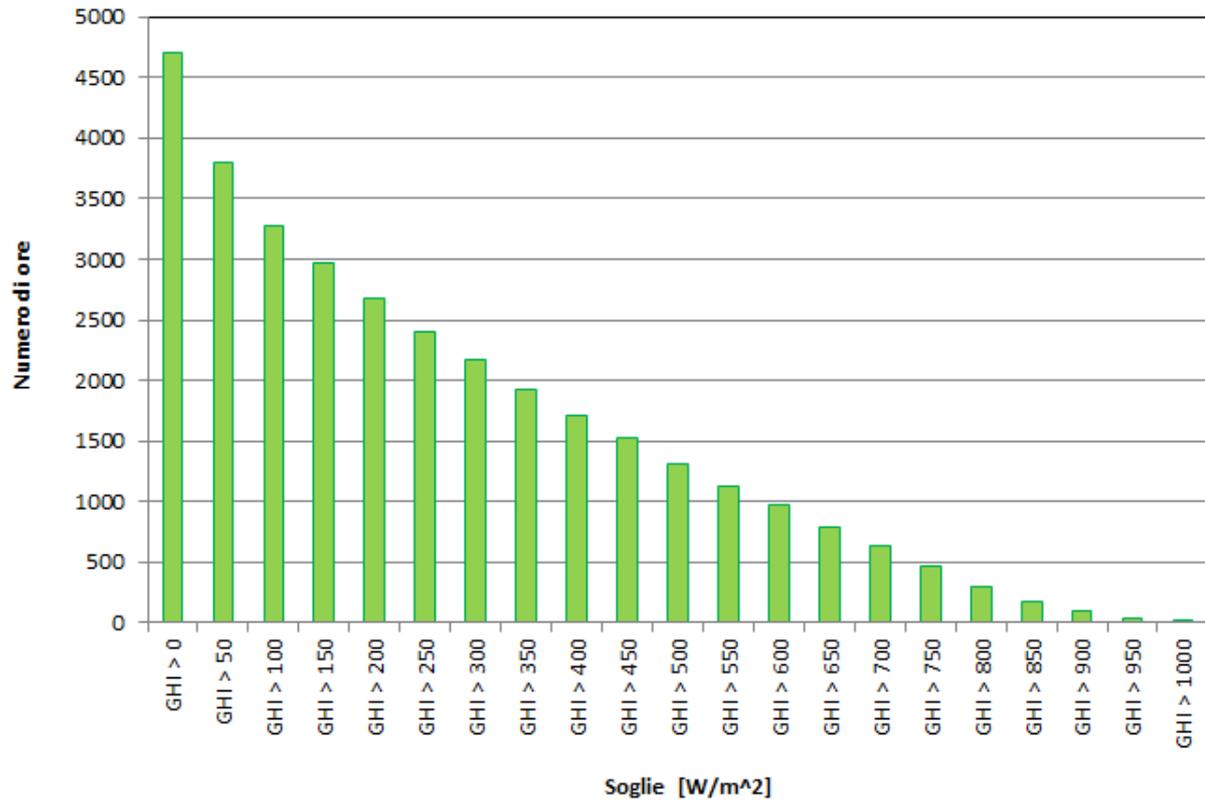
Milano - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



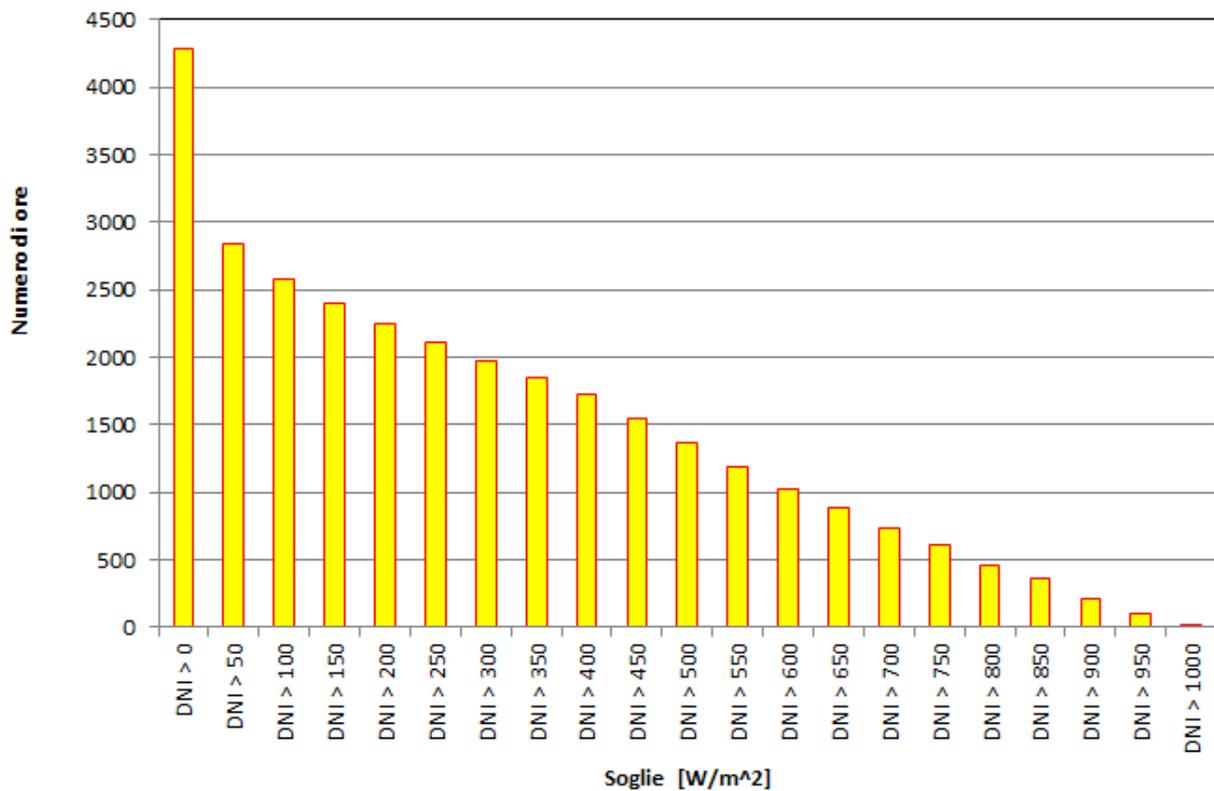


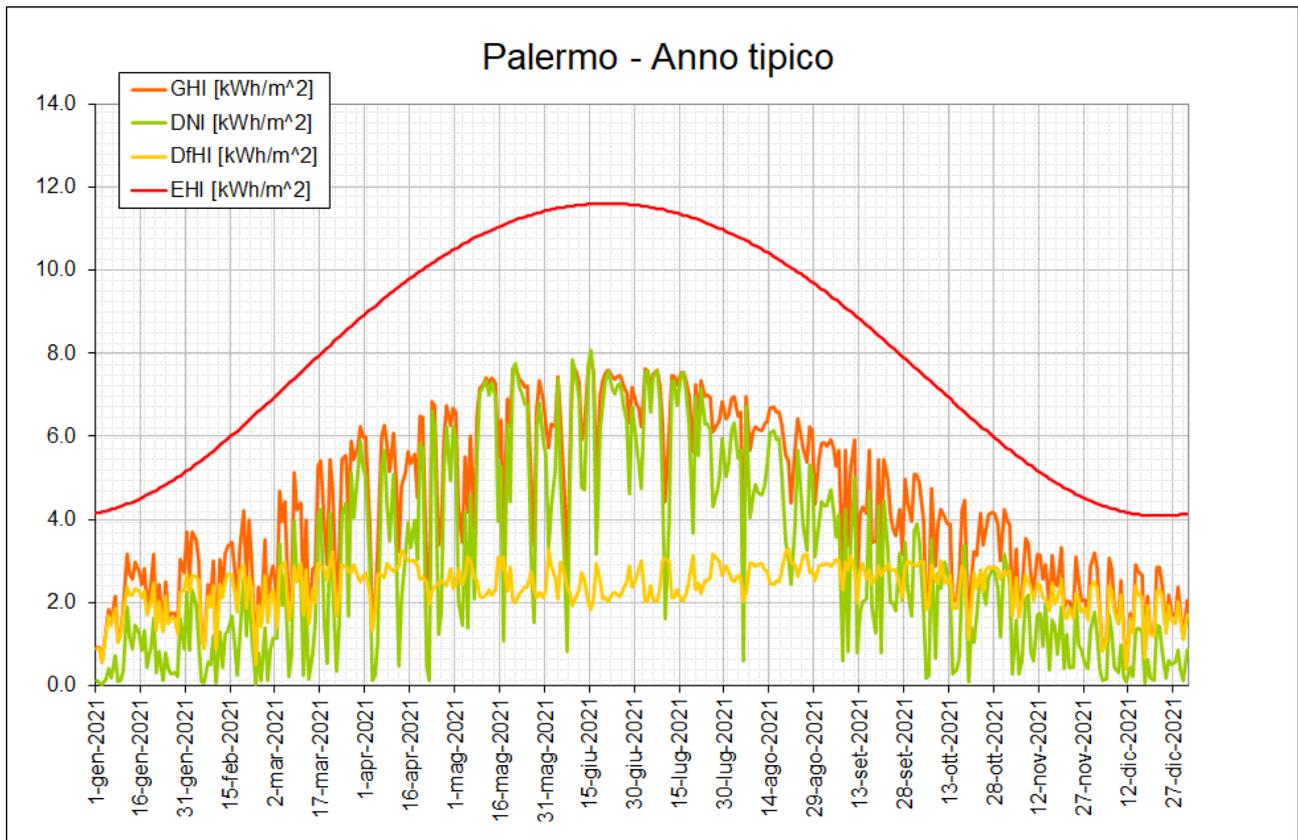
Napoli - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.90	2.30	0.70	4.13	13.35
Feb	2.66	2.95	1.07	5.59	14.67
Mar	3.39	2.92	1.32	7.61	16.25
Apr	5.10	4.53	1.83	9.59	17.80
Mag	6.38	5.31	2.14	10.99	19.06
Giu	6.79	5.72	2.34	11.59	19.68
Lug	6.54	5.01	3.00	11.29	19.33
Ago	5.99	4.94	2.63	10.15	18.18
Set	4.93	4.93	1.50	8.39	16.71
Ott	3.26	3.46	1.15	6.34	15.14
Nov	1.89	2.15	0.80	4.57	13.70
Dic	1.36	1.63	0.68	3.72	12.91
anno	1529	1395	584	2864	5992

Napoli - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



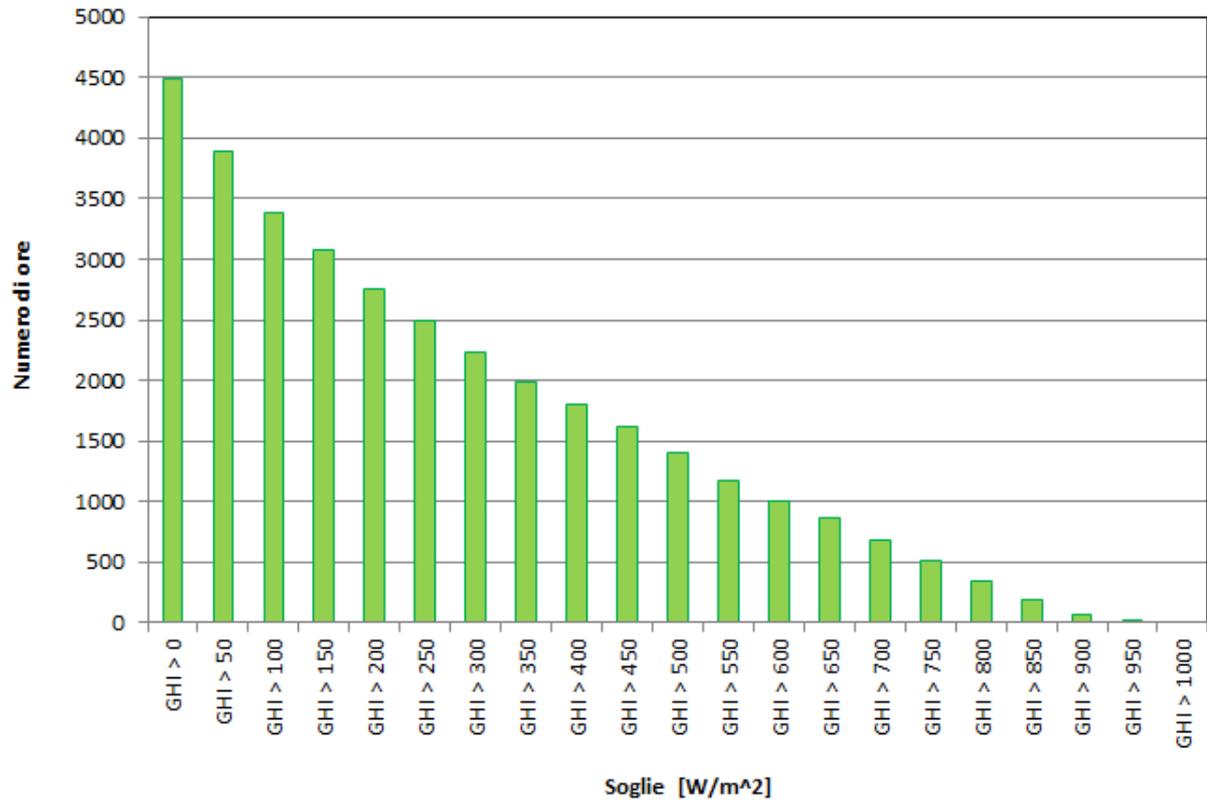
Napoli - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



