



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



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

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

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

Report RdS/PTR2019/039

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

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

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

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I 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: *LA1.23 - Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili – Annualità 1*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 I DATI CLIMATICI NEL CALCOLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI	5
1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO	7
2 LE MISURE DELLE GRANDEZZE CLIMATICHE	8
2.1 STRUMENTI DI MISURA INSTALLATI.....	8
2.2 LE GRANDEZZE MISURATE E I PERIODI DI MISURA.....	9
2.3 DEFINIZIONE DELL'ANNO TIPO DI GRANDEZZE CLIMATICHE	10
3 ANALISI PRELIMINARE DELLE MISURE METEOCLIMATICHE DI INTERESSE	12
3.1 PROFILI TEMPORALI TIPO DELLE GRANDEZZE CLIMATICHE A DIVERSA SCALA TEMPORALE	12
3.1.1 <i>Temperatura</i>	12
3.1.2 <i>Umidità specifica</i>	17
3.1.3 <i>Irradianza solare</i>	24
4 ANALISI STATISTICA DELLA VARIABILITÀ DELLE GRANDEZZE CLIMATICHE	29
4.1 L'AUTOCORRELAZIONE TEMPORALE PER LE TEMPERATURE E L'UMIDITÀ SPECIFICA	29
4.2 NORMALITY TEST PER LE TEMPERATURE E L'UMIDITÀ SPECIFICA	36
4.3 LA VARIABILITÀ DELLA RADIAZIONE SOLARE	40
4.1.1 <i>Modello fisico cielo sereno (Clear Sky)</i>	43
4.1.2 <i>Modello matematico</i>	45
4.1.3 <i>Confronti preliminari dei modelli individuati per cielo sereno</i>	46
5 CONCLUSIONI.....	54
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	55
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	56

Sommario

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 Performace of Buildings*), forniscono dati climatici a livello mensile ed indicatori cumulati (*gradi-giorno*, *Indice di Severità climatica*) per le principali grandezze che influiscono nel bilancio energetico degli edifici, ma non rendono tuttavia 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 necessario una maggior accuratezza anche nei dati di input utilizzati nelle simulazioni termoeenergetiche.

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. Tale aspetto risulta inoltre 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 prima annualità, descritta nel presente report, è stato condotto uno studio preliminare delle misure, di *Temperatura, Umidità e Irradiazione solare*, effettuate nel Centro Ricerche ENEA Casaccia. L'analisi statistica svolta, ha consentito di evidenziare il diverso grado di variabilità delle grandezze in esame, e conseguentemente di individuare i modelli di elaborazione più adeguati per il calcolo di dati disaggregati a livello sub-orario (*downscaling*). Tali modelli potranno essere utilizzati nelle prossime annualità per la produzione di anni tipo (*Typical Meteorological Years*, TMYs) relativi alle grandezze in esame, per diverse località di riferimento italiane.

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 Performace of Buildings*), 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, geothermal systems, etc. whose performance are strictly linked at the climatic variations of the site where the building is located.

The first step of work, described in this report, represent a preliminary study of the measurements of *Temperature, Humidity and Solar irradiation*, carried out in the C.R. ENEA Casaccia. The statistical analysis carried out, allowed to highlight the different level of variability of the considered variables, and consequently to identify the most suitable statistical models for the processing of disaggregated data at sub-hourly level (*downscaling*). These models can be used in the next years to develop the reference years (TMY) for temperature, specific humidity and solar radiation, for different Italian sites.

Parva libellum sustine patientia:
Sopporta con un pò di pazienza il mio libretto.
(Fedro, Favole, Libro IV, 7, 3).

1 Introduzione

1.1 I dati climatici nel calcolo del fabbisogno energetico degli edifici

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 semistazionari, 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 tipo* (*Typical Meteorological Years, TMYs*), 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 (in gran parte le località coincidono con i capoluoghi di provincia). Sono inoltre riportati in appendice:

- 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));
- calcolo dell'irradianza solare su di una superficie comunque inclinata ed orientata con modello di cielo di Perez (non isotropo);
- 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 invece 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 attualmente la classificazione climatica italiana è rimasta 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.

Nell'attività proposta nelle prime due annualità, l'attenzione sarà focalizzata sull'elaborazione di dati sub-orari, relativamente alla Temperatura, all'Umidità specifica, e alla Radiazione solare (*Diretta, Diffusa e Globale*), che rappresentano quelle maggiormente incidenti nelle valutazioni energetiche. Tali grandezze non sono al momento disponibili benché la continua evoluzione delle metodologie di calcolo, come richiamato dalla nuova direttiva EPBD 844/2018 (Allegato I), preveda la possibilità di utilizzo di algoritmi di calcolo per il fabbisogno energetico degli edifici basati su modelli matematici più accurati rispetto a quelli attualmente utilizzati.

In tale contesto diventa opportuno considerare la possibilità di ampliare i dati climatici attualmente disponibili (UNI 10349), ai fini dell'applicazione delle nuove metodologie di calcolo energetico implementate nei software più evoluti e, allo stesso tempo, riconsiderare la zonizzazione del territorio nazionale utilizzando dati più recenti (base oraria), analizzandone le possibili implicazioni sui requisiti energetici fissati dalle normative in vigore.

La disponibilità di dati a scala temporale ridotta consentirebbe infatti di utilizzare al meglio i sistemi di calcolo più fini sviluppati di recente, ed ottenere valori del fabbisogno energetico più accurati.

Tale aspetto risulta ancor più rilevante nel caso in cui siano installati impianti basati sull'utilizzo di fonti rinnovabili quali: pompe di calore, pannelli solari termici, moduli fotovoltaici ecc. In questi casi infatti l'efficienza dell'impianto, e quindi in molti casi la fattibilità degli stessi, è legata alla disponibilità delle fonti rinnovabili, nonché alla variabilità climatica stagionale del sito in esame.

I dati climatici a ridotta scala temporale potrebbero inoltre essere implementati anche per la progettazione dei sistemi di controllo più evoluti degli impianti di climatizzazione e ottenere così un'ottimizzazione nell'utilizzo dei sistemi di accumulo e delle fonti rinnovabili disponibili.

Sebbene esistano estese banche-dati di serie storiche pluriennali di misure orarie per quasi tutte le grandezze meteorologiche – ciò è certamente vero per la temperatura e in parte anche per la pressione, il vento, l'umidità e l'irradianza solare – e per numerosissime località nazionali, la disponibilità di misure analoghe a frequenza sub-oraria è invece pressoché nulla.

L'attività che si intende svolgere è pertanto finalizzata a "costruire" profili con frequenza sub-oraria delle grandezze d'interesse, nonché renderli utilizzabili per valutazioni energetiche, a partire dai dati orari già ampiamente disponibili.

1.2 Obiettivi del lavoro

Per quanto evidenziato, l'attività prevista per il triennio 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico sarà incentrata sull'elaborazione di grandezze meteorologiche a scala sub-oraria, nonché sulla possibilità di sviluppo di modelli di previsione e sulla rimodulazione di indicatori climatici da utilizzarsi per la zonizzazione del territorio.

Le centraline di misura installate nella sede del Centro Ricerche ENEA Casaccia, che saranno meglio descritte nel successivo capitolo, rendono infatti disponibile diversi set di misure meteorologiche a scala temporale ridotta (1 minuto), che potranno essere utilizzate come base di partenza per la definizione di modelli statistici per l'elaborazione successiva di grandezze a diversa scala di aggregazione sub-oraria (*downscaling*).

Affinché la costruzione dei profili sia plausibile e utilizzabile in pratica, possono essere utilizzati differenti metodologie in funzione delle caratteristiche del dato di partenza: interpolazione lineare o polinomiale o altra forma matematicamente già disponibile. Occorre quindi studiare profili, non necessariamente di natura analitica, che incorporino le caratteristiche "essenziali" (media, varianza ecc.) della irregolarità e imprevedibilità degli andamenti effettivamente riscontrabili nel fenomeno atmosferico.

Per costruire tali profili simulati è necessario partire da una serie di misure a frequenza sub-oraria, protrattesi per un sufficiente intervallo di tempo.

Va aggiunto che negli ultimi anni il filone di ricerca qui proposto è perseguito con determinazione anche in altri settori; ad esempio, la repentinità della variazione nuvolosa influisce grandemente sulla variabilità dell'irradianza solare al suolo, e questa incide sulle prestazioni degli impianti energetici che ricorrono a tale fonte, sulla sua disponibilità variabile nel tempo e sulla sincronizzazione fra produzione e richiesta (dall'utenza finale); più precisamente, la previsione a breve termine è più stringente per gli impianti solari a concentrazione, che utilizzano la sola componente diretta (*Direct Normal Irradiance*, DNI) dell'insolazione. È ovvio che l'ampia disponibilità della letteratura scientifica già disponibile a riguardo potrà essere utilizzata per mutuare metodi, eventualmente da trasferire allo studio delle altre grandezze meteorologiche di interesse.

Partendo dall'analisi dei dati disponibili su base oraria (UNI 10349) è quindi possibile ottenere un ampliamento dei data set climatici ai fini dell'applicazione di nuove metodologie di calcolo, nonché un possibile aggiornamento della zonizzazione climatica del territorio nazionale, come base per eventuali revisioni dei requisiti minimi richiesti per la qualificazione energetica del parco immobiliare italiano.

Le prime annualità saranno focalizzate sull'estensione, a scala sub-oraria, dei data set di più variabili climatiche tra quelle che entrano in gioco nel calcolo del fabbisogno energetico degli edifici.

Infine, la terza annualità sarà rivolta all'analisi di possibili aggiornamenti della zonizzazione climatica del territorio nazionale relativa alla stagione invernale e lo sviluppo di modelli di previsione a diversa scala temporale della radiazione solare.

L'attività che si intende svolgere nella prima annualità della Ricerca di Sistema elettrico può essere in sintesi così descritta:

- Analisi preliminare delle misure meteorologiche disponibili: verifica di consistenza dei dati disponibili, presenza di eventuali outliers;
- Aggregazione a diversa scala sub-oraria, analisi dei profili tipo e indicatori descrittivi delle grandezze in esame;

- Analisi statistica della variabilità temporale dei profili tipo di Temperatura, Umidità specifica e Radiazione solare per la scelta dei modelli di disaggregazione (downscaling) dei dati orari.

I modelli individuati saranno utilizzati nelle successive annualità per la produzione di anni tipo, a opportuna scala sub-oraria, relativi alle differenti località italiane.

1 Le misure delle grandezze climatiche

1.1 Strumenti di misura installati

La radiazione solare costituisce la fonte energetica primaria degli impianti di potenza solari [3] e pertanto è importante poterla stimare con accuratezza, in quanto non è una fonte stabile ma dipende sensibilmente dalla variabilità atmosferica indotta dalla presenza delle nubi: queste sono responsabili della sottrazione di una quota consistente dell'energia solare che attraversa l'atmosfera prima di giungere al suolo. Il *coefficiente di trasmissione globale K_T* (vedi § 4.3) si rivela un parametro utile per discriminare i momenti sereni (ossia quelli caratterizzati dalla totale assenza delle nubi) da quelli parzialmente o totalmente nuvolosi.

La centralina solarimetrica installata nel Centro di Ricerca ENEA Casaccia consente la misura delle componenti della radiazione solare: *globale* e *diffusa* sul piano orizzontale e *diretta* sul piano normale ai raggi del sole.

Della centralina, l'inseguitore solare è sicuramente l'elemento più critico per la misura della radiazione solare diretta. È un organo in movimento che assolve al duplice compito di schermare, mediante una sfera metallica, il sensore di radiazione diffusa sul piano orizzontale e di comandare il puntamento del pireliometro, strumento per la misura della radiazione diretta, verso il disco solare.

Il sistema si orienta automaticamente sul disco solare durante il suo percorso giornaliero. È programmato per orientarsi verso la posizione del Sole calcolata in base all'ora, il giorno e la posizione geografica del sito (latitudine e longitudine). Sull'inseguitore solare è installato un pireliometro costituito da una termopila le cui giunzioni calde sono esposte alla radiazione diretta mentre le giunzioni fredde sono schermate alla radiazione stessa. La tensione prodotta dalla termopila è dunque proporzionale alla radiazione diretta incidente. Al fine di considerare solo la radiazione diretta proveniente dal disco solare, l'elemento sensibile è situato ad una estremità di un cilindro metallico, con rivestimento interno assorbente. In corrispondenza dell'altra estremità, quella rivolta al Sole, è situata una finestra di quarzo che isola il sistema dall'esterno.

Invece per la misura della radiazione diffusa si utilizza un piranometro il cui principio di funzionamento è del tutto identico a quello del pireliometro. Il sensore è schermato dai raggi provenienti direttamente dal disco solare interponendo una piccola sfera tra le parti attive del piranometro e il Sole. Infine la radiazione globale sul piano orizzontale è misurata attraverso un altro piranometro, del tutto identico ai precedenti, parallelo al piano orizzontale senza ostruzioni in grado di intercettare la radiazione proveniente dall'intero emisfero celeste, indipendentemente dalla sua direzione. La stazione meteo inoltre è dotata di un anemometro per la misura del vento, un barometro per la misura di pressione e di un termoigrometro per la misura di temperatura e umidità relativa dell'aria. Il tutto è dotato di un sistema automatico di acquisizione dati.

Le immagini di Figura 1 mostrano la strumentazione per la misurazione della radiazione solare. A sinistra si vede il sistema di inseguimento mobile che punta in ogni momento nella direzione del sole, con la sfera che scherma il sensore della misurazione dell'irradianza diffusa (piranometro). In alto a destra si vedono in primo piano lo stesso piranometro per la diffusa e il "cannocchiale" deputato alla misurazione dell'irradianza diretta (pireliometro).



Figura 1

1.2 Le grandezze misurate e i periodi di misura

Per la caratterizzazione climatica di una località è necessario effettuare presso il sito la misurazione delle grandezze meteorologiche, con continuità e per una durata temporale adeguata.

L'ENEA ha allestito da tempo una rete di stazioni di acquisizione dati della radiazione solare, della temperatura e, limitatamente ad alcuni siti, delle altre grandezze atmosferiche [8, 9, 10]. In questo studio sono stati utilizzati i dati della stazione installata presso il Centro Ricerche Casaccia, situato nella campagna romana a Nord della capitale.

La stazione è operativa sin dal novembre 2002, quando si iniziò a misurare e registrare le irradianze solari e la temperatura dell'aria con frequenza di un record ogni 5 minuti. È stata potenziata nel tempo sia aggiungendo dei sensori per la misurazione di altre grandezze, sia abbassando la frequenza di acquisizione. A partire da luglio 2017 vengono misurate e memorizzate, con frequenza pari a un record al minuto, le seguenti grandezze meteo:

- irradianza solare globale orizzontale (*Global Horizontal Irradiance*, GHI);
- irradianza solare diretta normale (*Direct Normal Irradiance*, DNI);
- irradianza solare diffusa orizzontale (*Diffuse Horizontal Irradiance*, DfHI);
- temperatura dell'aria (T);
- pressione atmosferica (p);
- umidità relativa dell'aria (φ);
- velocità e direzione del vento.

Il periodo di misura che si è scelto di analizzare è quello che va dal 01/08/2017 al 31/12/2019 e comprende quindi due anni solari completi.

Tra le grandezze meteorologiche misurate si è posta l'attenzione su quelle che maggiormente influenzano il bilancio energetico degli edifici, ovvero la temperatura, l'irradianza solare e l'umidità specifica. Quest'ultima grandezza, di cui non si hanno misure dirette, è stata valutata a partire dai valori della pressione atmosferica (p), della temperatura (T) e dell'umidità relativa (φ).

L'umidità specifica (o massica) X , è il rapporto tra la massa del vapore acqueo m_v contenuta in un certo volume di aria umida, e la massa di aria secca m_a , contenuta nel medesimo volume di aria umida:

$$X = \frac{m_v}{m_a}$$

Considerando l'insieme dell'aria umida come una miscela di due componenti, aria secca e vapore acqueo, per i quali si ipotizza un comportamento da gas perfetti ed è quindi applicabile la legge di Dalton, attraverso semplici passaggi si può arrivare alla seguente equazione:

$$X = \frac{622 \times \varphi \times p_{sat}}{p - \varphi \times p_{sat}} \left[\frac{\text{kg}_{aria}}{\text{g}_{acqua}} \right]$$

dove con p_{sat} è indicata la pressione di vapore saturo.

La pressione di vapore saturo p_{sat} è una funzione della temperatura e cresce con questa secondo la legge definita dall'equazione di Clausius-Clayperon.

Nella determinazione delle grandezze climatiche per il calcolo del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, si utilizzano delle equazioni, che approssimano bene i dati sperimentali, ottenuti fissando i parametri che compaiono nell'equazione di Clausius-Clayperon:

$$p_{sat} = 610 \times e^{\frac{17,269 \times T}{237,3 + T}} \text{ per } T \geq 0$$

$$p_{sat} = 610 \times e^{\frac{21,875 \times T}{265,6 + T}} \text{ per } T < 0$$

Attraverso tali equazioni è quindi possibile, ricavare dalle sole grandezze misurate, i valori di umidità specifica X

$$X = \frac{622 \times \varphi}{\left[\left(\frac{p}{610} e^{-\frac{17,269 \times T}{237,3 + T}} \right) - \varphi \right]} \text{ per } T \geq 0 \left[\frac{\text{kg}_{aria}}{\text{g}_{acqua}} \right]$$

$$X = \frac{622 \times \varphi}{\left[\left(\frac{p}{610} e^{-\frac{21,875 \times T}{265,6 + T}} \right) - \varphi \right]} \text{ per } T < 0 \left[\frac{\text{kg}_{aria}}{\text{g}_{acqua}} \right]$$

1.3 Definizione dell'anno tipo di grandezze climatiche

Negli ultimi anni l'elaborazione di dati disaggregati a livello sub-orario (*downscaling*) si è reso necessario per adattare gli anni tipici delle grandezze meteorologiche già disponibili a 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. Nutrite collezioni di anni tipici 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 anche all'ENEA, limitatamente alla radiazione solare, per rispondere alla domanda di dati di input per la progettazione e la realizzazione degli impianti di potenza che ricorrono alla fonte solare. La disponibilità dei metodi di downscaling permetterebbe di tradurre tale patrimonio già disponibile nei nuovi anni tipo a frequenza sub-oraria.

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) o *Typical Meteorological Year (TMY)* risponde a questa esigenza. Si tratta di una collezione di 8760 (= 365 x 24) dati orari della grandezza meteo-climatica d'interesse (temperatura dell'aria, umidità, radiazione solare ecc.), estratta dalla serie pluriennale disponibile, e 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 tipico 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 tipico 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 tipico 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). Riguardo al secondo aspetto, un anno tipico 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 tipico 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 tipico.

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) [10]. La scelta dei mesi incorporati nell'anno tipico è "pilotata" dall'irradianza globale orizzontale.

2 Analisi preliminare delle misure meteorologiche di interesse

2.1 Profili temporali tipo delle grandezze climatiche a diversa scala temporale

2.1.1 Temperatura

A partire dai dati rilevati nella campagna di misura realizzata, sono stati costruiti i profili di temperatura oraria; questi si riferiscono a 18.862 misure effettuate dalle ore 0.00 del 01/08/2017 alle ore 23.00 del 31/10/2019.

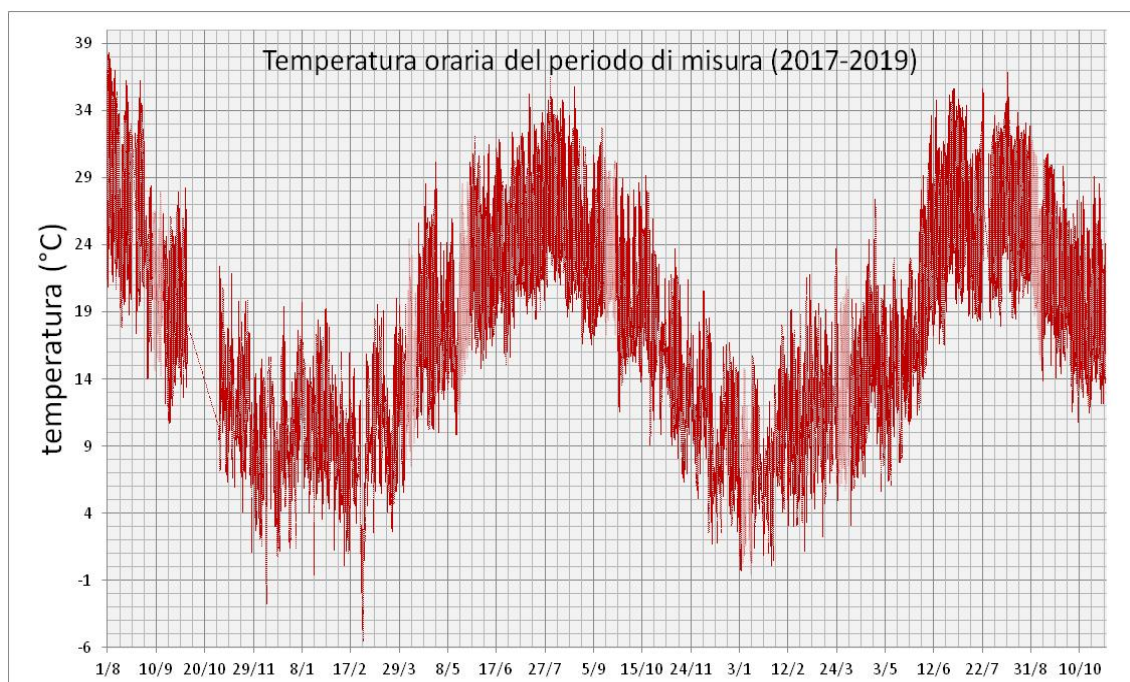


Figura 2

L'andamento della temperatura evidenzia l'ampia variabilità stagionale dei valori misurati; l'intervallo di variazione registrato è di circa 44°C. Il valore massimo è stato misurato il giorno 02/08/2017 alle ore 11.00 mentre quello minimo il giorno 28/02/2018 alle ore 6.00.

In Tabella 1 sono riportati i risultati dell'analisi statistica dei valori di temperatura, che consentono di ricavare informazioni sulla tendenza e sulla dispersione dei dati misurati.

Misure di temperatura 2017-2019	
Media	16,96
Errore standard	0,06
Mediana	16,55
Moda	6,84
Deviazione standard	7,96
Varianza campionaria	63,44
Curtosi	-0,72
Asimmetria	0,18
Intervallo	43,92
Minimo	-5,59
Massimo	38,33

Tabella 1

Nella Figura 3 sono riportate la frequenza cumulata e la frequenza assoluta della serie dei dati di temperatura misurati.

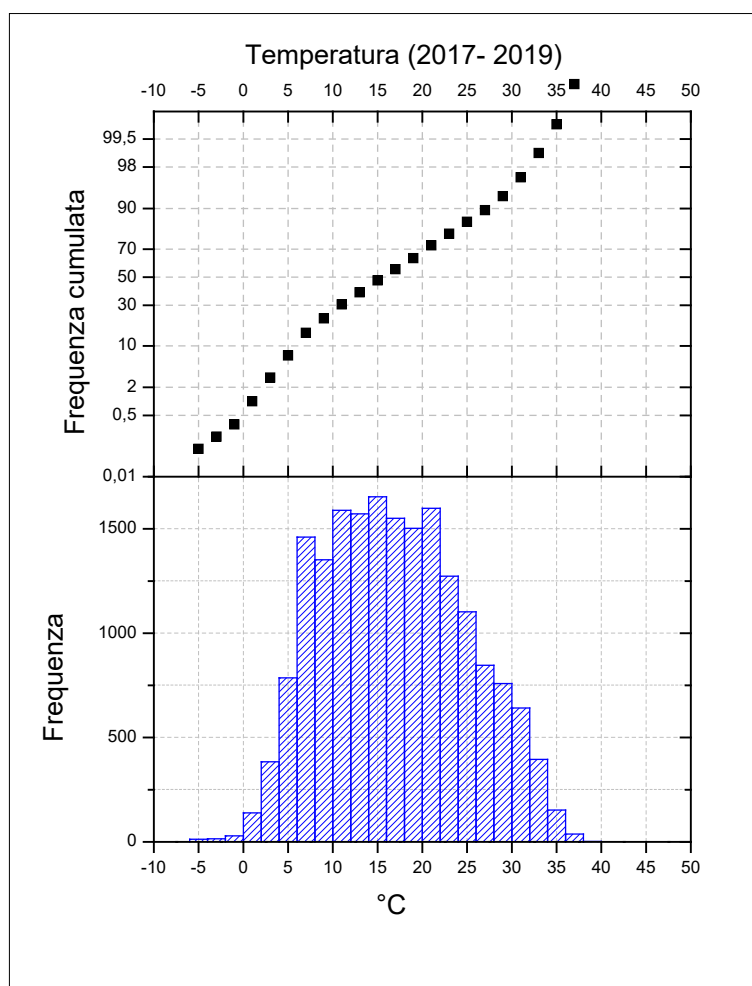


Figura 3

La campagna di misura realizzata nelle tre diverse annualità temporali (2017, 2018 e 2019) ha interessato due anni solari completi; ai fini dell'aggregazione a diversa scala sub-oraria, verifiche di consistenza dei dati e di presenza di outliers hanno portato a scegliere, come anno solare di riferimento, per i profili tipo, il periodo 01/01/2018 - 31/12/2018.