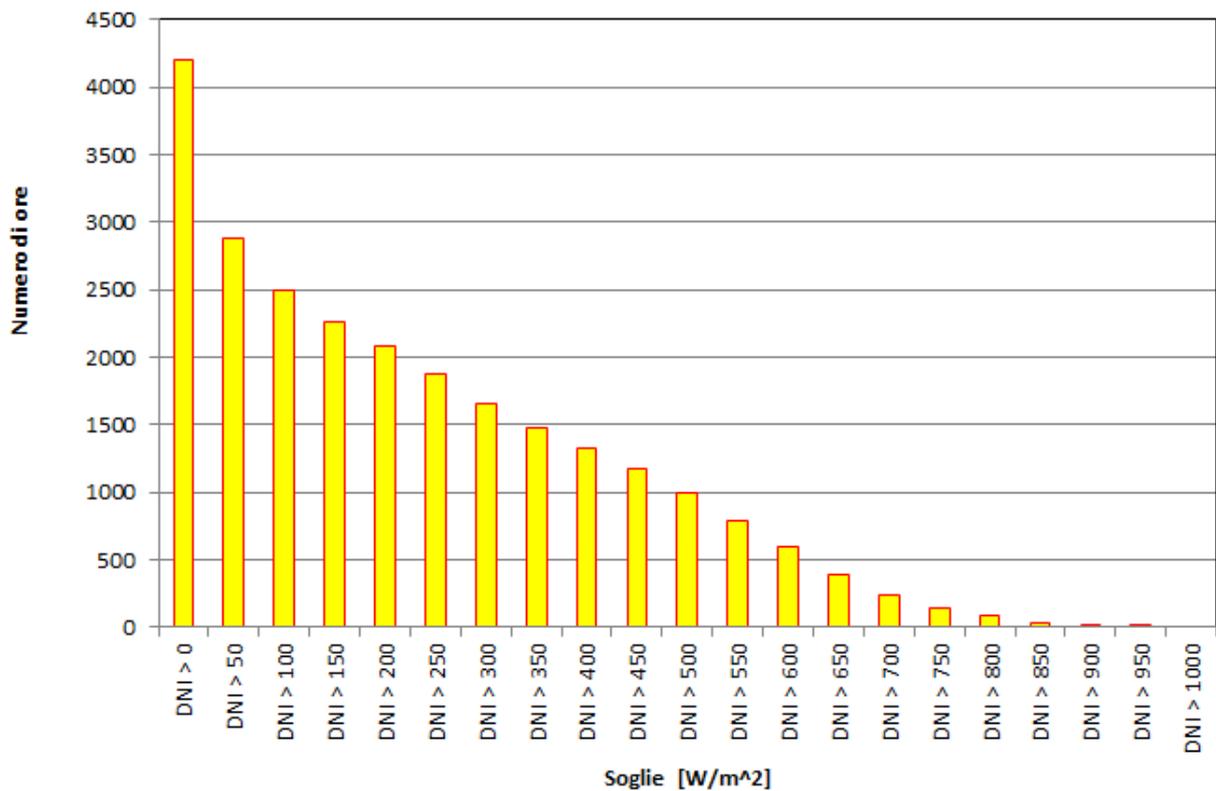


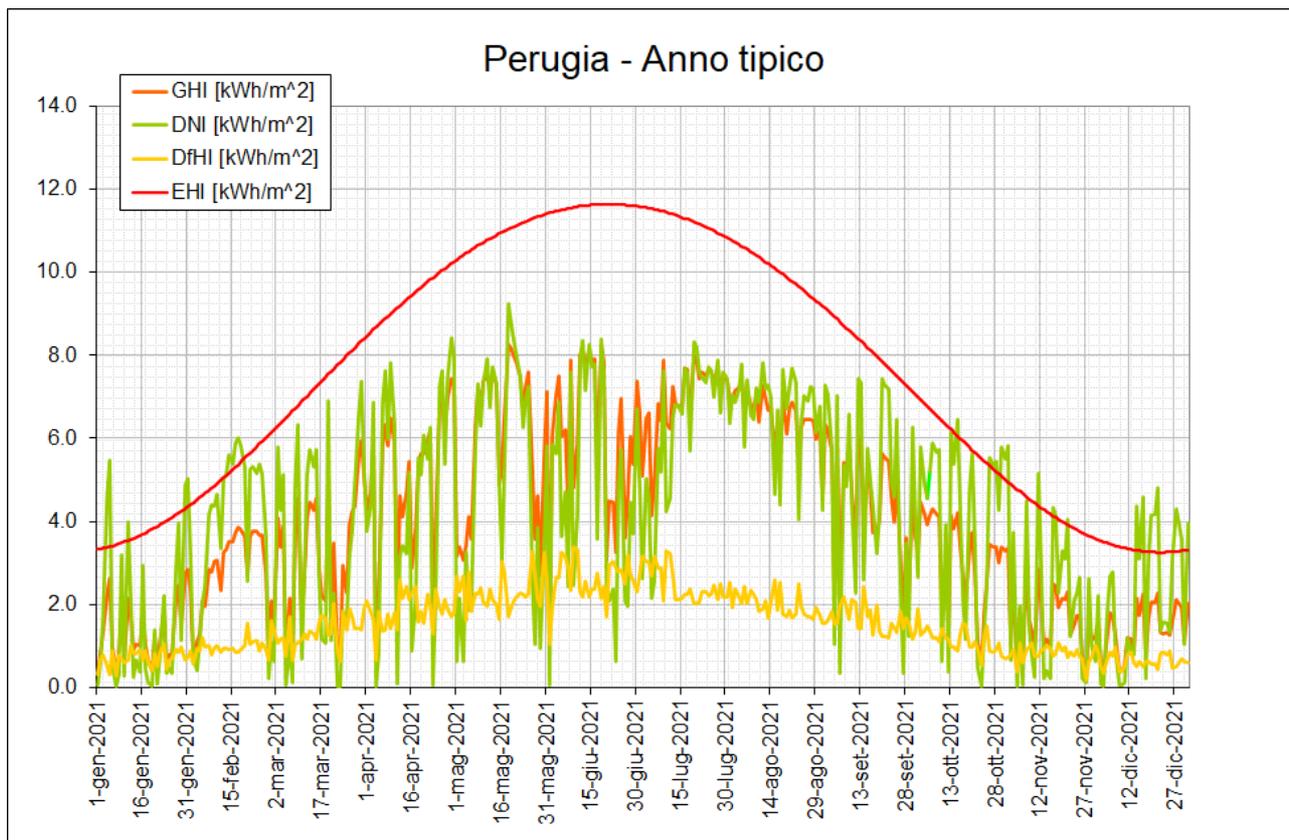
Palermo - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	2.06	0.71	1.76	4.57	13.68
Feb	2.58	0.99	2.09	6.00	14.86
Mar	4.05	2.56	2.50	7.93	16.28
Apr	4.97	3.57	2.59	9.78	17.67
Mag	6.21	5.25	2.45	11.05	18.79
Giu	6.71	5.95	2.40	11.57	19.33
Lug	6.84	6.00	2.53	11.31	19.01
Ago	5.96	4.68	2.75	10.28	17.98
Set	4.53	2.84	2.76	8.65	16.66
Ott	3.58	2.06	2.52	6.72	15.26
Nov	2.63	1.22	2.13	5.01	13.98
Dic	1.91	0.65	1.67	4.17	13.28
anno	1586	1115	856	2957	5992

Palermo - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



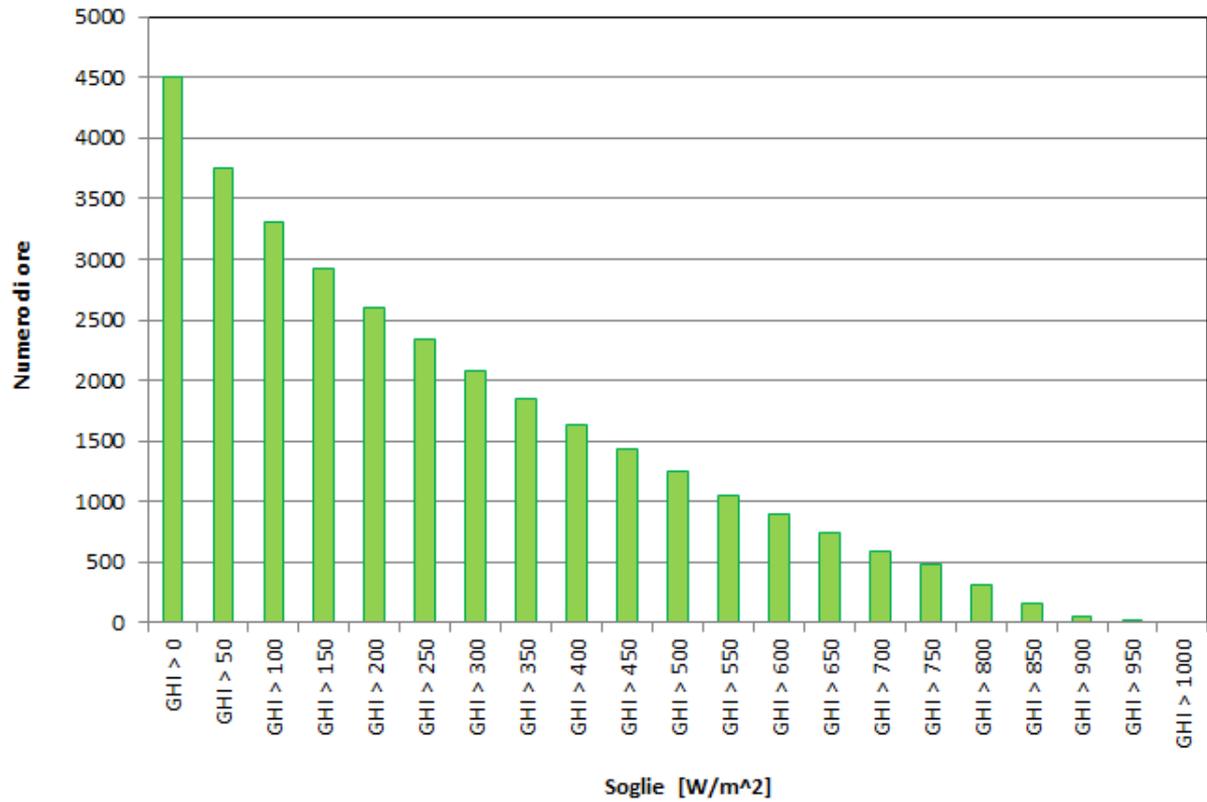
Palermo - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