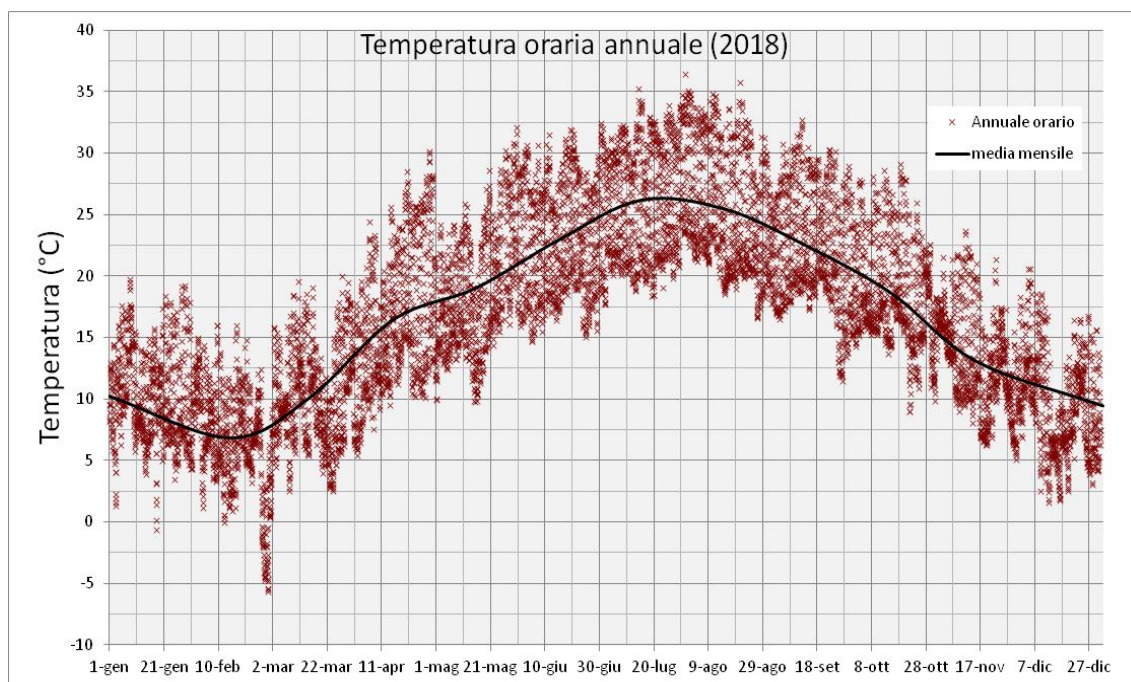


Figura 4

In Tabella 2 sono riportati i risultati dell'analisi statistica per le quattro stagioni climatiche dei valori di temperatura misurati nell'anno 2018.

Misure di temperatura anno 2018				
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Media	9,05	17,98	24,84	17,88
Errore standard	0,09	0,13	0,10	0,13
Mediana	8,92	17,62	24,14	17,55
Moda	6,70	12,05	20,81	12,05
Deviazione standard	4,04	6,10	4,56	6,06
Varianza campionaria	16,33	37,16	20,76	36,67
Curtosi	0,60	-0,52	-0,98	-0,52
Asimmetria	-0,24	0,00	0,26	0,00
Intervallo	25,32	29,56	21,36	29,56
Minimo	-5,59	2,56	15,07	2,56
Massimo	19,73	32,12	36,43	32,12

Tabella 2

Come esempi di profili di temperatura si riportano quelli relativi ai mesi di giugno e dicembre; accanto agli andamenti orari e sub-orari (5 minuti) mensili sono stati rappresentati anche quelli sub-orari del giorno centrale del mese (15 giugno e 15 dicembre).

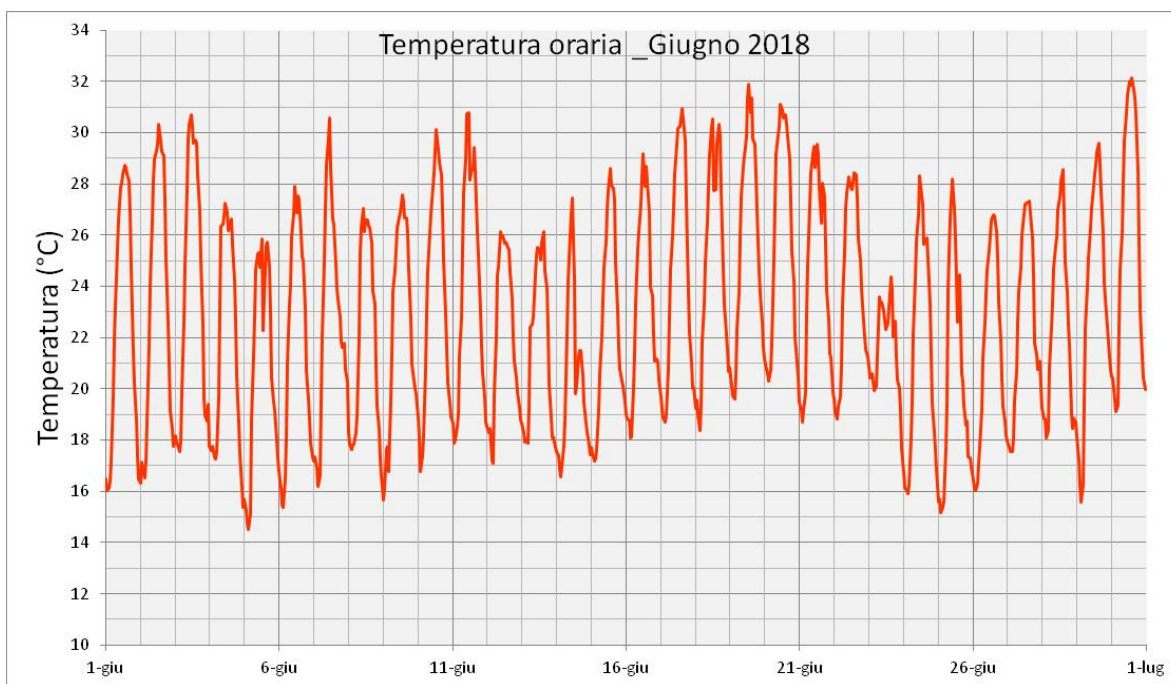


Figura 5

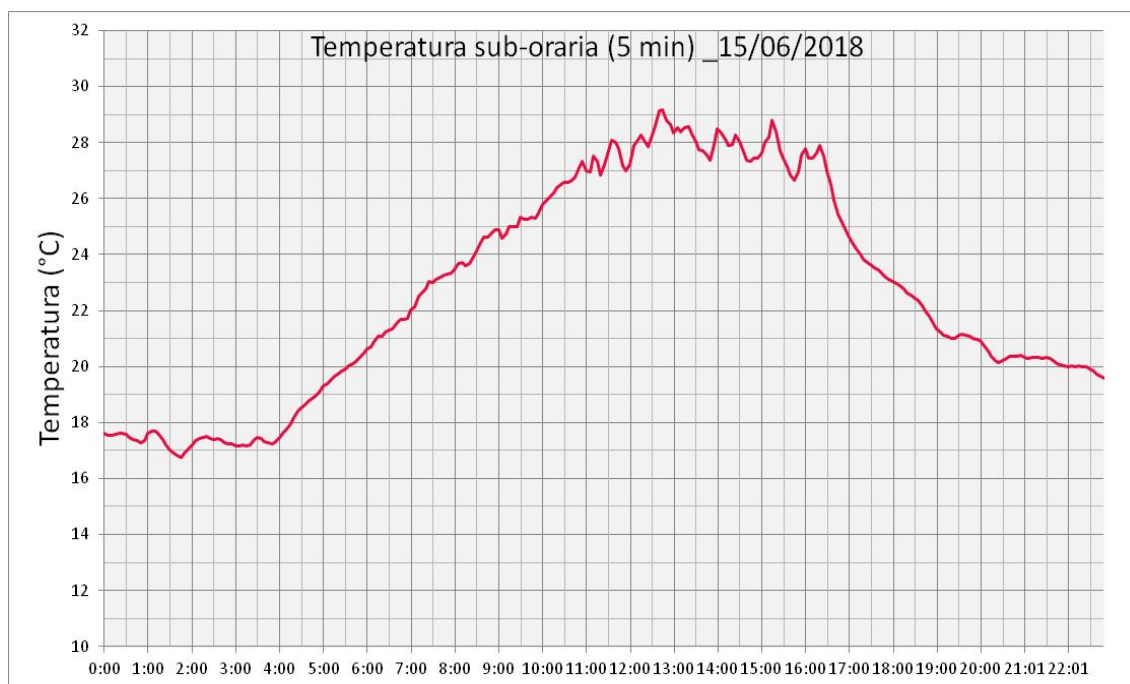


Figura 6

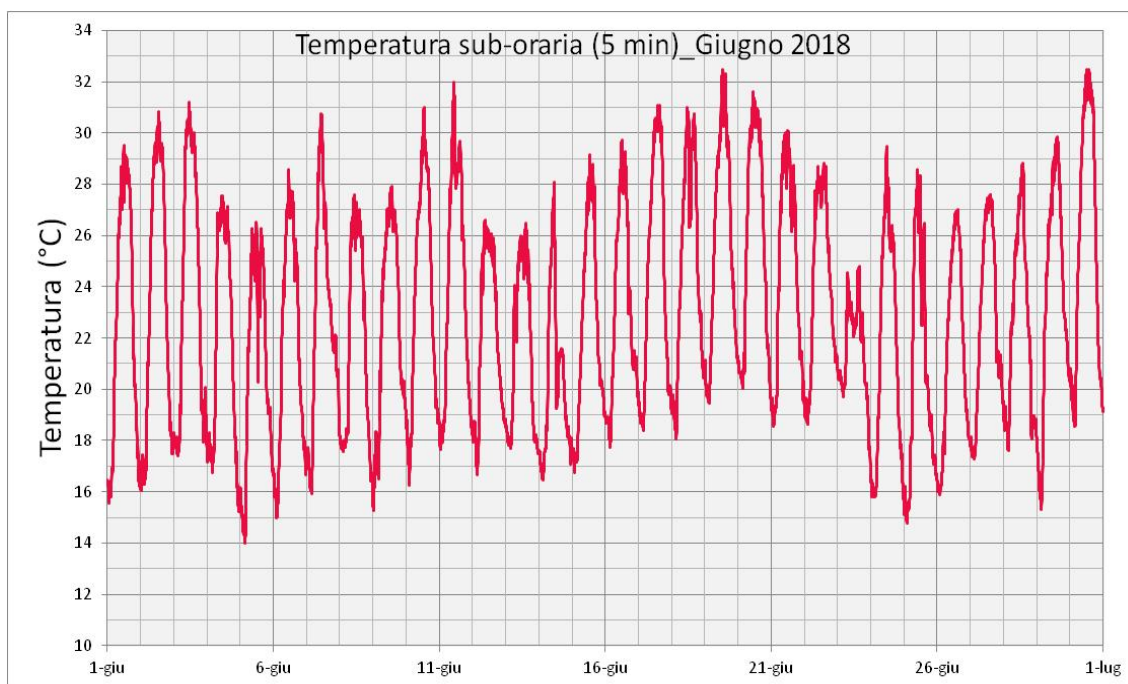


Figura 7

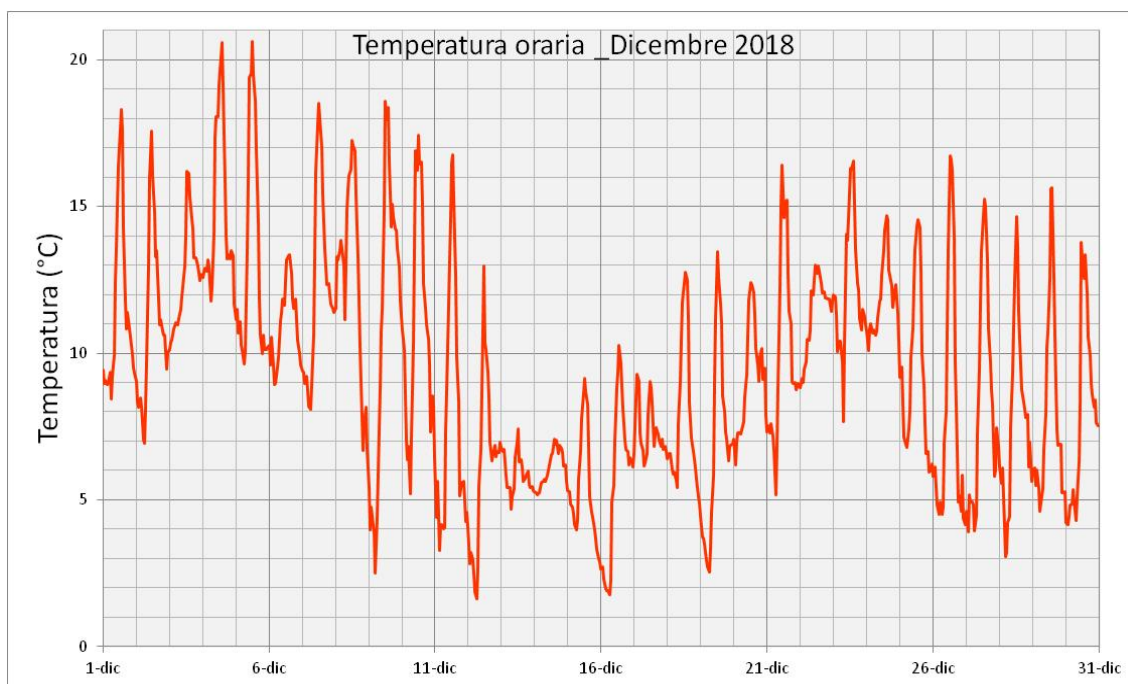


Figura 8

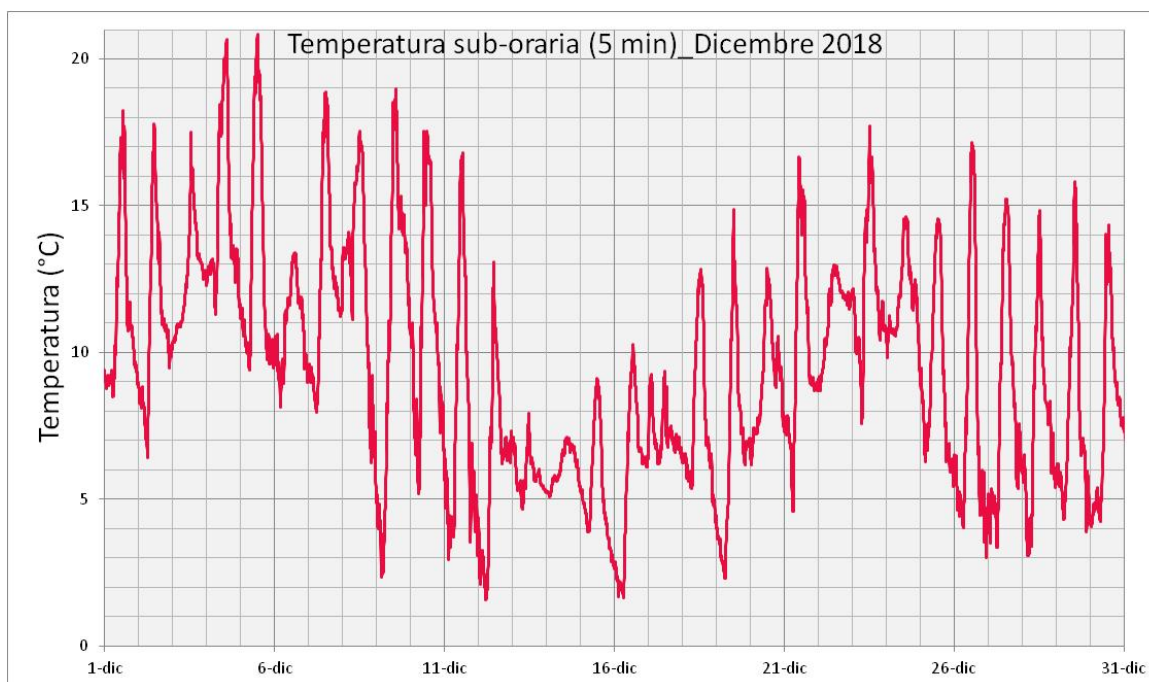


Figura 9

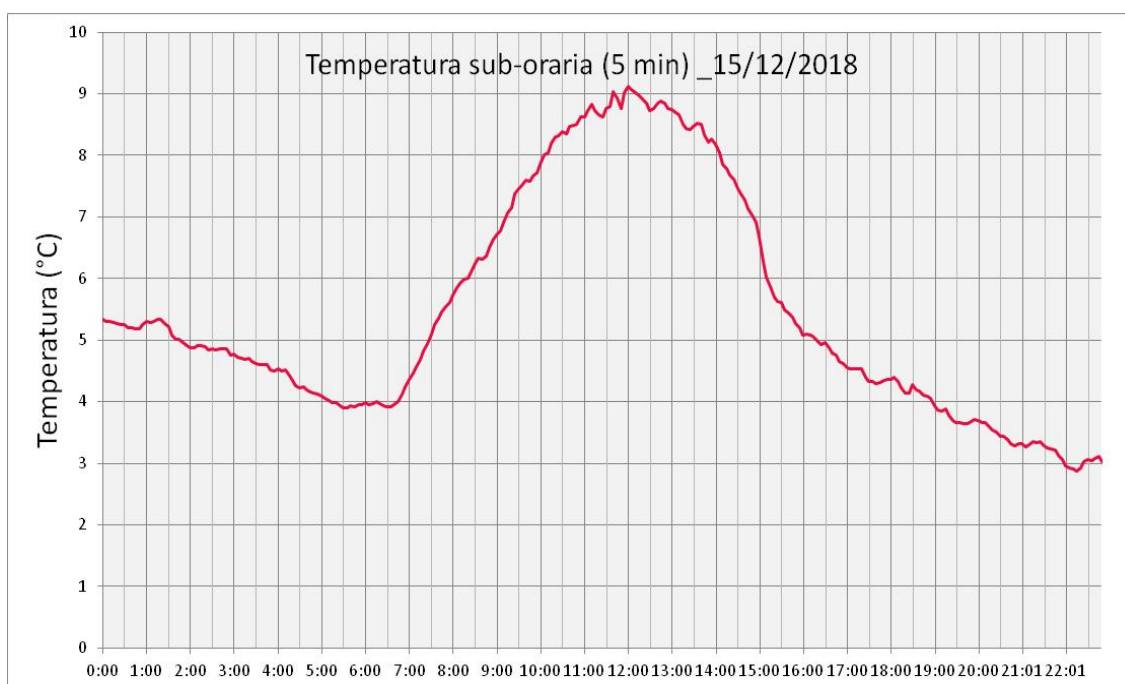


Figura 10

2.1.2 Umidità specifica

Nelle figure a seguire è riportato l'andamento temporale, nel periodo di misura, dell'umidità specifica, calcolata a partire dai dati orari di pressione p , temperatura T e umidità relativa ϕ .

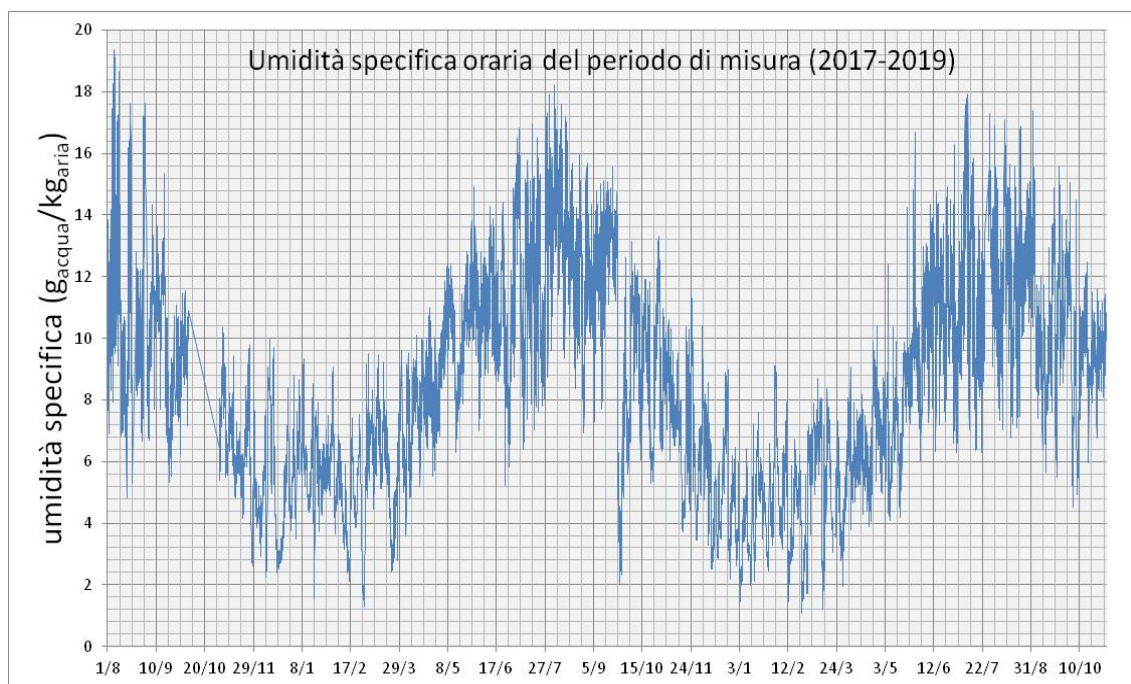


Figura 11

L'umidità specifica segue l'andamento della temperatura esterna raggiungendo i valori massimi nei mesi caldi, e i valori minimi in quelli freddi; il valore massimo calcolato si riferisce alle ore 19:00 del giorno 06/08/2017 mentre quello minimo alle ore 12:00 del giorno 23/02/2019. Il 70% dei valori calcolati è inferiore o uguale a circa 10 g/kg, con un range di variabilità compreso tra il 10% e il 200% di tale valore.

Valori di umidità specifica 2017-2019	
Media	8,43
Errore standard	0,02
Mediana	8,21
Moda	6,27
Deviazione standard	3,33
Varianza campionaria	11,07
Curtosi	-0,62
Asimmetria	0,23
Intervallo	18,30
Minimo	1,06
Massimo	19,36

Tabella 3

Nella figura a seguire sono riportati la distribuzione cumulata e in frequenza della serie delle temperature misurate.