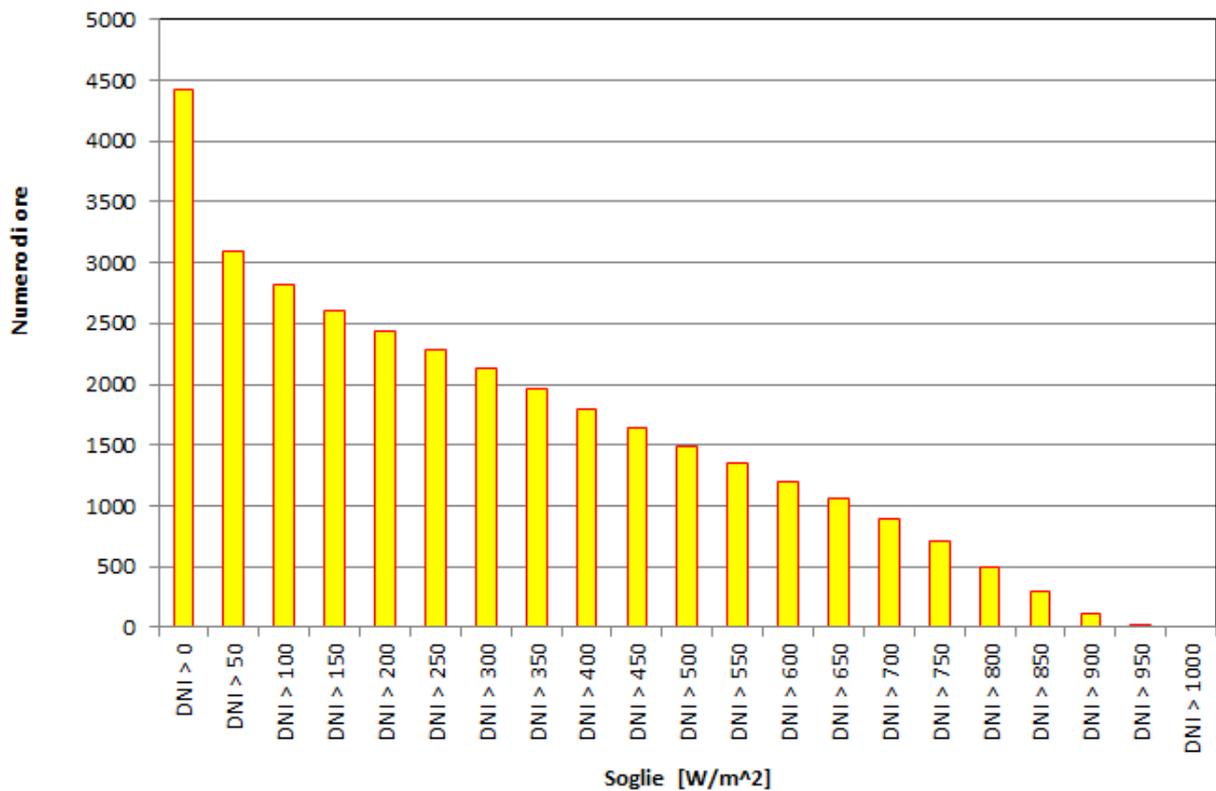


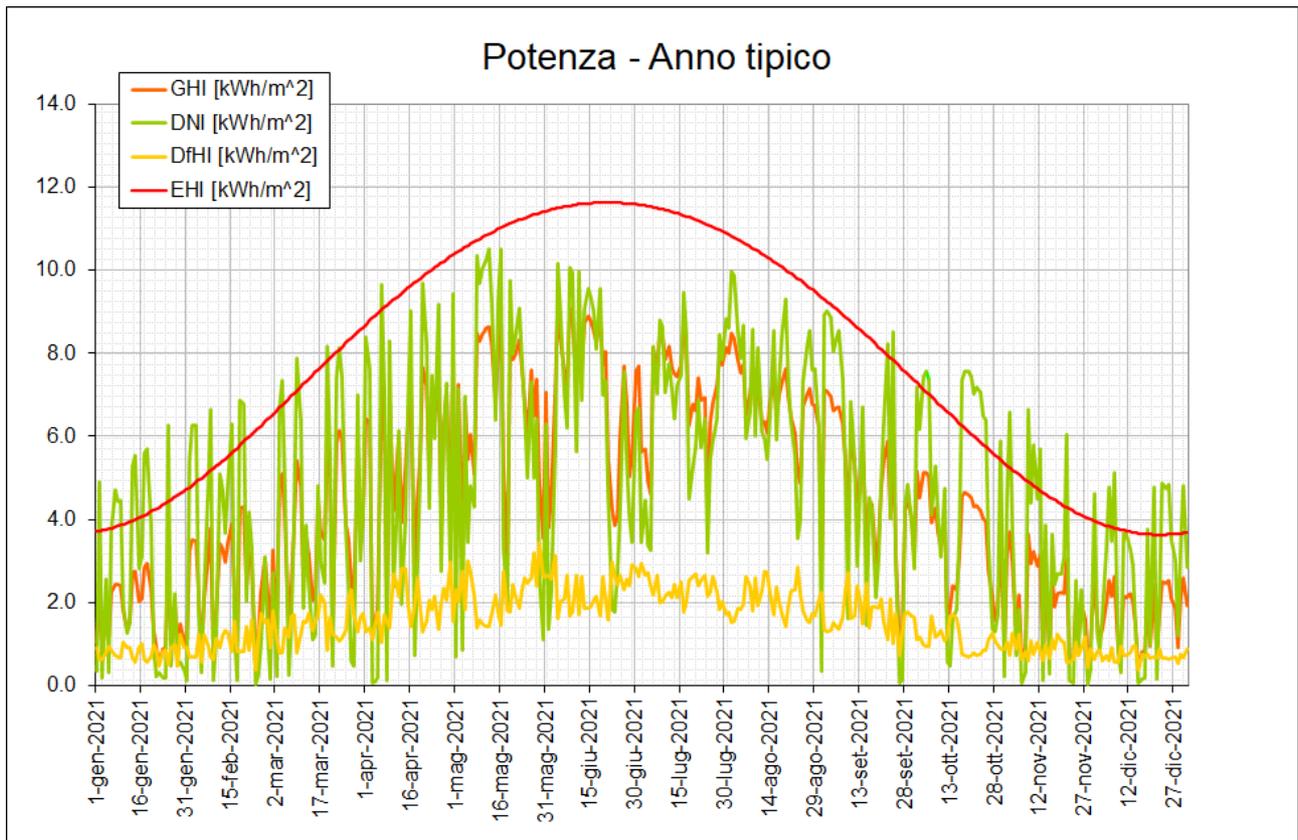
Perugia - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.33	1.64	0.70	3.75	13.04
Feb	2.82	3.89	0.98	5.24	14.49
Mar	3.23	3.34	1.33	7.32	16.23
Apr	5.03	4.77	1.84	9.41	17.93
Mag	5.96	5.17	2.30	10.93	19.32
Giu	6.05	4.90	2.58	11.59	20.01
Lug	6.93	6.26	2.49	11.27	19.62
Ago	6.53	6.67	1.98	10.03	18.36
Set	4.52	4.78	1.63	8.15	16.75
Ott	3.17	4.04	1.15	6.02	15.03
Nov	1.64	2.07	0.81	4.20	13.44
Dic	1.42	2.19	0.63	3.34	12.57
anno	1482	1513	562	2781	5992

Perugia - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



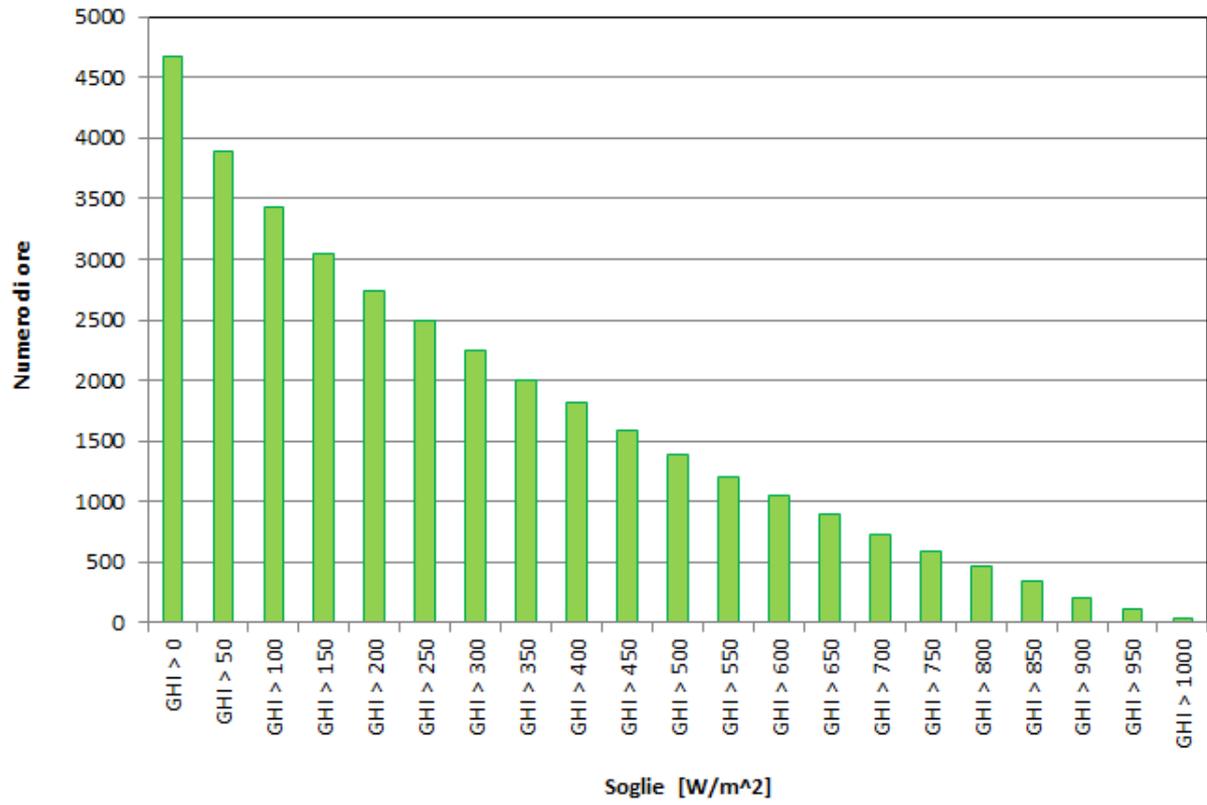
Perugia - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



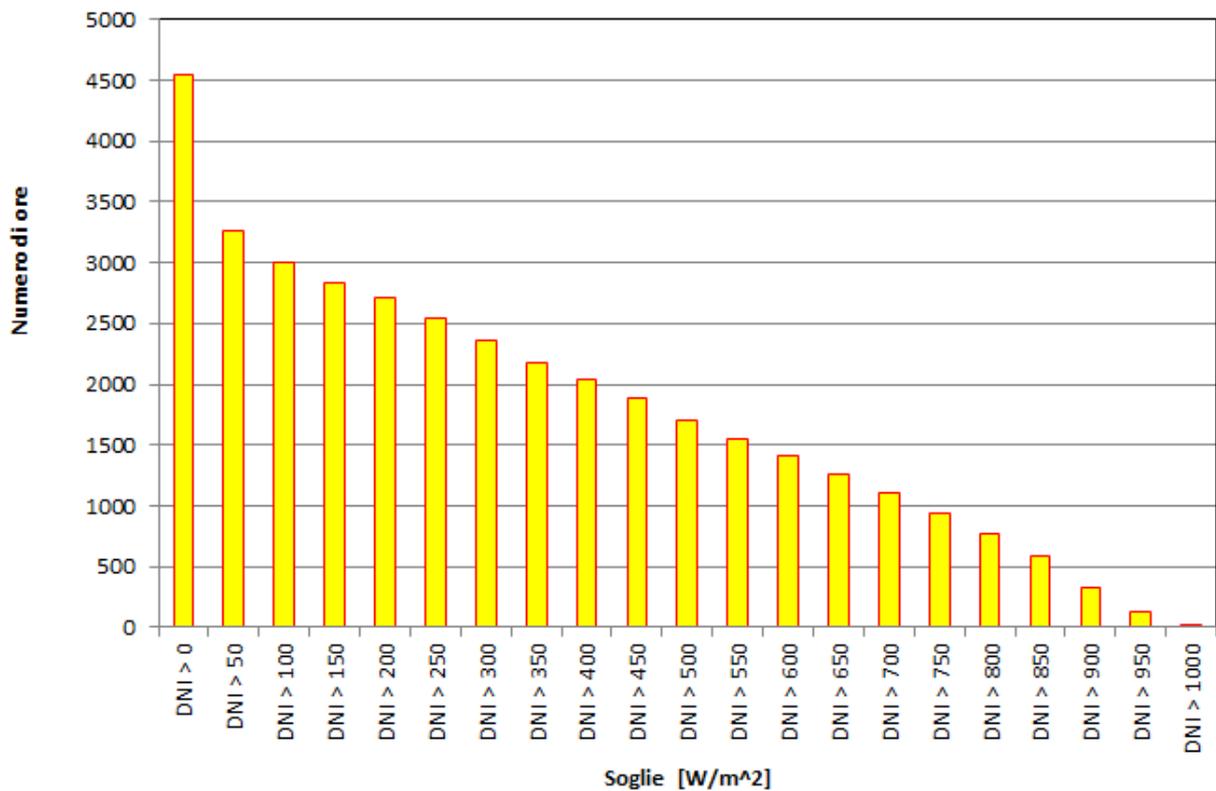


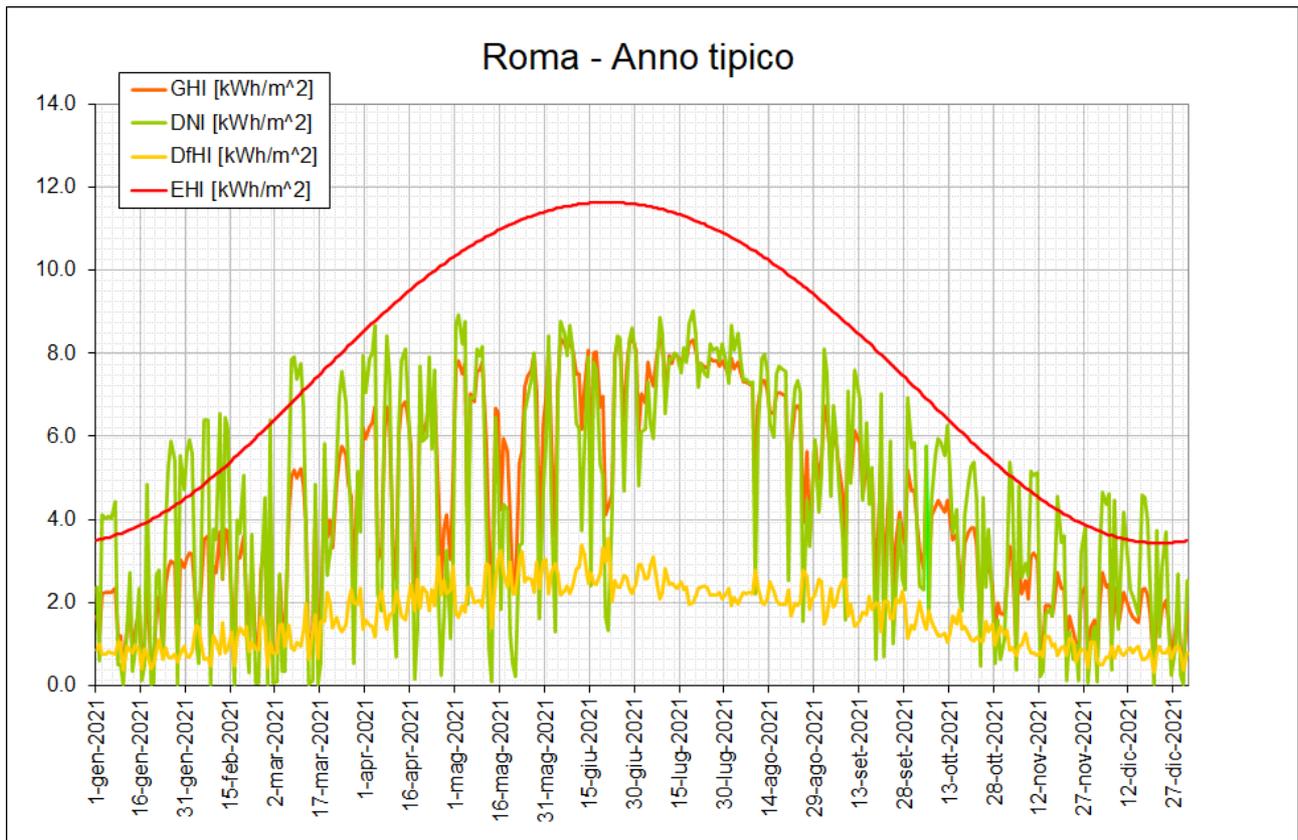
Potenza - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.74	2.41	0.79	4.12	13.35
Feb	2.56	3.21	1.04	5.59	14.67
Mar	3.78	3.91	1.45	7.60	16.25
Apr	5.32	5.24	1.88	9.59	17.80
Mag	6.75	6.56	2.20	10.99	19.07
Giu	7.12	6.51	2.29	11.59	19.69
Lug	7.15	6.58	2.31	11.29	19.33
Ago	6.74	6.97	2.05	10.15	18.18
Set	4.86	5.21	1.68	8.39	16.71
Ott	3.56	4.70	1.09	6.34	15.14
Nov	2.02	2.73	0.86	4.57	13.69
Dic	1.74	2.63	0.72	3.71	12.91
anno	1627	1727	560	2863	5992