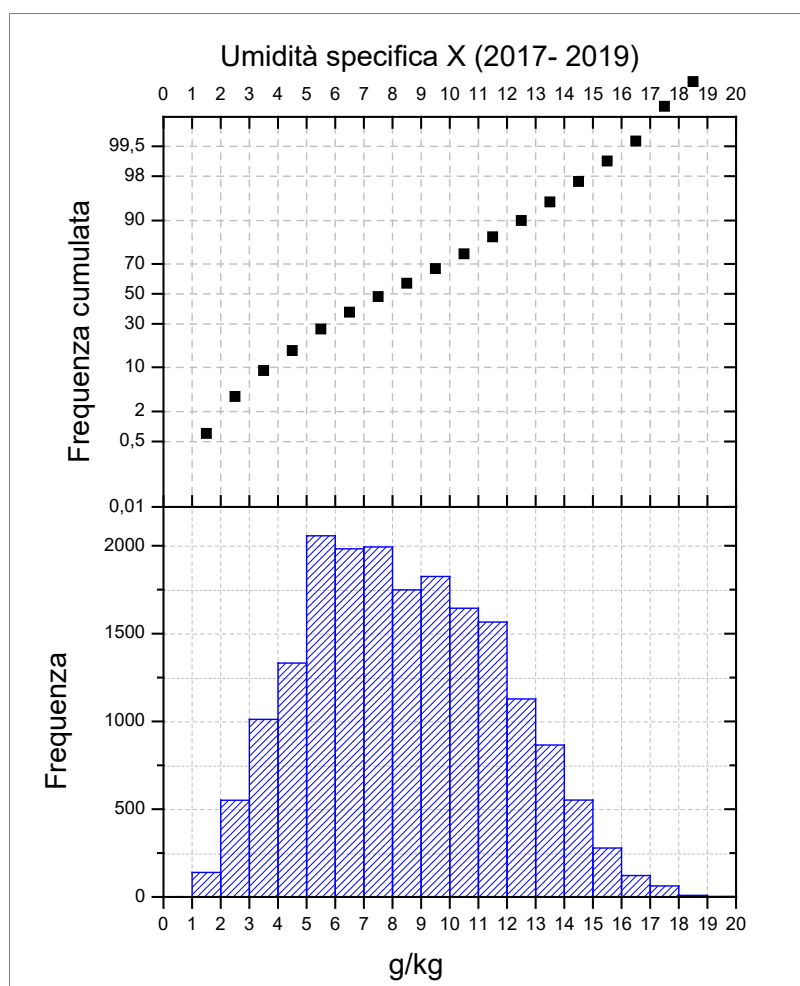


Figura 12

Analogamente a quanto fatto per la temperatura, a seguire viene proposto l'andamento dell'umidità specifica oraria per il periodo di riferimento 01/01/2018 - 31/12/2018.

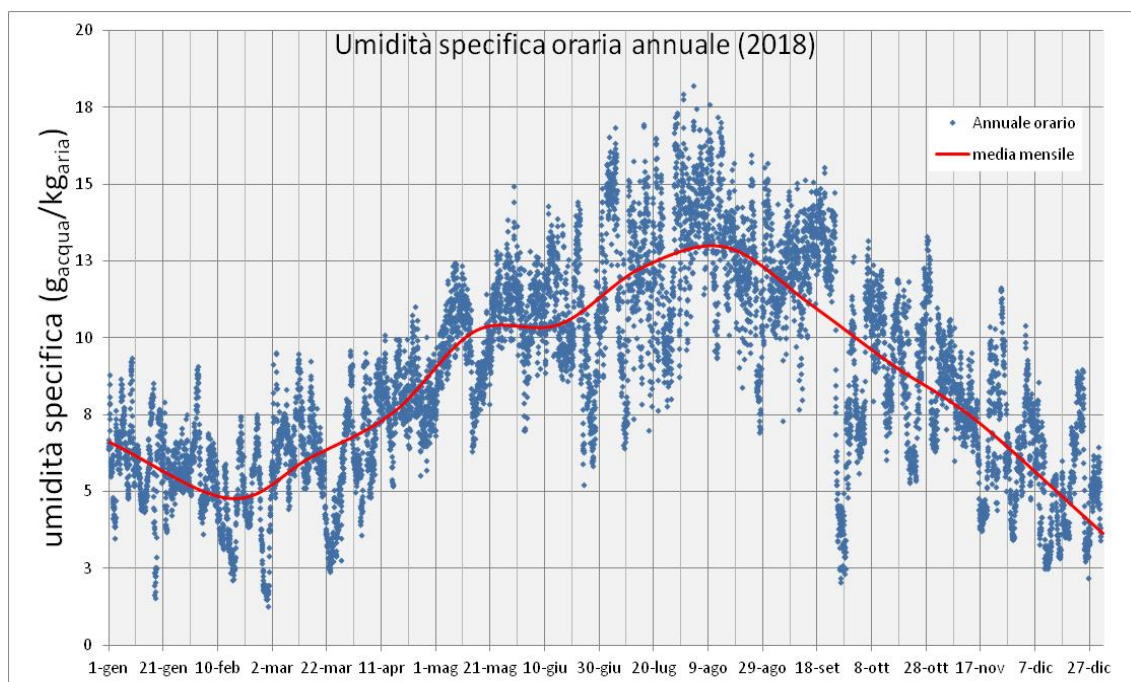


Figura 13

In Tabella 4 sono riportati i risultati dell'analisi statistica per le quattro stagioni climatiche dei valori di umidità specifica calcolati per l'anno 2018.

Valori di umidità specifica anno 2018				
	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
Media	5,62	8,86	12,28	7,47
Errore standard	0,03	0,05	0,05	0,05
Mediana	5,70	9,09	12,48	7,40
Moda	6,17	6,62	12,80	9,86
Deviazione standard	1,55	2,36	2,25	2,55
Varianza campionaria	2,40	5,58	5,06	6,51
Curtosi	0,02	-0,14	-0,08	-0,61
Asimmetria	-0,27	-0,48	-0,43	0,14
Intervallo	8,24	12,53	12,99	12,69
Minimo	1,27	2,40	5,23	2,06
Massimo	9,51	14,93	18,22	14,75

Tabella 4

Come esempi di profili di umidità specifica si riportano quelli relativi ai mesi di giugno e dicembre; accanto agli andamenti orari e sub-orari (5 minuti) mensili sono stati rappresentati anche quelli sub-orari del giorno centrale del mese (15 giugno e 15 dicembre).