Potenza - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



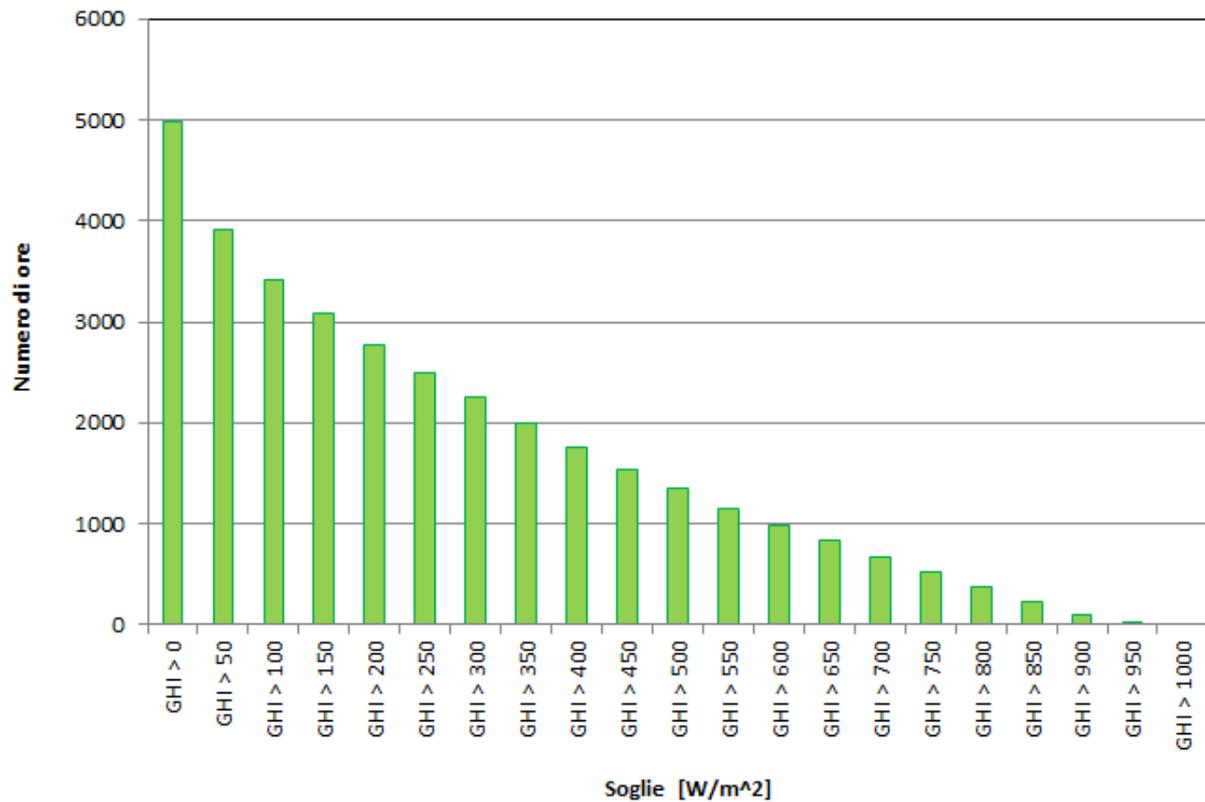
Potenza - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



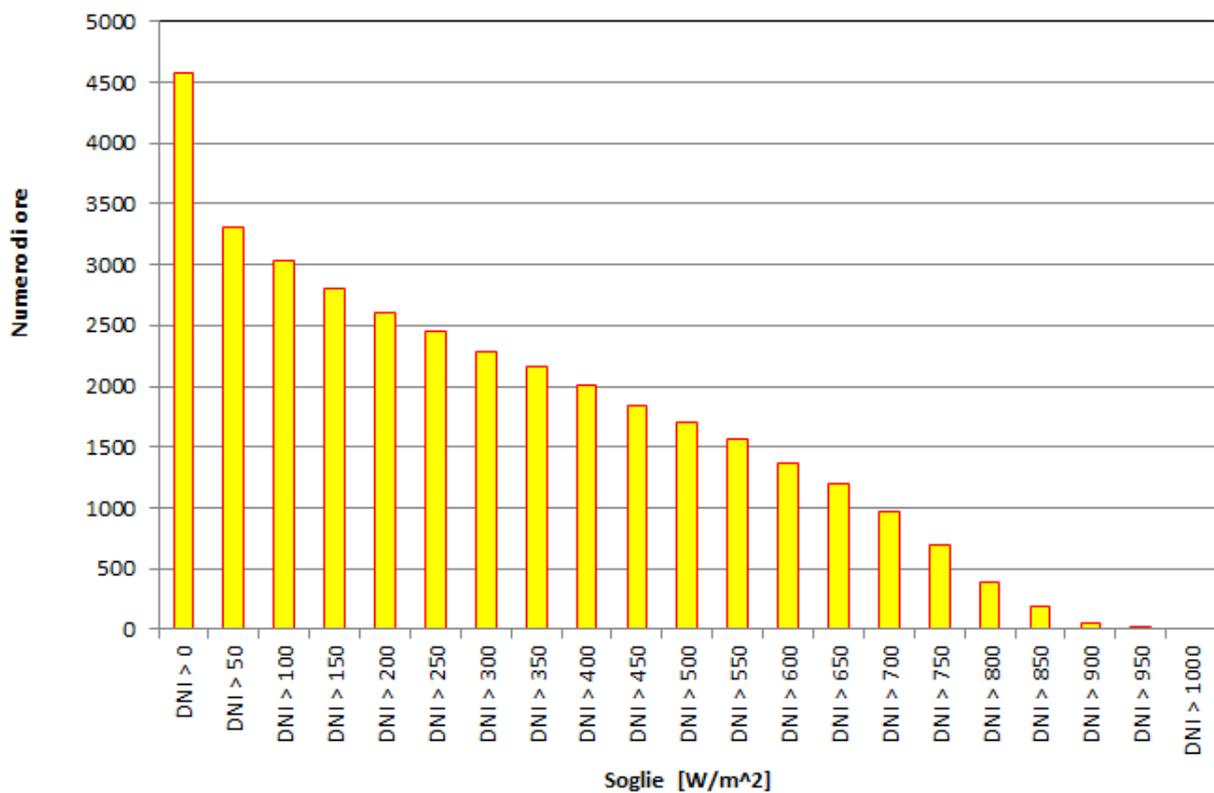


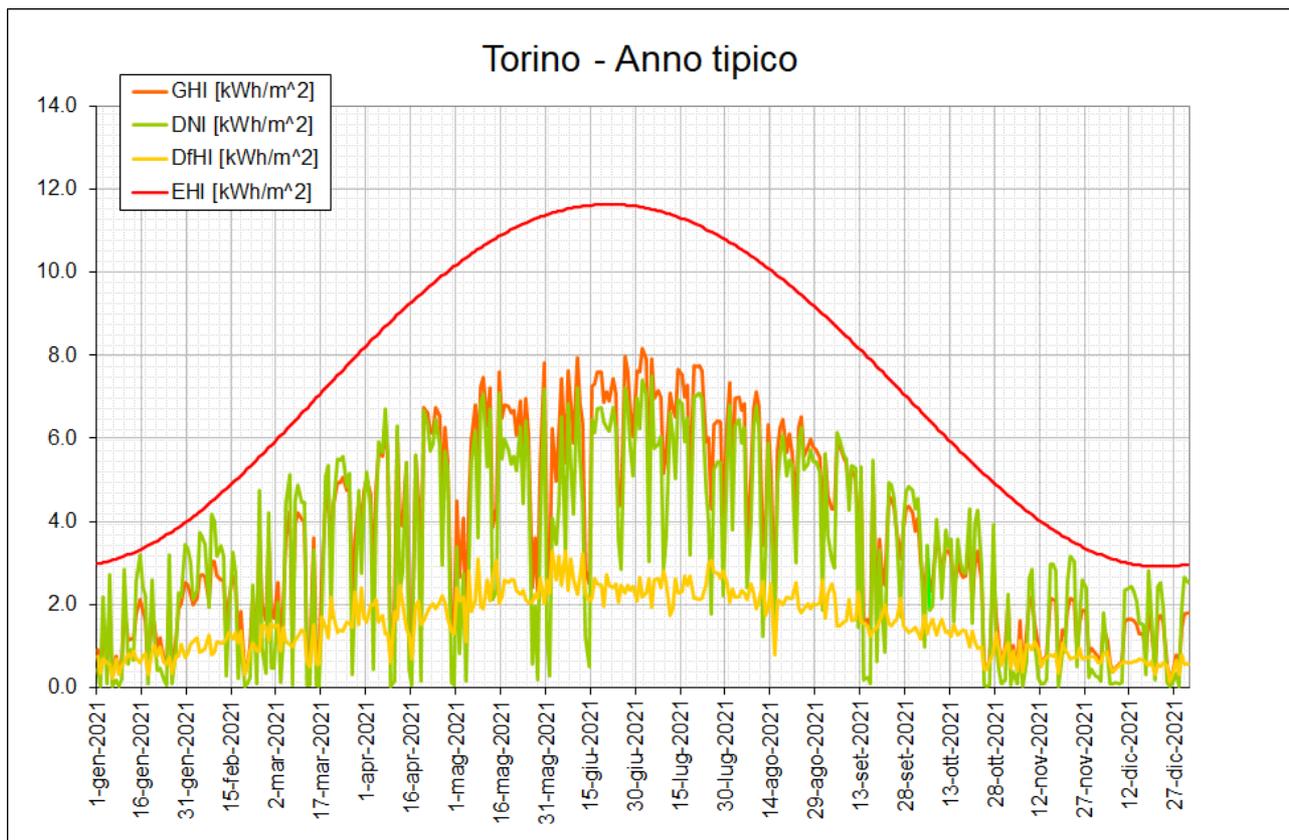
Roma - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.76	2.59	0.78	3.92	13.19
Feb	2.52	3.26	1.01	5.40	14.58
Mar	3.67	3.99	1.44	7.45	16.24
Apr	5.19	4.94	2.02	9.50	17.87
Mag	5.96	5.07	2.44	10.96	19.20
Giu	7.10	6.32	2.61	11.59	19.85
Lug	7.70	7.59	2.39	11.28	19.48
Ago	6.38	6.33	2.18	10.09	18.27
Set	4.75	4.76	1.86	8.26	16.73
Ott	3.27	3.66	1.36	6.17	15.08
Nov	1.98	2.47	0.90	4.38	13.56
Dic	1.68	2.47	0.74	3.51	12.73
anno	1584	1629	601	2820	5992

Roma - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



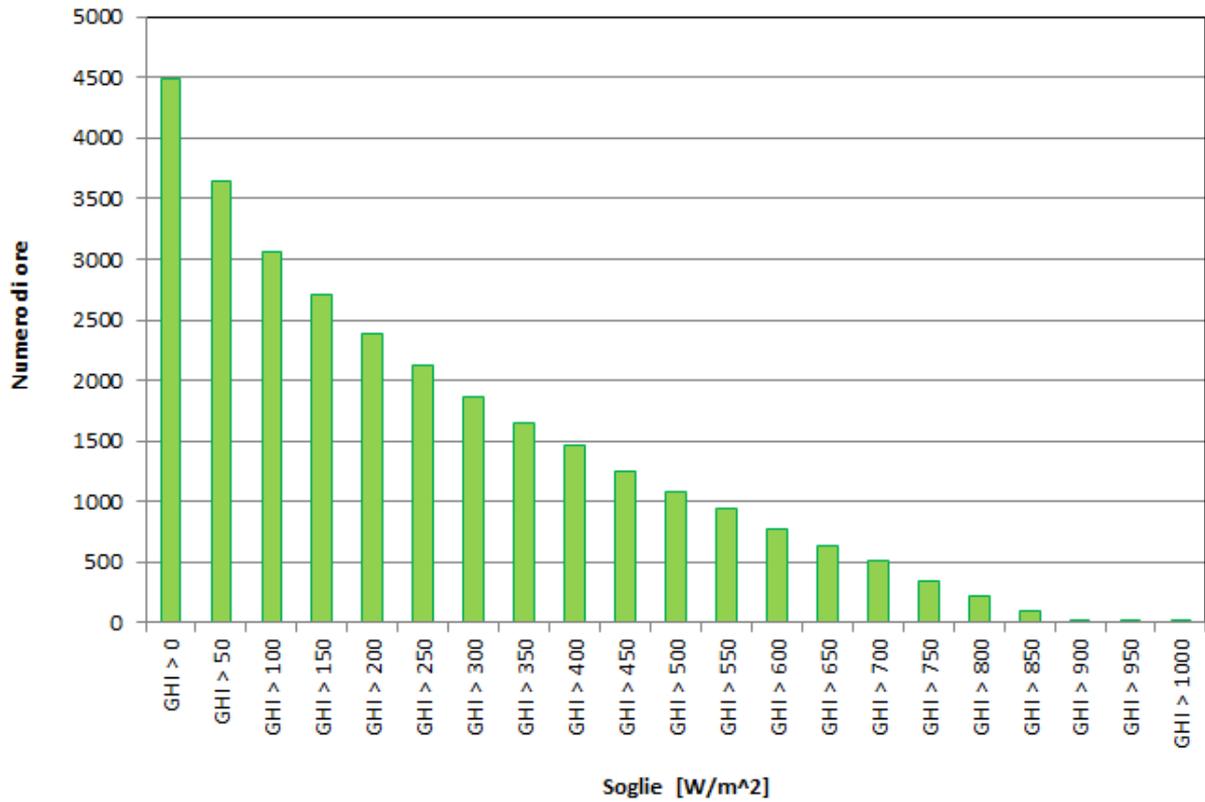
Roma - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



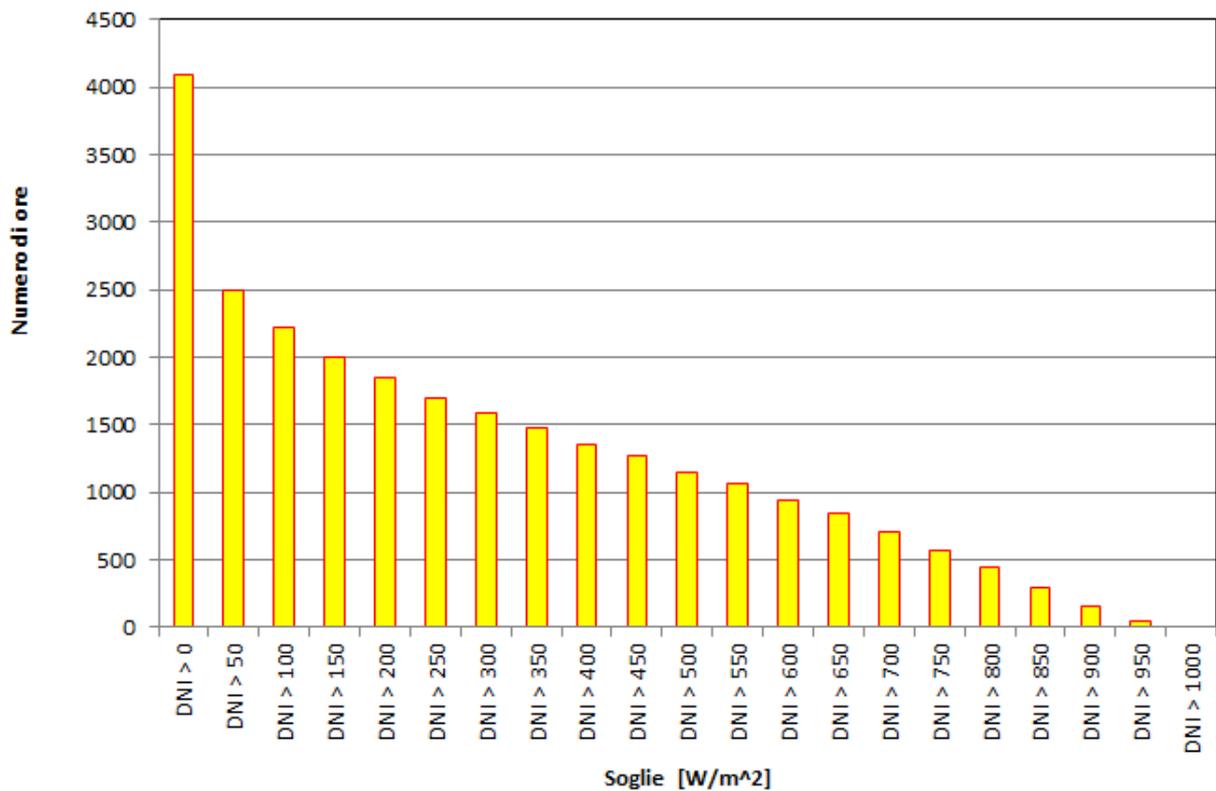


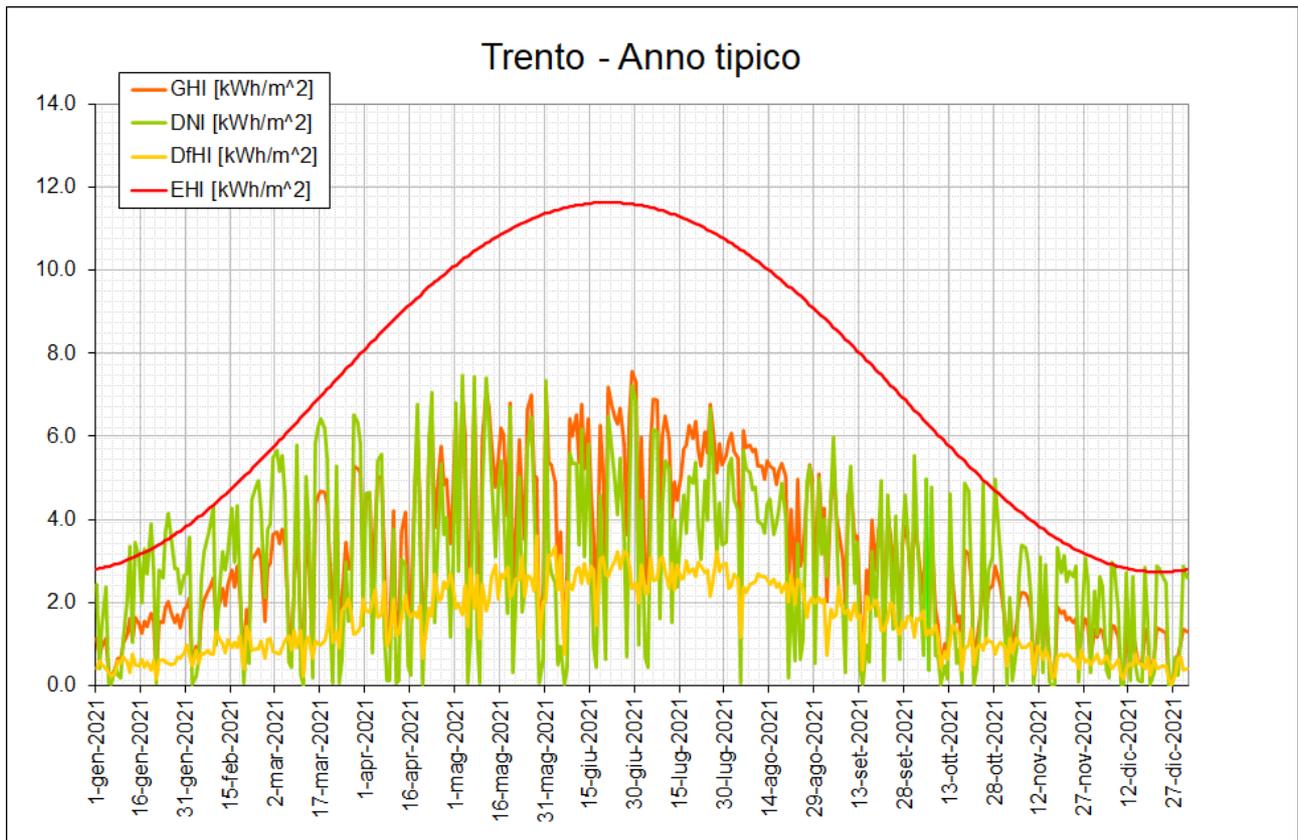
Torino - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.27	1.34	0.67	3.40	12.74
Feb	2.14	2.18	1.06	4.91	14.32
Mar	3.25	3.04	1.35	7.05	16.20
Apr	4.45	3.87	1.70	9.25	18.05
Mag	5.45	4.32	2.29	10.87	19.57
Giu	6.31	5.10	2.52	11.59	20.33
Lug	6.68	5.54	2.45	11.24	19.91
Ago	5.59	4.93	2.10	9.91	18.53
Set	4.07	3.69	1.68	7.93	16.78
Ott	2.49	2.49	1.18	5.71	14.92
Nov	1.34	1.30	0.78	3.86	13.18
Dic	1.08	1.22	0.56	3.00	12.23
anno	1345	1189	558	2704	5992

Torino - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



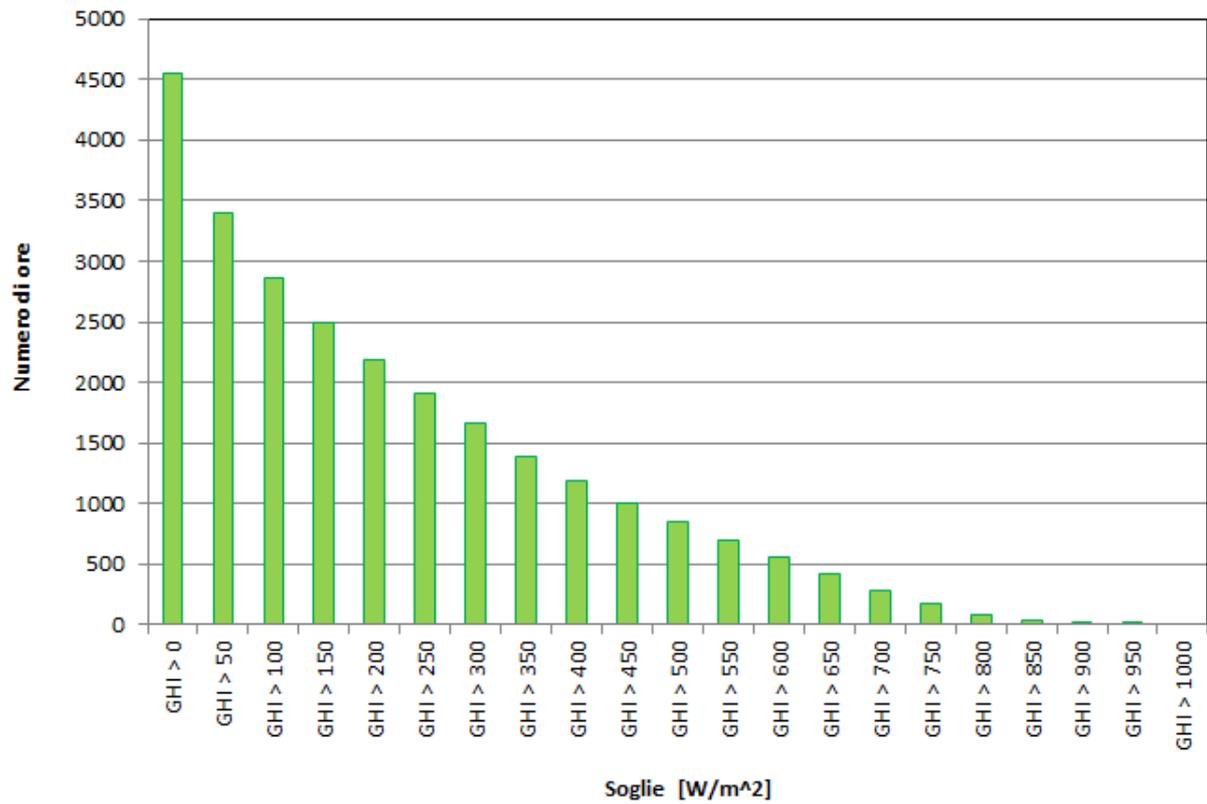
Torino - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