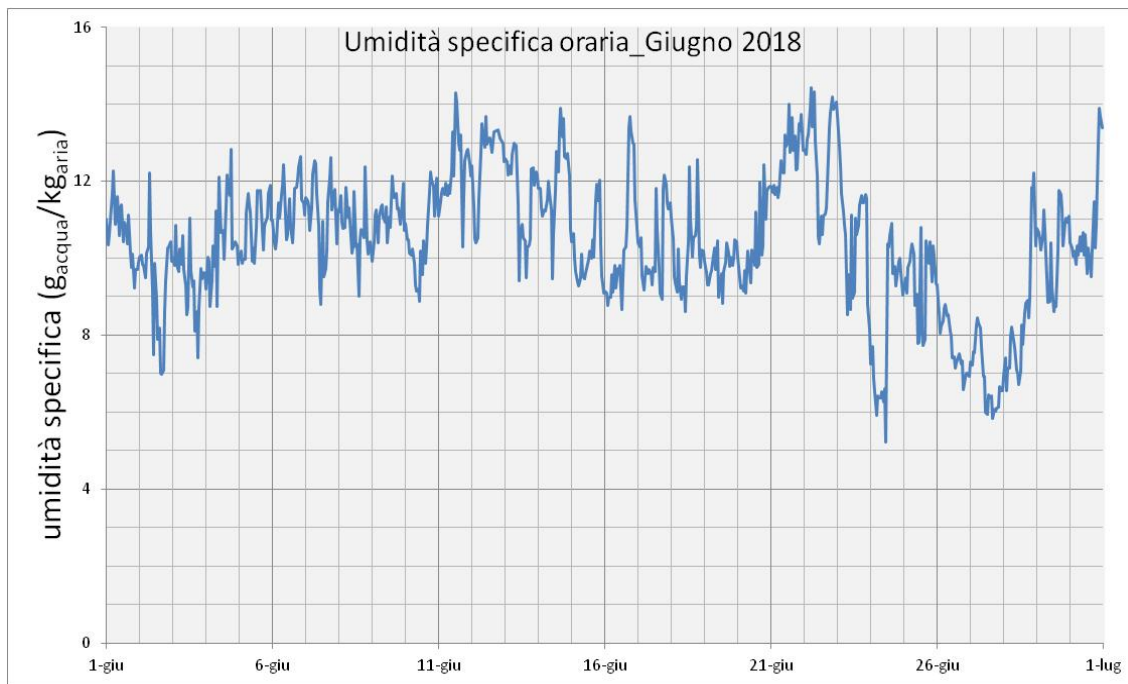


Figura 14

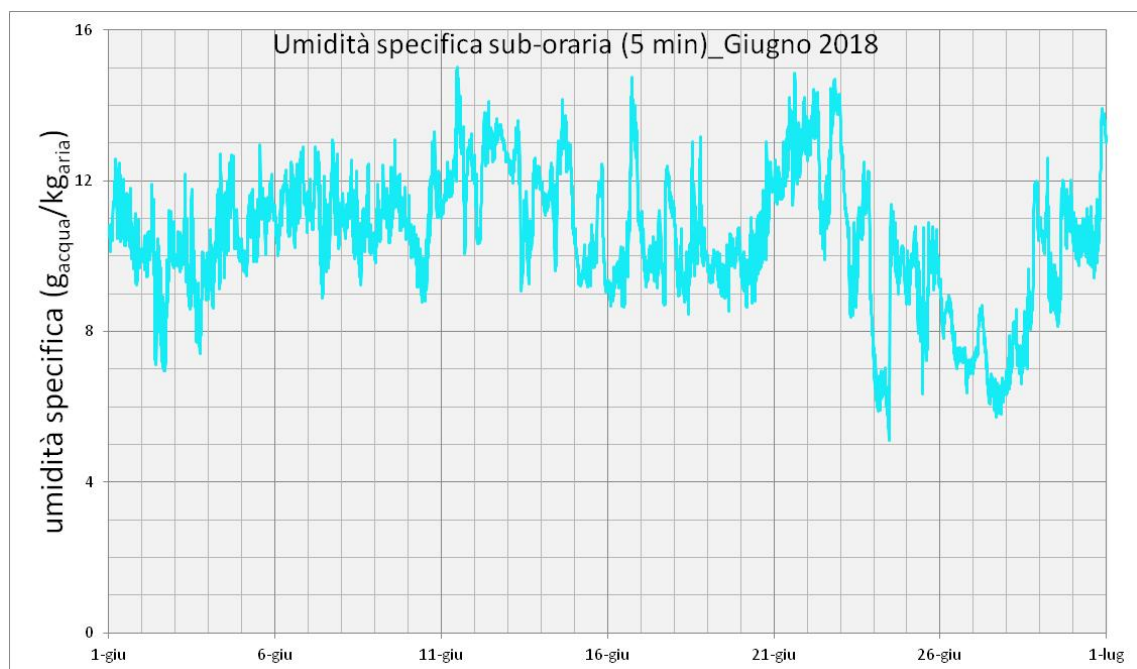


Figura 15

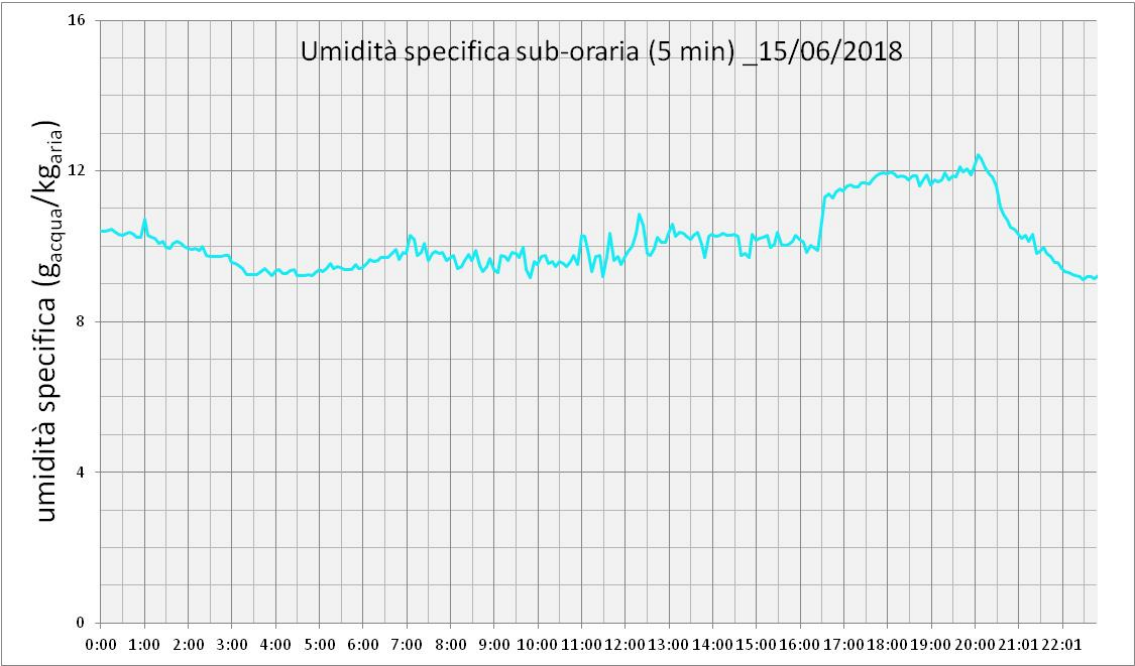


Figura 16

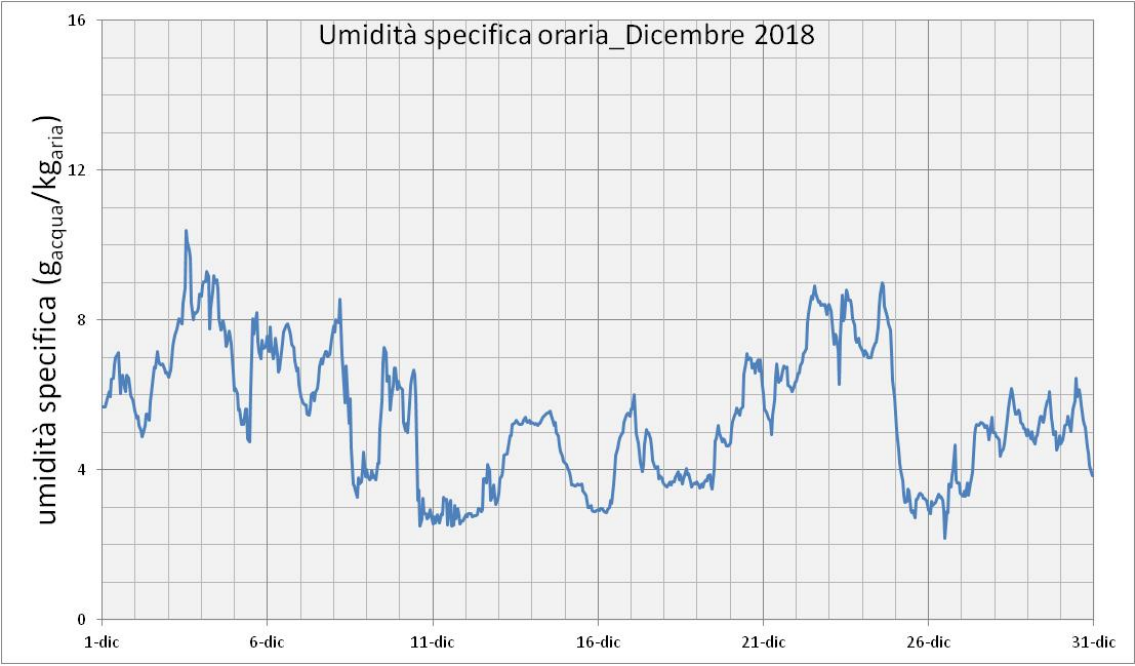


Figura 17

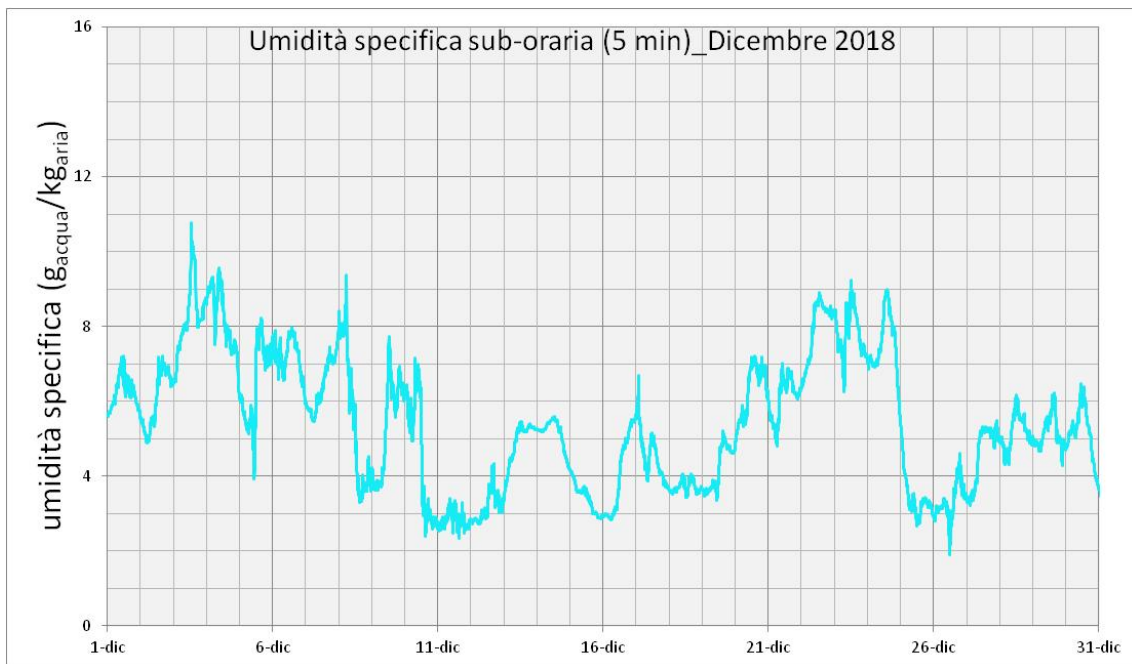


Figura 18

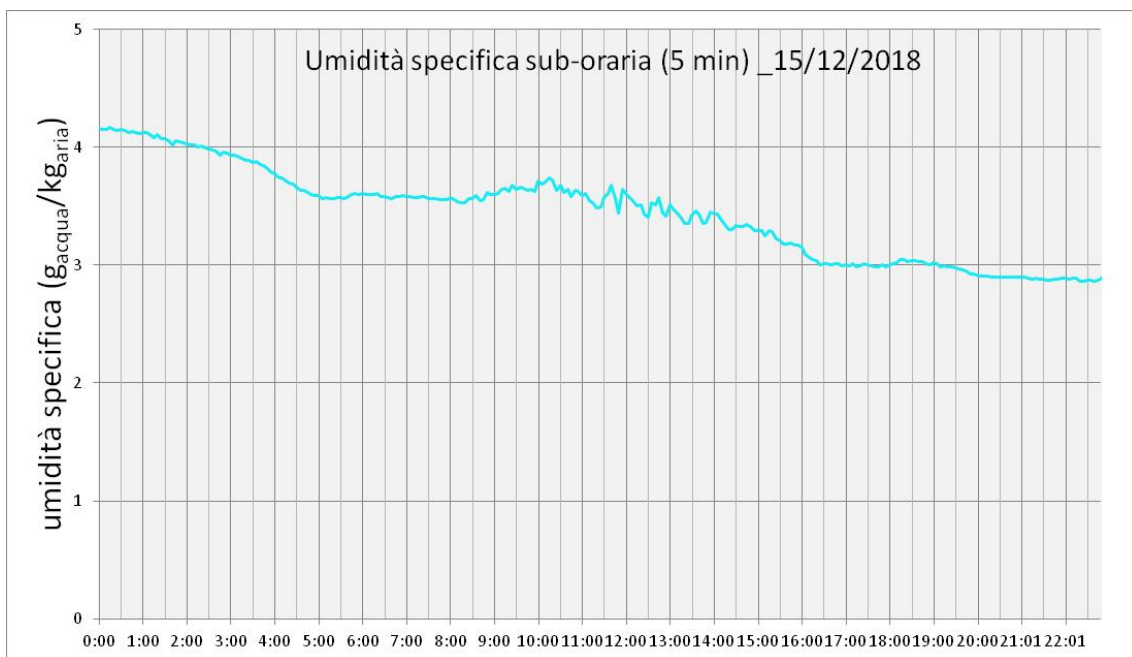


Figura 19

2.1.3 Irradianza solare

Nelle figure a seguire è riportato l'andamento temporale dell'irradianza solare globale orizzontale relativa al periodo di misura 01/01/2018 - 31/12/2018 e i risultati dell'analisi statistica.

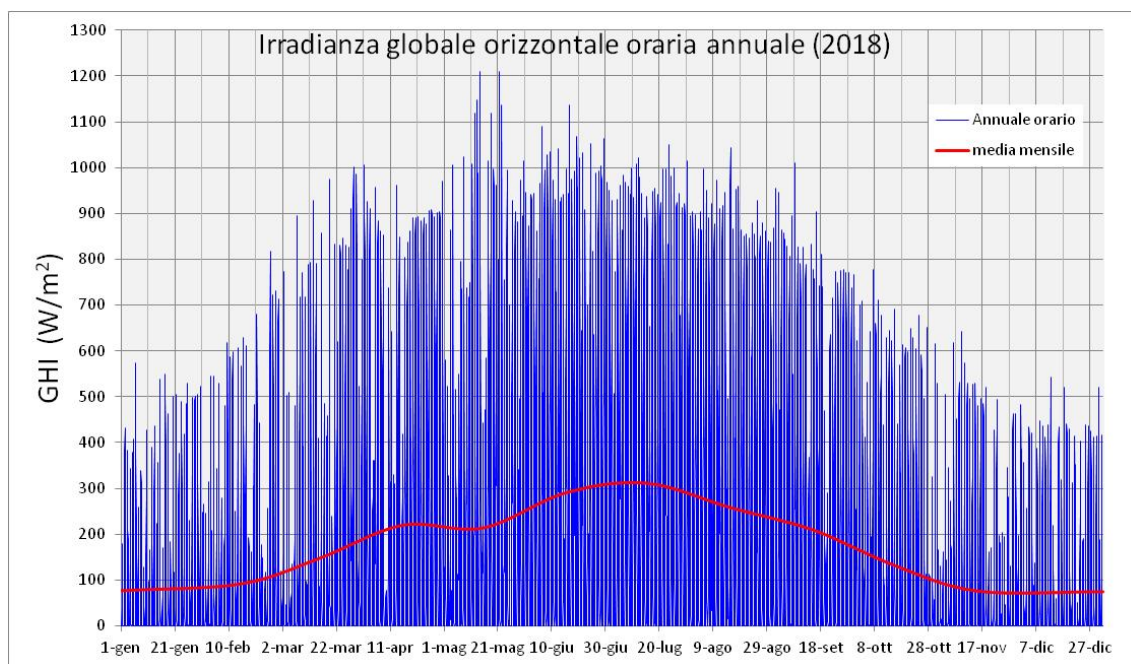


Figura 20

Valori di GHI anno 2018	
Media	175,43
Errore standard	2,88
Mediana	3,50
Moda	0,00
Deviazione standard	269,59
Varianza campionaria	72679,04
Curtosi	1,17
Asimmetria	1,52
Intervallo	1210,00
Minimo	0,00
Massimo	1210,00

Tabella 5

Come esempi di profili di irradianza globale orizzontale, si riportano quelli relativi ai mesi di febbraio e luglio; accanto agli andamenti orari mensili sono stati rappresentati anche quelli giornalieri per il 15 febbraio e il 15 luglio.