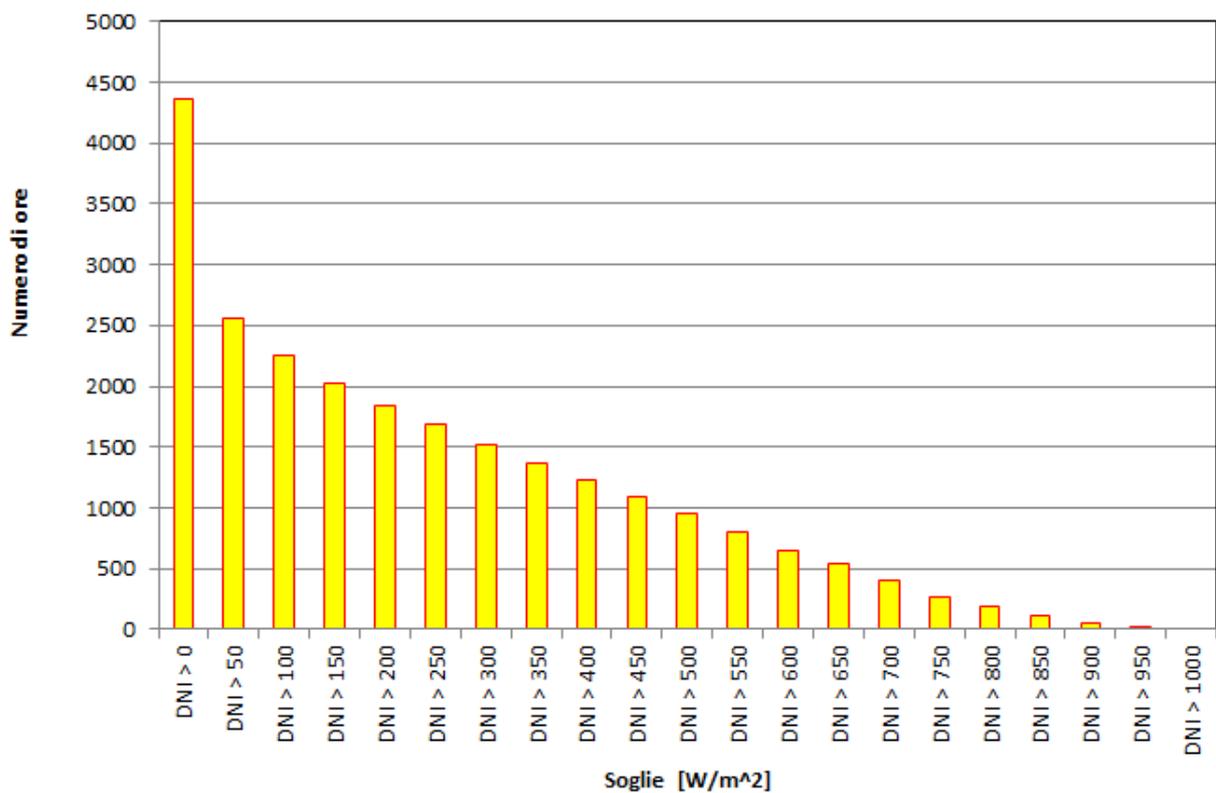


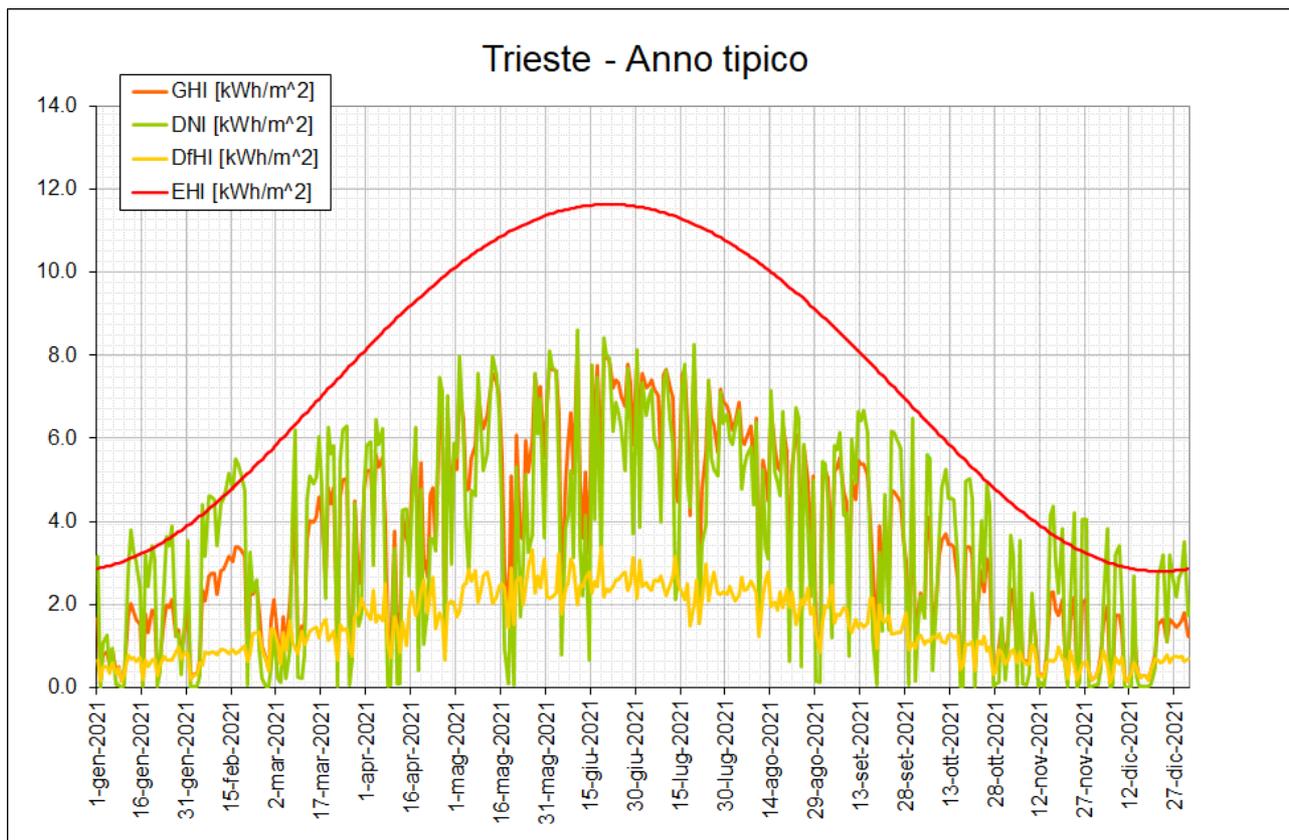
Trento - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.26	2.14	0.53	3.22	12.58
Feb	2.12	2.81	0.91	4.73	14.22
Mar	3.16	3.52	1.21	6.90	16.18
Apr	3.76	2.98	1.84	9.15	18.11
Mag	4.93	3.85	2.29	10.83	19.71
Giu	5.23	3.56	2.70	11.58	20.51
Lug	5.42	3.95	2.69	11.22	20.07
Ago	4.68	3.64	2.31	9.84	18.63
Set	3.24	2.79	1.66	7.80	16.81
Ott	2.18	2.34	1.07	5.55	14.86
Nov	1.36	1.81	0.71	3.68	13.04
Dic	0.92	1.41	0.47	2.82	12.04
anno	1166	1059	560	2662	5992

Trento - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



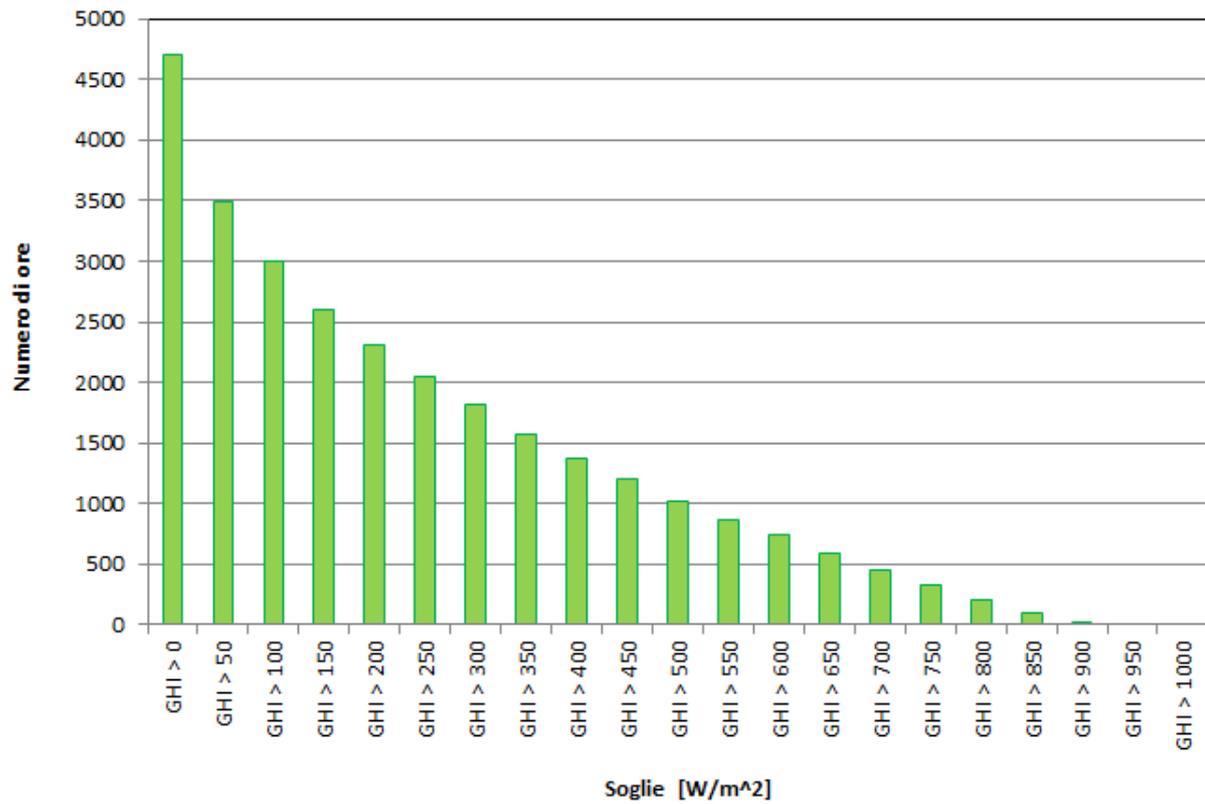
Trento - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



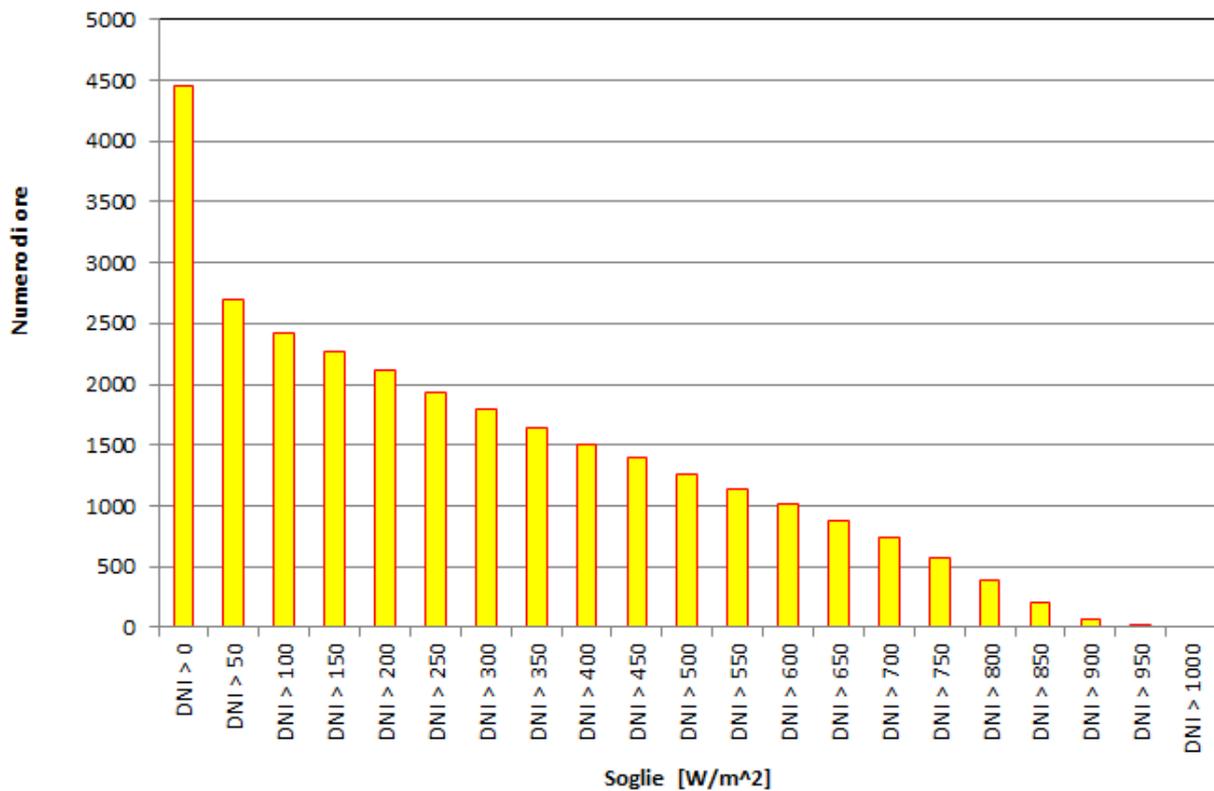


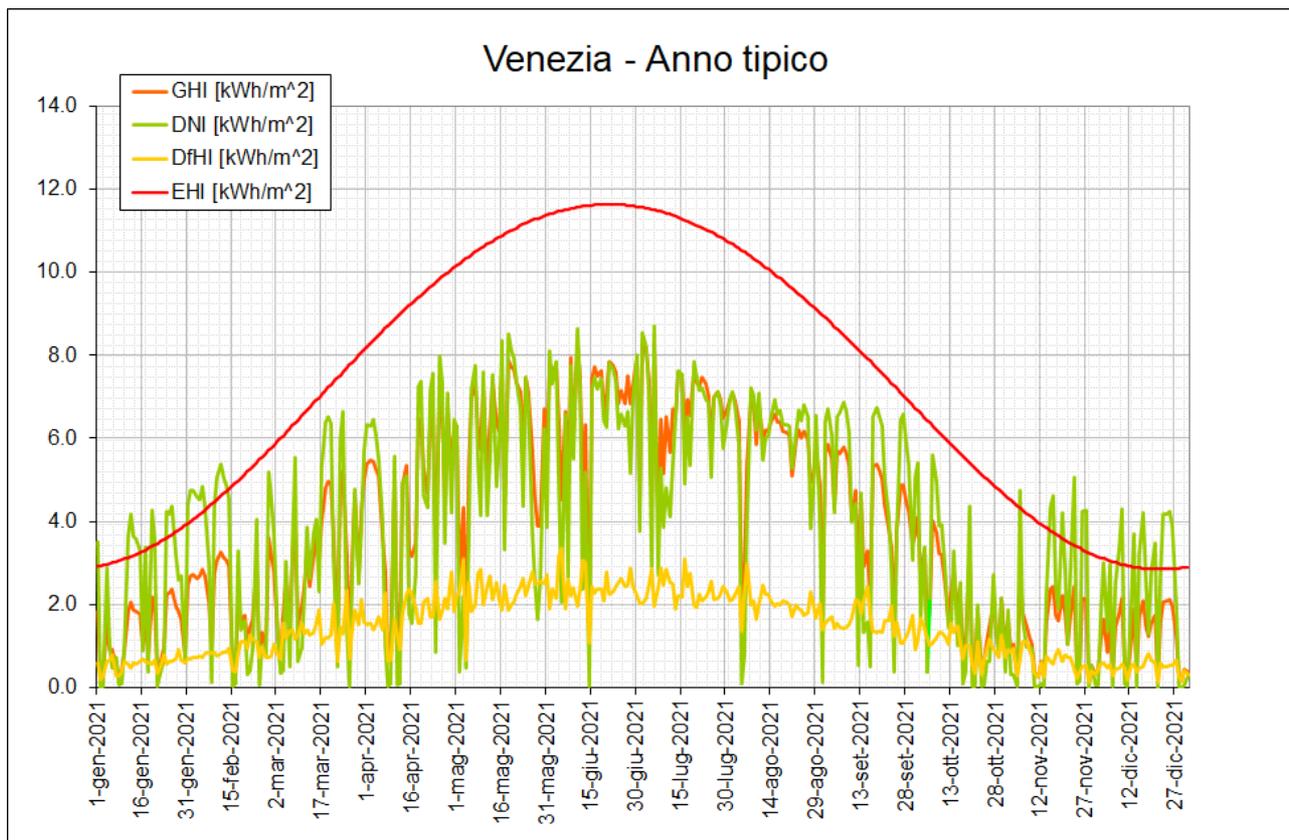
Trieste - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.20	1.82	0.58	3.29	12.64
Feb	2.06	2.84	0.82	4.79	14.26
Mar	2.99	3.13	1.28	6.96	16.19
Apr	4.05	3.71	1.75	9.18	18.09
Mag	5.70	4.85	2.41	10.85	19.66
Giu	6.50	5.61	2.52	11.58	20.44
Lug	6.44	5.68	2.40	11.23	20.01
Ago	5.02	4.50	2.06	9.86	18.60
Set	4.09	4.23	1.61	7.85	16.80
Ott	2.26	2.71	0.98	5.61	14.88
Nov	1.21	1.64	0.58	3.75	13.09
Dic	1.02	1.53	0.52	2.88	12.11
anno	1297	1286	534	2677	5992

Trieste - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



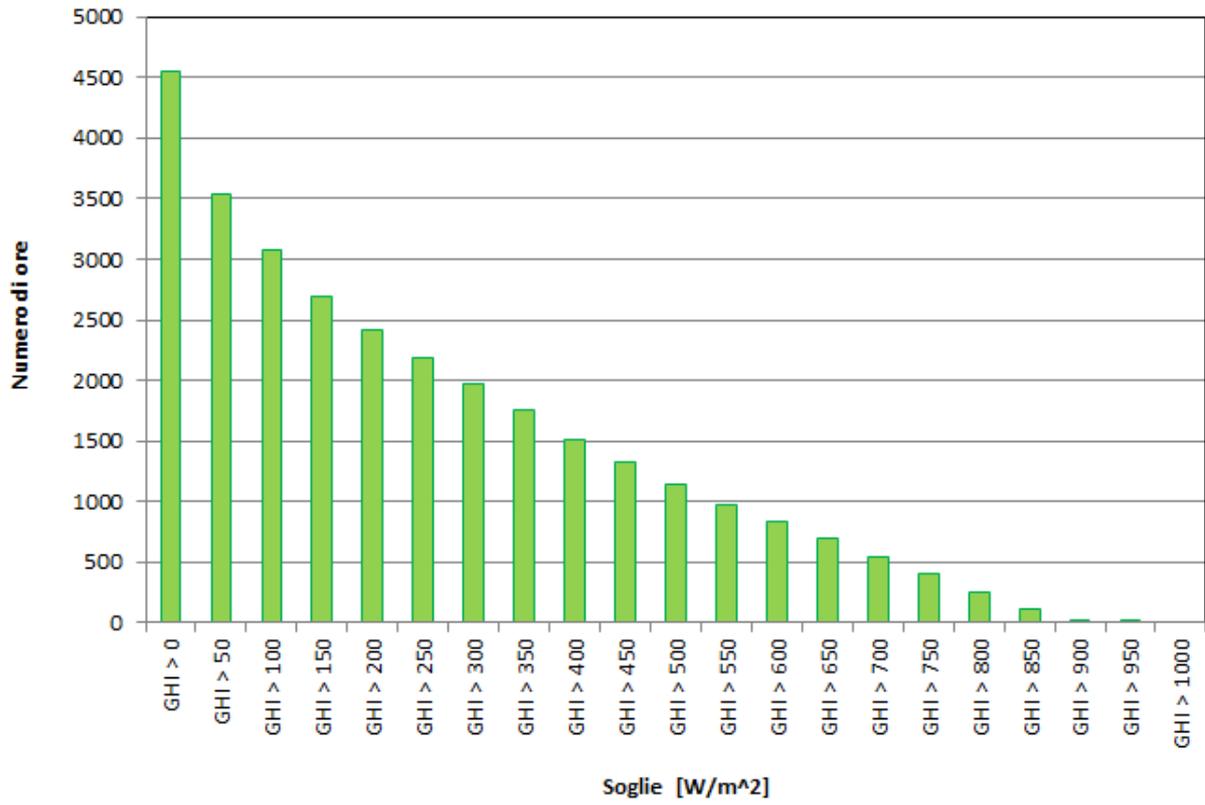
Trieste - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



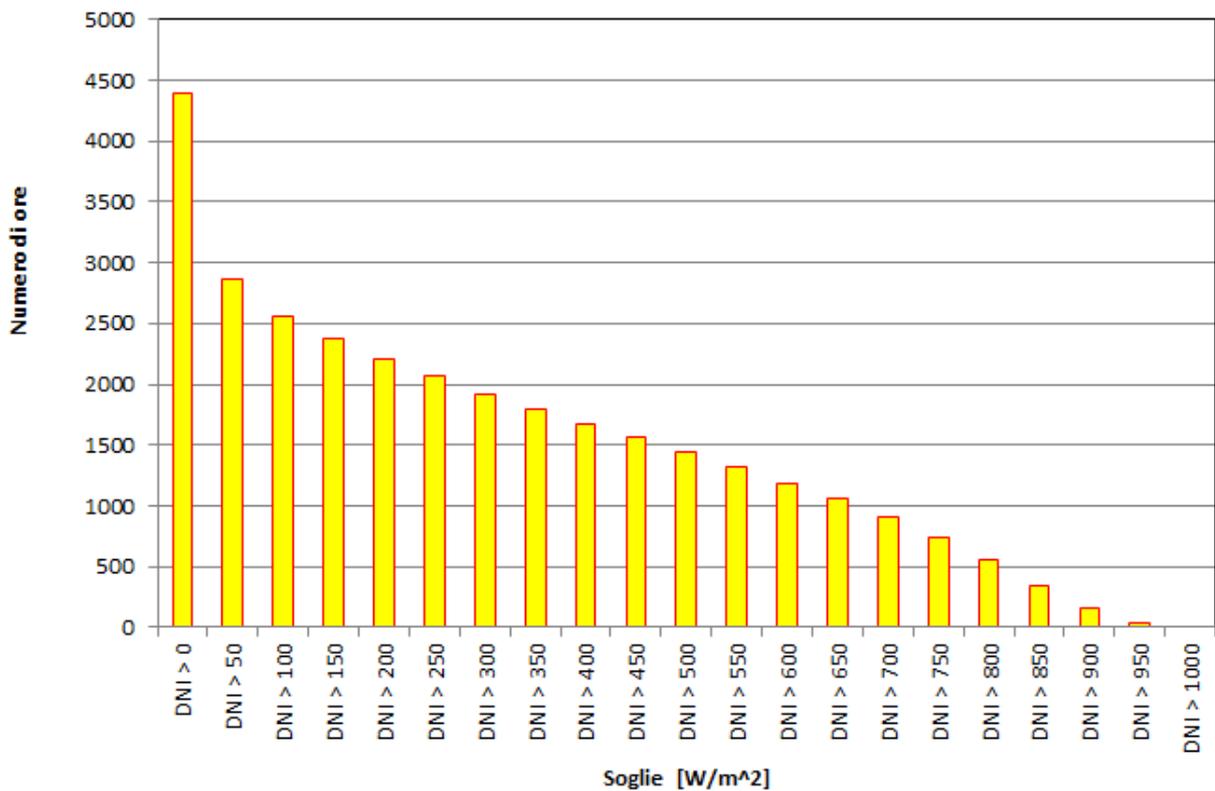


Venezia - Radiazione giornaliera media mensile					
Mese	GHI [kWh/m ²]	DNI [kWh/m ²]	DfHI [kWh/m ²]	EHI [kWh/m ²]	ENI [kWh/m ²]
Gen	1.35	2.18	0.57	3.34	12.68
Feb	2.17	3.00	0.83	4.84	14.28
Mar	3.10	3.23	1.36	7.00	16.19
Apr	4.58	4.44	1.75	9.21	18.07
Mag	5.94	5.24	2.32	10.86	19.62
Giu	6.83	6.23	2.41	11.58	20.39
Lug	6.70	6.21	2.33	11.23	19.97
Ago	5.70	5.56	2.02	9.88	18.57
Set	4.44	4.76	1.58	7.88	16.79
Ott	2.03	2.07	1.03	5.65	14.90
Nov	1.28	1.76	0.61	3.80	13.13
Dic	1.21	2.07	0.47	2.93	12.16
anno	1382	1423	527	2689	5992

Venezia - Tabella: Numero di ore GHI sopra soglie



Venezia - Tabella: Numero di ore DNI sopra soglie



7 Conclusioni

La linea LA1.24 del WP.1 del Progetto 1.5 è stata finalizzata all'elaborazione di grandezze climatiche a scala sub-oraria, che possono essere utilizzate per sistemi di calcolo più raffinati, sia nelle valutazioni del fabbisogno energetico degli edifici (metodi dinamici), sia in presenza di impianti da fonti energetiche rinnovabili (pompe di calore, pannelli solari termici, moduli fotovoltaici, ecc.), il cui rendimento dipende fortemente dalle variazioni climatiche del sito in oggetto.

L'attività di questa annualità ha riguardato l'applicazione di modelli matematici per il *downscaling* temporale delle grandezze meteorologiche temperatura, umidità specifica e irradianza solare per ricavare dati sub-orari, a partire dai valori a scala oraria forniti dalla norma UNI 10349, relativi all'anno meteorologico tipico (AMT). I modelli interpolanti utilizzati sono stati studiati nella precedente annualità e si caratterizzano per approcci metodologici differenti, dovuti alle variabilità intrinseche delle grandezze meteorologiche analizzate. Per la temperatura e l'umidità, i modelli di *downscaling* temporale applicati si basano sulla metodologia interpolante di tipo *spline* cubica (di Hermite), mentre per la radiazione solare, che dipende dalle differenti condizioni di cielo, sono stati applicati modelli di *downscaling* basati su parametri fisico-matematici.

Per ciascuna delle grandezze esaminate la validazione dei metodi d'interpolazione è stata realizzata attraverso il confronto dei valori misurati, basati sul data-set delle registrazioni al minuto di un intero anno (2018) delle centraline installate nel C.R. ENEA Casaccia (Roma), con le stime interpolate a diverse frequenze sub-orarie (fino a quelle al minuto). La quantificazione delle differenze, in termini di precisione ed esattezza, è stata realizzata con due indici statistici di accostamento, l'errore medio (MBE) e la radice dell'errore quadratico medio (RMSE),

I risultati relativi alle grandezze temperatura e umidità specifica dimostrano la bontà dei modelli interpolanti applicati (*spline* cubica di Hermite), in quanto gli scarti registrati sono molto contenuti; nel caso della temperatura, tali scarti sono addirittura inferiori o confrontabili con la stessa incertezza associata all'operazione misura (circa 0,1 °C). Risultati simili sono stati riscontrati con metodi d'interpolazione lineare testati nella fase iniziale di messa a punto dei modelli.

Per quanto riguarda l'irradianza solare (globale, diretta e diffusa) per il tipo di *cielo sereno*, è stato verificato che la semplice interpolazione *spline* (lineare o cubica) porta a ottimi risultati, mentre per la generalità dei tipi di cielo, che non siano solo semplicemente "sereni", ciò non è affatto sufficiente e anche l'adozione di correlazioni di ordine superiore porta a risultati non sempre soddisfacenti. Perciò, per caratterizzare tutti i tipi di cielo – differenziati in base all'intensità della presenza nuvolosa –, è stato predisposto un nuovo metodo d'interpolazione che tenga conto degli aspetti fisici dei fenomeni atmosferici, qui definito come "fisico-sinusoidale"; e sono stati invece accantonati gli altri modelli statistici o anche fisico-statistici reperiti in letteratura e studiati nel corso dell'annualità precedente¹³, in quanto rivelatisi inutilmente complessi per concezione o poco pratici da implementare. Il metodo proposto ha mostrato numerosi vantaggi, fra cui: 1) la compattezza della formulazione matematica, che evita il ricorso alla suddivisione dei tipi di cielo in classi, con la conseguente necessità di adottare una formulazione differente per ciascuna; 2) la naturalezza con cui anche la classe speciale del cielo sereno venga inglobata nel medesimo metodo come caso particolare; 3) la conseguente facilità d'implementazione. Nella tabella 2 è mostrato l'elenco dei metodi d'interpolazione esaminati per la radiazione solare e sono indicate le situazioni in cui essi possono applicarsi. In uno sviluppo futuro sarà utile riconsiderare nuovamente i modelli inventariati in letteratura al fine di integrarne le caratteristiche più interessanti in una seconda versione migliorata del metodo d'interpolazione proposto in questo lavoro.

¹³ Annualità 2019 del Piano triennale 2019÷2021, [6].

I modelli interpolanti sviluppati per le grandezze analizzate sono stati successivamente utilizzati per costruire gli anni meteorologici tipici dei capoluoghi di regione italiani (con l'aggiunta della provincia autonoma di Bolzano), per tre differenti frequenze sub-orarie (10, 15 e 20 minuti).

Il report qui presentato conclude l'obiettivo previsto per le prime due annualità, linee LA 1.23 e LA 1.24, che consisteva nell'elaborazione di dati sub-orari relativi alle principali grandezze utilizzate nell'analisi energetica degli edifici. Pur se i dati presentati sono stati ottenuti a partire dai valori orari della norma UNI 10349, i modelli di elaborazione individuati e validati, e le routine di calcolo messe a punto, potranno essere utilizzate per elaborare dati sub-orari provenienti da altre fonti o da monitoraggi specifici.