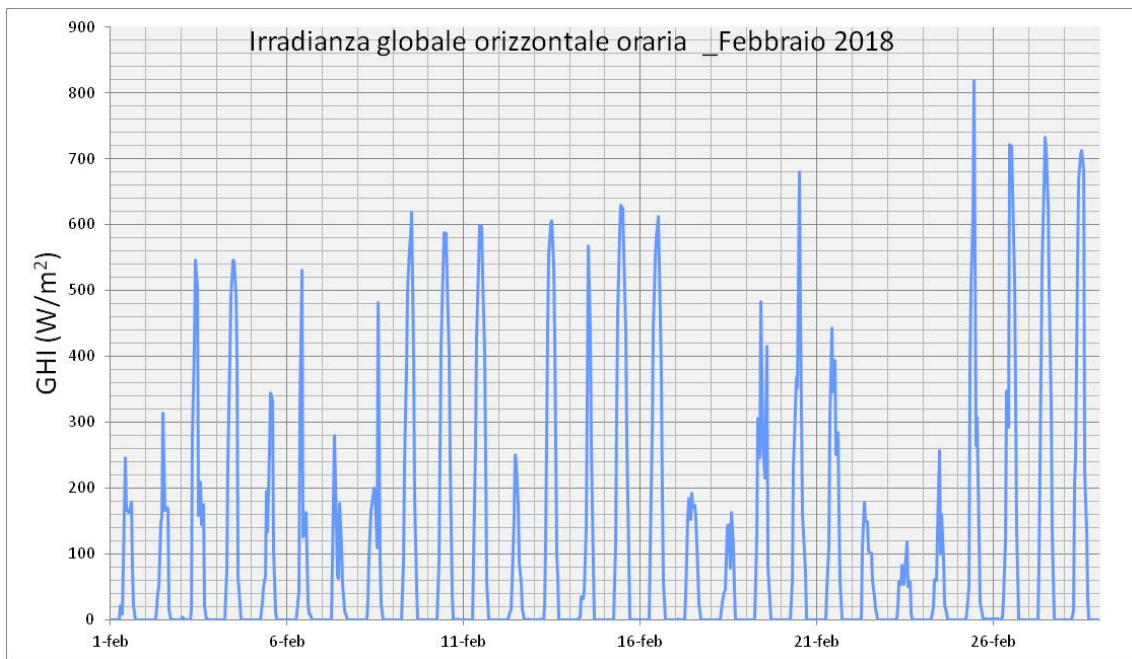


Figura 21

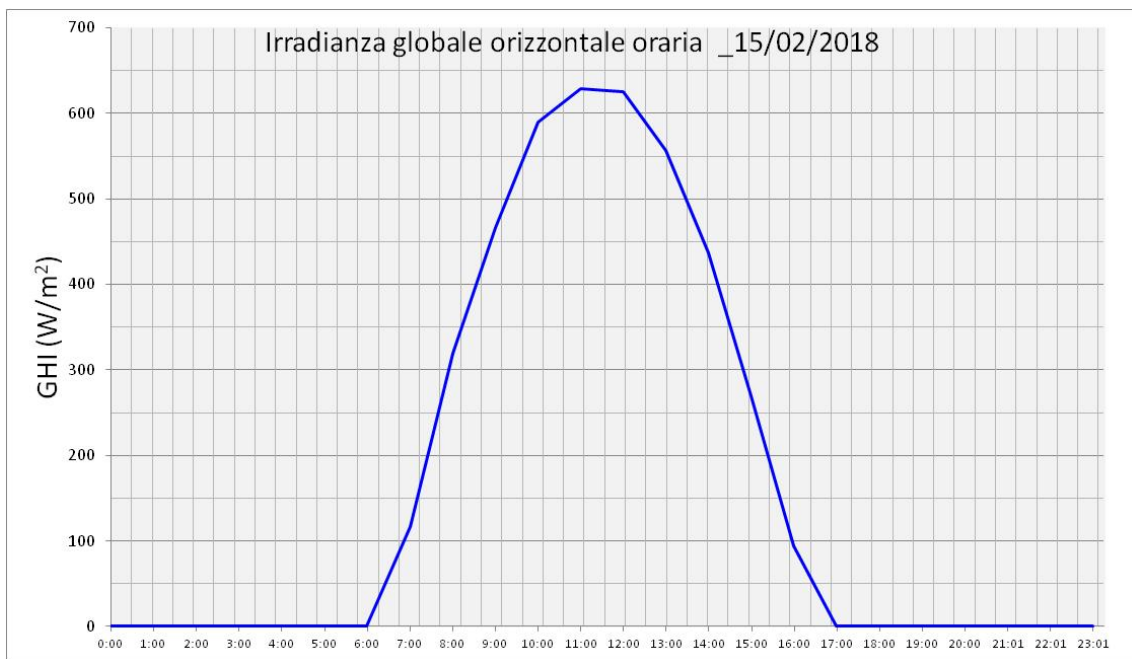


Figura 22

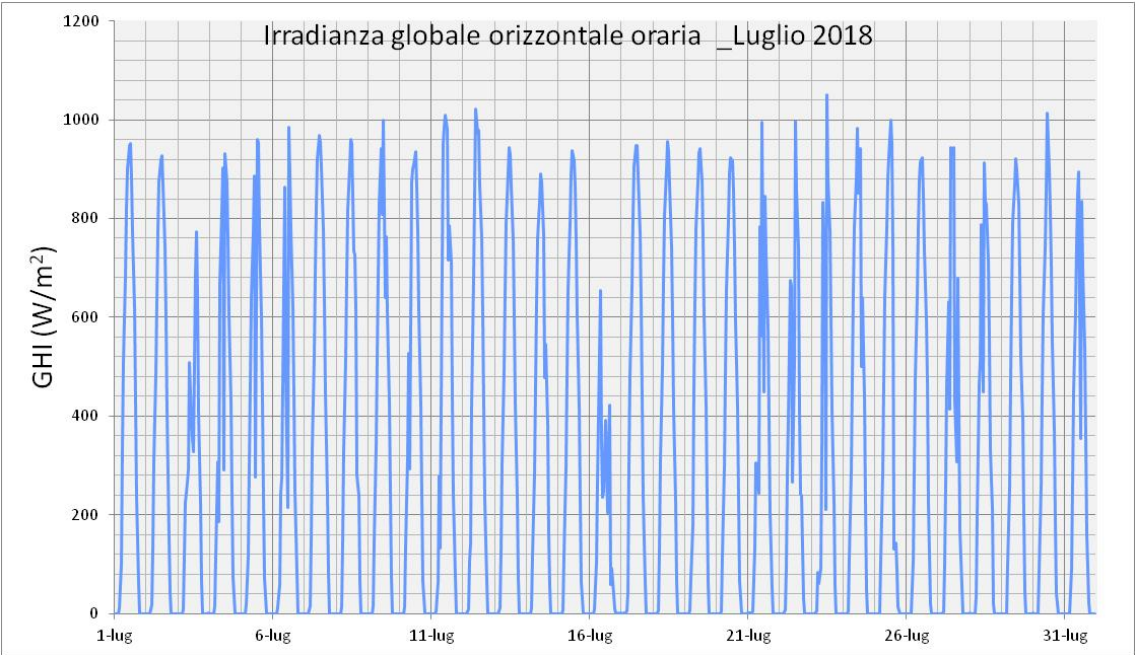


Figura 23

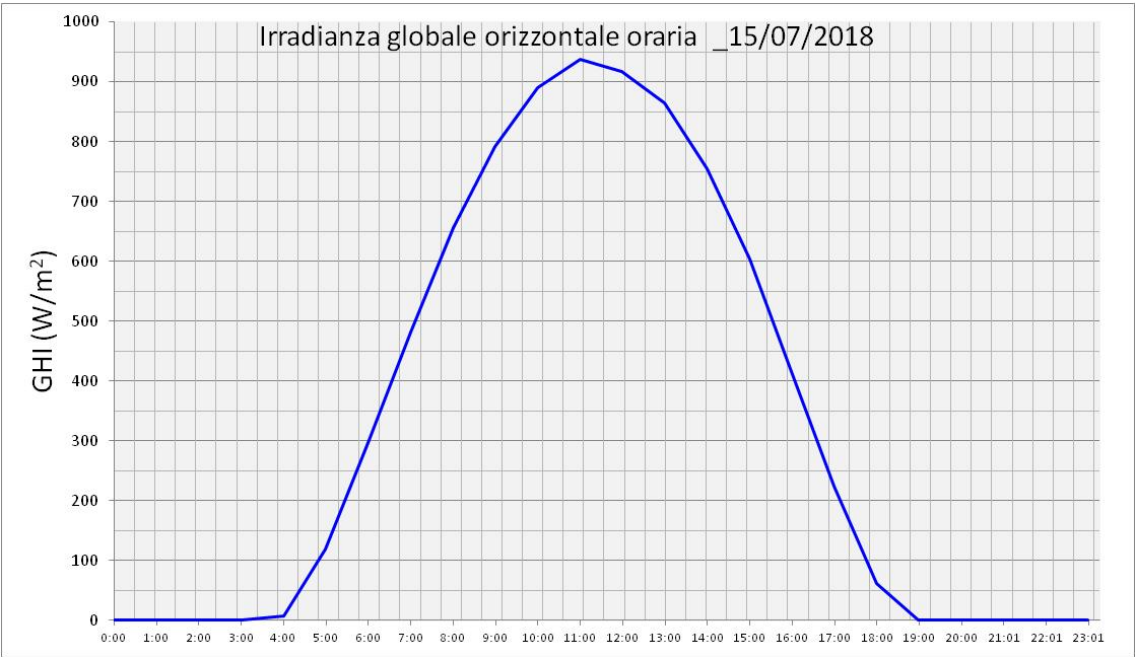


Figura 24

Valori di GHI anno 2018		
	Febbraio	Luglio
Media	99,74	307,41
Errore standard	6,85	13,45
Mediana	0,00	131,40
Moda	0,00	0,00
Deviazione standard	177,67	348,71
Varianza campionaria	31564,94	121596,49
Curtosi	2,81	-1,10
Asimmetria	1,95	0,68
Intervallo	818,00	1050,00
Minimo	0,00	0,00
Massimo	818,00	1050,00

Tabella 6

3.3 Distribuzioni in frequenza

Per inquadrare in termini sintetici i valori assunti su base annua dalle tre grandezze esaminate, si riportano di seguito le distribuzioni in frequenza, a scala oraria, espresse in termini di box plots. Si specifica che le irradianze riportate si riferiscono alle sole ore diurne.

Nei grafici sono riportati i range di non-outlier (whiskers), in funzione delle distribuzioni trovate in termini percentili (height box 25%-75%). Il valore centrale del box, esprime invece la mediana della distribuzione.