Nella III^a annualità, come già evidenziato in precedenza, l'oggetto di studio riguarderà due applicazioni legate all'utilizzo dei dati climatici nell'ambito dell'analisi energetica degli edifici: 1) sarà analizzato un possibile aggiornamento della zonizzazione in fasce climatiche del territorio italiano, basato sui gradi giorno ottenuti dall'aggregazione dati orari della UNI 10349; 2) saranno descritti dei modelli di previsione a scala oraria per la radiazione solare, da utilizzarsi nel calcolo di progettazione e gestione di impianti solari per la produzione energetica.

Appendice. Descrizione dell'anno meteorologico tipico (cenno)

L'anno meteorologico tipico su base oraria (AMT)¹⁴ [26,27,28,29] consiste di una collezione di 8760 (= 365 x 24) dati orari della grandezza meteo-climatica d'interesse (temperatura dell'aria, umidità, radiazione solare ecc.):

- a) estratta dalla serie pluriennale disponibile, e
- b) scegliendo, per ciascuno dei dodici mesi, l'intero mese di dati dell'anno fra quelli presenti nella serie che più si avvicina alla media pluriennale. Il "grado di vicinanza" è stabilito sulla base di appropriati criteri statistici.

L'anno-tipo sarà costituito giustapponendo in sequenza i dati dei dodici mesi così scelti. In tal modo:

- mese per mese il valor medio della grandezza in studio sarà prossimo a quello della serie pluriennale di partenza (*caratterizzazione climatologica* del sito);
- le sequenze orarie e giornaliere presenti nell'anno-tipo riprodurranno in modo sufficientemente realistico gli andamenti effettivamente riscontrabili nei dati registrati (*caratterizzazione meteorologica* del sito).

Particolare attenzione occorre prestare al problema del raccordo fra i valori dei giorni finale e iniziale di due mesi consecutivi. Poiché di norma i mesi sono estratti da anni differenti, tali valori potrebbero presentare sbalzi improvvisi che nella realtà sono molto improbabili. È il caso della temperatura che normalmente non presenta variazioni pronunciate da un'ora all'altra mentre, se si accostano due giorni stagionalmente consecutivi (un 31 marzo seguito da un 1° aprile) ma appartenenti ad anni differenti, potrebbero ben presentarsi salti di 5 °C o più, che occorre pertanto "appianare" ricorrendo a tecniche d'interpolazione. Questo problema non si presenta per la radiazione solare, la quale è sempre nulla durante le ore notturne, ossia proprio quelle ore che sono coinvolte nelle transizioni fra mesi consecutivi.

A seconda delle finalità per le quali è costruito, un anno-tipo può differire da un altro sia per il metodo statistico adottato per stabilire il criterio di vicinanza di un mese alla media, sia per la scelta delle grandezze meteo-climatiche che vi dovranno far parte. Riguardo al primo aspetto, numerose metodologie sono state studiate, messe a punto e codificate da enti di normazione nazionali, organizzazioni professionali e infine istituti di ricerca (ad esempio, quella che fa uso della statistica di Finkelstein-Schafer [30]). Riguardo al secondo aspetto, un anno-tipo può prendere in considerazione più di una grandezza meteo-climatica. Ad esempio, per un AMT da utilizzare per la stima del consumo energetico per il condizionamento degli edifici, sono essenziali i dati simultanei di temperatura, umidità e radiazione solare come grandezze primarie, mentre la velocità del vento funge da parametro secondario. Quando intervengono più grandezze, l'anno-tipo sarà costituito non più solo da 8760 dati orari, bensì da 8760 vettori di più elementi, tanti quante sono le grandezze coinvolte: ovviamente l'algoritmo di costruzione si complica sotto l'aspetto della determinazione dei "pesi" relativi da attribuire a ciascuna grandezza nella composizione dell'anno-tipo.

Gli AMT ENEA sono redatti con i dati della radiazione solare (globale e diffusa orizzontali e diretta normale) e degli illuminamenti (globale e diffuso orizzontali e diretto normale) [31]. La scelta dei mesi incorporati nell'anno-tipo è "pilotata" dall'irradianza globale orizzontale.

¹⁴ Nella letteratura americana: *Typical Meteorological Year*, TMY; in quella europea: *Test Reference Year*: TRY.

Sigle, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

Abbreviazioni e acronimi

AMT	Anno meteorologico tipico (vedi anche TMY e TRY)
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
DfHI	Irradia[nza zione] diffusa su piano orizzontale (<i>Diffuse Horizontal Irradia[nce tion]</i>)
DNI	Irradia[nza zione] diretta normale (<i>Direct Normal Irradia[nce tion]</i>)
DrHI	Irradia[nza zione] diretta su piano orizzontale (<i>Direct Horizontal Irradia[nce tion]</i>)
EHI	Irradia[nza zione] extraatmosferica su piano orizzontale
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
ENI	Irradia[nza zione] extraatmosferica su piano normale
ETS	<i>Exponential Smoothing</i> (Smorzamento esponenziale)
GHI	Irradia[nza zione] globale su piano orizzontale (<i>Global Horizontal Irradia[nce tion]</i>)
MBE	<i>Mean Bias Error</i> (Errore medio)
PCHIP	<i>Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> (Radice dell'errore quadratico medio)
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i> (vedi anche AMT e TRY)
TRY	<i>Test Reference Year</i> (vedi anche AMT e TMY)
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione

Grandezze

Simbolo	Grandezza	Acronimo	Unità di misura
I, I_{gh}	Irradianza solare globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Irradiance</i>	GHI	$W m^{-2}$
I_b, I_{bh}	Irradianza solare diretta (su piano) orizzontale	DrHI	$W m^{-2}$
I_{bn}	Irradianza solare diretta (su piano) normale <i>Direct Normal Irradiance</i>	DNI	$W m^{-2}$
$I_{bn}^{(clear)}$	Irradianza diretta normale in condizioni di cielo sereno		$W m^{-2}$
I_d, I_{dh}	Irradianza solare diffusa (su piano) orizzontale	DfHI	$W m^{-2}$
I_0	Irradianza extraatmosferica (su piano) orizzontale <i>Extraterrestrial Horizontal Irradiance</i>	EHI	$W m^{-2}$
I_{0n}	Irradianza extraatmosferica (su piano) normale <i>Extraterrestrial Normal Irradiance</i>	ENI	$W m^{-2}$
H	Irradiazione globale orizzontale giornaliera al suolo		$J m^{-2}, kWh m^{-2}$
H_o	Irradiazione extraatmosferica orizzontale giornaliera		$J m^{-2}, kWh m^{-2}$
K_T	Coefficiente di trasmissione globale <i>Clearness index</i>		adimensionale
\bar{K}_T	Coefficiente di trasmissione globale giornaliero		
K_{Tc}	Coefficiente di trasmissione globale per cielo sereno (anche: Indice di chiarezza) <i>Clear-sky transmittance</i>		adimensionale
K_c	Indice di cielo sereno <i>clear-sky index</i>		adimensionale
K_{bn}	Fattore di trasmissione della DNI		adimensionale
$K_{bn}^{(clear)}$	Fattore di trasmissione della DNI in atmosfera serena		adimensionale
$B (=K_{Tc,N})$	Parametro di Bourges per la GHI in cielo sereno (= coefficiente di trasmissione globale per cielo sereno, col Sole allo zenit)		adimensionale
m	Massa d'aria ottica relativa <i>Relative Optical Air Mass</i>		adimensionale
$\bar{\delta}_R$	Fattore di estinzione di Rayleigh		adimensionale
T_L	Fattore di torbidità di Linke		adimensionale
$S^{(GHI)}$	Generalizzazione del parametro di Bourges a qualunque condizione di cielo		adimensionale
$S^{(DNI)}$	Generalizzazione del fattore di torbidità di Linke a qualunque condizione di cielo		adimensionale
A	Parametro del modello fisico-sinusoidale		adimensionale
T	Temperatura dell'aria		$^{\circ}C, K$
P	Pressione atmosferica		$hPa, mbar, atm$
φ	Umidità relativa		% (<i>percento</i>)
X	Umidità specifica (o massica)		g_{acqua} / kg_{aria}
ϑ_z	Angolo zenitale		<i>grado</i> ($^{\circ}$), <i>rad</i>

Unità di misura:

<i>Unità di misura</i>	<i>Simbolo</i>	
metro	<i>m</i>	Lunghezza
metro quadro	<i>m²</i>	Area
ora *	<i>h</i>	Tempo
grado Celsius *	<i>°C</i>	Temperatura
kelvin	<i>K</i>	Temperatura
ettopascal	<i>hPa</i>	Pressione atmosferica
millibar *	<i>mbar, mb</i>	Pressione atmosferica
grado *	<i>°</i>	Angolo piano
radiante	<i>rad</i>	Angolo piano
joule	<i>J</i>	Energia
watt	<i>W</i>	Potenza

(*) Unità non SI

Bibliografia e sitografia / References

1. G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio e G. Antonacci (2010), "Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane (Emilia Romagna – Friuli-Venezia Giulia – Liguria – Lombardia – Piemonte)", Ricerca Sistema Elettrico MiSE-ENEA. RdS/2010/185.
2. G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio e G. Antonacci (2011), "Definizione degli anni tipo climatici delle province delle regioni italiane del centro sud", Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA. Report RdS/2011/9, 2011.
3. G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio e G. Antonacci (2012), "Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva", Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA, RdS/2012/106.
4. G. Riva e G. Murano (2013), "Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva", Ricerca di Sistema Elettrico MiSE-ENEA, RdS/2013/153.
5. Anni tipo climatici d'Italia. (nel sito del Comitato Termotecnico Italiano - CTI).
URL: <http://www.cti2000.it/index.php?controller=news&action=show&newsid=34985>
6. F. Spinelli, I. Balog, G. Caputo, D. Iatauro e P. Signoretti (2019), "Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili" (Parte prima), ENEA, Rapporto della Ricerca di Sistema, PTR2019.
7. C. de Boor (2001), *A Practical Guide to Splines, Revised edition*, Applied Mathematical Sciences 27, Springer ISBN: 978-0-387-95366-3.
8. T. Hastie, R. Tibshirani e J. Friedman, *The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction, 2nd edition*, (2009), Springer Series in Statistics ISBN: 978-0-387-84857-0.
9. C. Dagnino e P. Lamberti (2015), *Matematica numerica per la grafica*, Aracne Editrice ISBN: 978-88-548-8703-9
10. WorkSplines and Pchips, URL: <https://blogs.mathworks.com/cleve/2012/07/16/splines-and-pchips/>
11. Matlab function: pchip – Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP),
URL: <https://itectec.com/matlab-ref/matlab-function-pchip-piecewise-cubic-hermite-interpolating-polynomial-pchip/>
12. F.N. Fritsch e R. E. Carlson. "Monotone Piecewise Cubic Interpolation.", *SIAM Journal on Numerical Analysis*. Vol. 17, 1980, pp.238–246.
13. D. Kahaner, C. Moler e S. Nash, *Numerical Methods and Software*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1988.
14. L. Wald (2018), "Basics in Solar Radiation at Earth Surface. Lecture Notes",
URL: https://www.researchgate.net/publication/322314967_BASICIS_IN_SOLAR_RADIATION_AT_EARTH_SURFACE
15. ISPRA (2013), *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*. Manuali e linee guida 84/2013 ISBN: 978-88-448-0584-5.
16. Microsoft: Funzione PREVISIONE.ETS.
URL: <https://support.microsoft.com/it-it/office/previsione-ets-funzione-previsione-ets-15389b8b-677e-4fbd-bd95-21d464333f41>
17. Università degli Studi di Firenze, "Metodi di scomposizione", risorsa on line.
URL: https://local.disia.unifi.it/marliani/stat_eco_A/seriestoriche2.pdf

18. F. Fandoli, “Metodo di smorzamento esponenziale”, Scuola Normale Superiore di Pisa (dispensa), risorsa online. URL: <http://users.dma.unipi.it/~flandoli/StatIlmetodoSET.pdf>
19. Microsoft: Funzione PREVISIONE.ETS.INTCONF.
URL: <https://support.microsoft.com/it-it/office/previsione-ets-intconf-funzione-previsione-ets-intconf-6d4a7557-11fa-4678-9e6a-dbcc31a7c7df>
20. F. Spinelli, I. Balog, A. Benedetti, R. Siviero e G. Caputo, *Definizione di una procedura per la caratterizzazione meteorologica di un sito per la localizzazione di un impianto solare a concentrazione. Applicazione della procedura al sito della Casaccia*. Rapporto ENEA – Ricerca di Sistema Elettrico, Roma, dicembre 2019.
21. WMO, Guide N.8, 1996 “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”.
22. Norma UNI EN ISO 15927-4, “Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling”.
23. Norma UNI 10349-1:2016 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata”.
24. Norma UNI/TR 10349-2:2016 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto”.
25. UNI 10349-3:2016 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici”.
26. K.M. Knight, S.A. Klein e J.A. Duffie, “A methodology for the synthesis of hourly wheater data”, *Solar Energy*, Vol. 46, No. 2, pp 109-120 (1991).
27. C. Mandurino, *I dati meteorologici per applicazioni energetiche e ambientali*, tesi di dottorato di ricerca, Università Di Bologna, 2009.
28. W. Marion e K. Urban, *User's Manual for TMY2s Typical Meteorological Years*, 1995, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
29. S. Wilcox e W. Marion, *User's Manual for TMY3 Data Sets*, USA National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, May 2008.
30. J. J.M. Finkelstein e R.E. Schafer, “Improved Goodness-of-Fit Tests”, *Biometrika*, 58(3), pp. 641–645 (1971)
31. “Radiazione solare e illuminamento naturale. I dati ENEA”, estratto da: F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro e P. Signoretti (2015), *Costruzione degli Anni tipici per l'illuminamento naturale (AMTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici*, Rapporto ENEA - Ricerca di Sistema Elettrico, Roma, settembre 2015 (RdS/PAR2014/085).