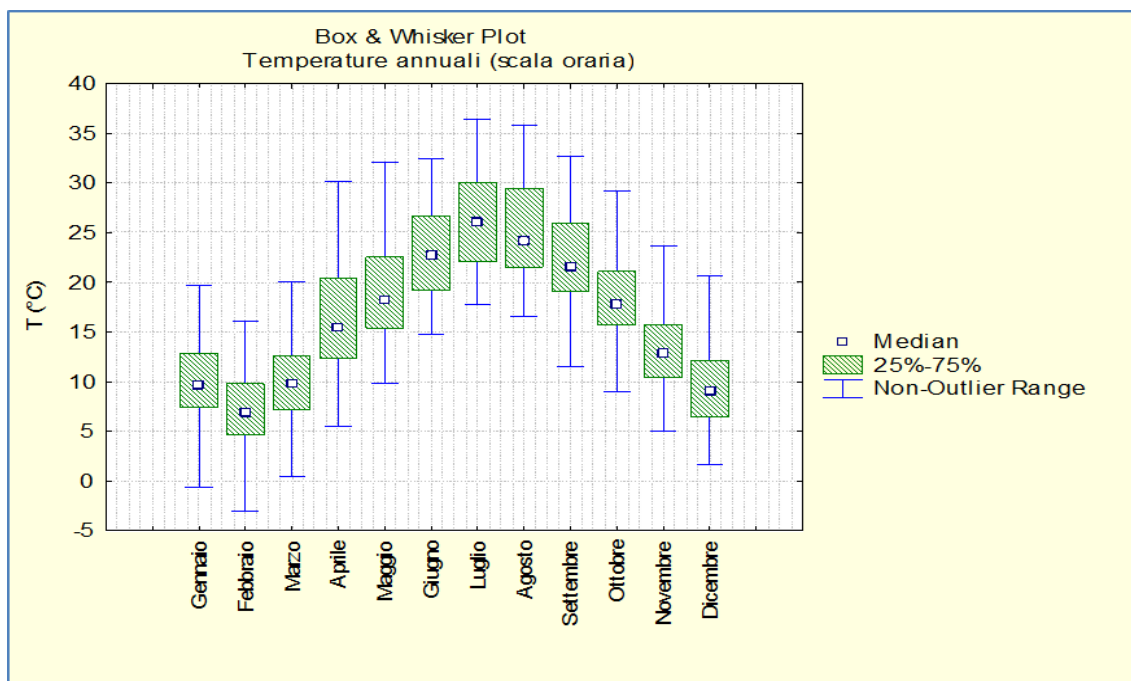


Figura 25

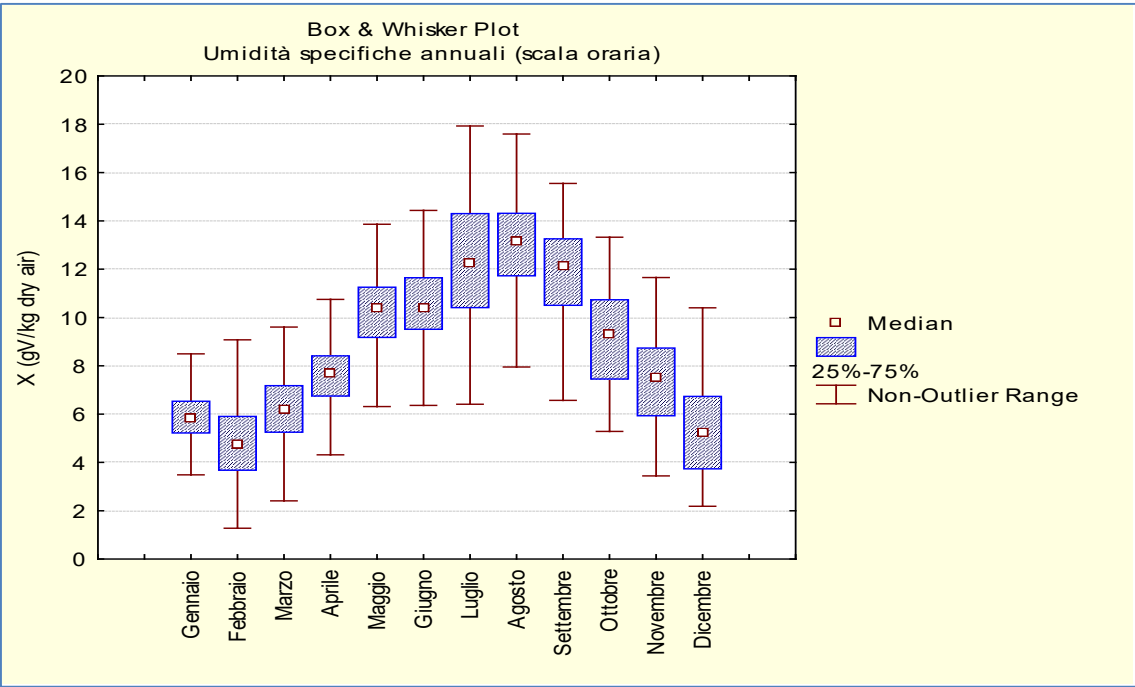


Figura 26

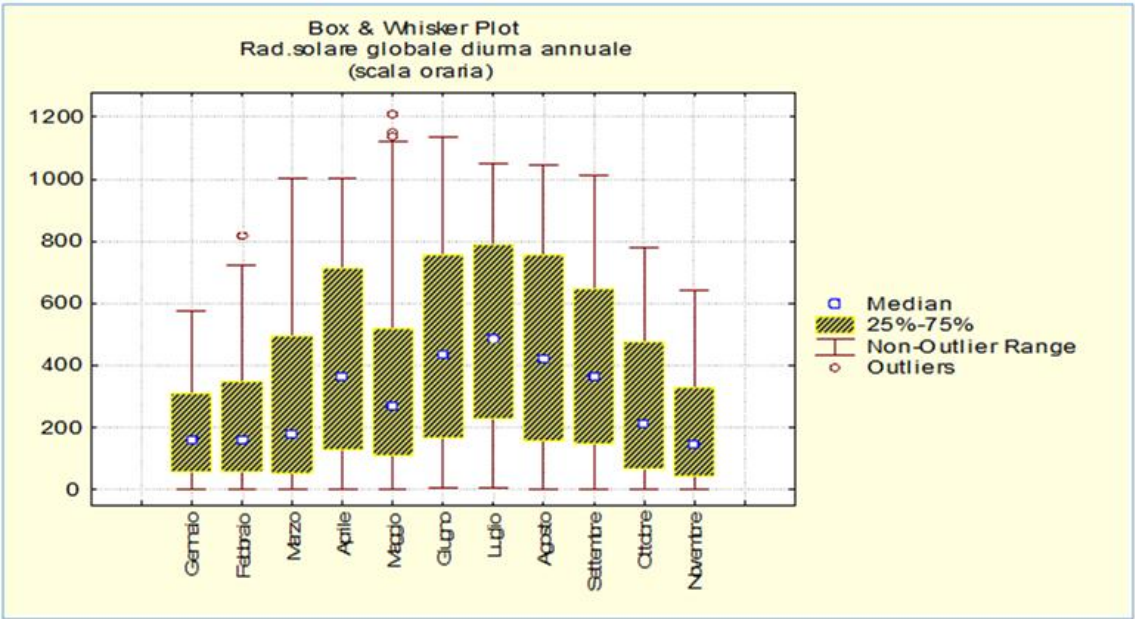


Figura 27 box-plot per i soli valori diurni

3 Analisi statistica della variabilità delle grandezze climatiche

L'analisi statistica delle serie temporali (*Time-series analysis*) di grandezze fisiche monitorate nel tempo rappresenta uno strumento di studio utilizzato in molteplici campi dell'ingegneria e delle scienze ambientali in genere.

Una serie temporale, anche detta *serie storica*, è infatti una successione di valori assunti da determinata grandezza nell'arco di un periodo di tempo (t) in cui essa è stata oggetto di monitoraggio.

La caratterizzazione statistica delle serie climatiche oggetto di studio è stata già in parte trattata nel precedente capitolo, in cui sono stati riportati i *Timeplot* tipici delle grandezze esaminate (*trend annuali mensili, giornalieri*), le distribuzioni in frequenza, nonché i principali indicatori statistici descrittivi.

Benché l'analisi dei profili tipo abbia già in parte evidenziato le caratteristiche di variabilità delle grandezze in esame, in questo capitolo sarà analizzato il grado di autocorrelazione dei dati disponibili, ai fini della scelta dei modelli di elaborazione da applicare successivamente. La variabilità temporale delle serie in esame sarà infatti rilevante per stabilire il metodo di disaggregazione dei dati a livello sub-orario.

Per le serie relative alle temperature e l'umidità specifica è stata analizzata l'autocorrelazione relativa a due mesi tipo e successivamente valutata la normalità dei dati.

Distintamente è stata invece trattata la radiazione solare, per evidenziare la variabilità delle tre componenti (*globale, diretta e diffusa*) in funzione delle condizioni di cielo e del periodo dell'anno in esame.

4.1 L'Autocorrelazione temporale per le temperature e l'umidità specifica

L'autocorrelazione definisce il grado di dipendenza lineare tra i dati di una serie, considerando diversi intervalli temporali. Senza addentrarsi in una trattazione statistica completa delle possibili analisi del grado di correlazione di una serie storica, vengono di seguito richiamati alcuni concetti basilari.

La funzione di autocorrelazione di una serie di misure, (*ACF Auto Correlation Function*), è indicativa della variabilità dei dati di una serie nel tempo: fornisce cioè una misura di quanto i dati siano mutuamente legati in un certo tempo.

Considerate N misure, $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, relative ad n intervalli temporali distinti $X_1, X_2, \dots, X_n$ in cui k è il lag temporale, cioè il numero di intervalli ad una certa scala, dal punto di vista analitico la funzione di autocorrelazione di una serie può essere espressa mediante la seguente relazione [18]:

$$r_k = \frac{Cov[k]}{Cov[0]} = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (Y_i - \bar{Y})(Y_{i+k} - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

In sostanza, fissato un certo lag temporale k, il valore di autocorrelazione $r(k)$ della serie $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ è ottenuto calcolando la correlazione tra la serie $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-k}\}$ e la serie $\{Y_{1+k}, \dots, Y_N\}$; ossia tra la serie in cui vengono eliminati gli ultimi k termini e quella ottenuta eliminando i primi k termini [14].

La funzione di autocorrelazione $\rho(k)$, così come definita, può assumere valori compresi tra -1 e 1.

Lo studio di tale funzione, particolarmente importante per le analisi preliminari delle serie storiche, consente di evidenziare la dipendenza dei dati calcolati ad un certo lag, e mostra quella che possiamo definire la "memoria" della serie, cioè quanto i dati in un determinato intervallo siano legati all'intervallo precedente.

Valori positivi di autocorrelazione, che tendono a ridursi lentamente nell'arco temporale considerato indicano un forte legame dei dati negli intervalli in esame, e di conseguenza una prevalenza del trend della serie, rispetto ad altre componenti statistiche [14]. Se i valori della serie variano lentamente nel tempo infatti, la ACF nei diversi intervalli assumerà dei valori molto simili e di segno positivo.

Al contrario, se essi variano rapidamente, il valore della funzione risulterà molto variabile e potrà rapidamente assumere segno 0, o valori negativi: in tal caso la serie in esame sarebbe poco autocorrelata nell'arco temporale considerato.

È importante sottolineare che il valore del lag scelto può influire sulla dipendenza dei dati: in genere la dipendenza tende ad essere meno accentuata al crescere dell'intervallo considerato, ma tale effetto potrebbe ridursi per serie di dati caratterizzate da accentuati fenomeni stagionali.

Nel caso delle serie temporali di Temperature ed Umidità specifica considerate in questo lavoro sono state considerate le autocorrelazioni relative a 4 scale temporali 5 minuti, 15 minuti, per due mesi tipo, indicativi del comportamento climatico estivo ed invernale: giugno e dicembre. Il numero di lag è stato definito per la scala temporale più breve 15 minuti, per coprire completamente l'arco orario, e mantenuto nelle analisi degli altri intervalli considerati.

Ai grafici delle funzioni ACF, sono stati aggiunti i test statistici, **test di Ljung-Box**, per la verifica analitica dell'autocorrelazione della serie (lag12 equivalente ad un intervallo orario 1h a scala 5minuti). La statistica di test è fornita dalla relazione:

$$Q = n(n+2) \sum_{k=1}^h \frac{\widehat{r_k^2}}{n-k}$$

Nel test, l'ipotesi nulla (H_0) è che l'ACF per i lag considerati non sia significativamente diversa da zero, ossia che la serie storica non presenta un'autocorrelazione significativa.

In sintesi:

$H_0: a = 0$ assenza di autocorrelazione per i lag in esame

$H_1: a \neq 0$ presenza di autocorrelazione per i lag in esame

I valori della probabilità associati al test sono di seguito riassunti:

- P-value > 0,05 consentono di accettare l'ipotesi nulla
- P-value < 0,05 consentono di respingere l'ipotesi nulla

Valori maggiori di 0,05 (livello di significatività fissato) del P-value associato al test consentono di accettare l'ipotesi nulla H_0 , e considerare la serie non significativamente autocorrelata per i lag esaminati. In questo caso, l'errore che si commetterebbe nel non rigettare H_0 quando questa è falsa ha probabilità abbastanza elevata.

Quando invece il P-value < 0,05, il test consente di respingere l'ipotesi nulla H_0 e la serie risulterà significativamente autocorrelata per i lag testati. In questo caso l'errore che si commetterebbe nel rigettare H_0 quando questa è vera ha probabilità molto esigua

Si riportano di seguito i grafici delle funzioni di autocorrelazione ottenuti per il mese di Giugno 2018 rispettivamente a scala temporale di 5 minuti, 15 minuti, 30 minuti, 1h (vedi Figure 28 e 29).

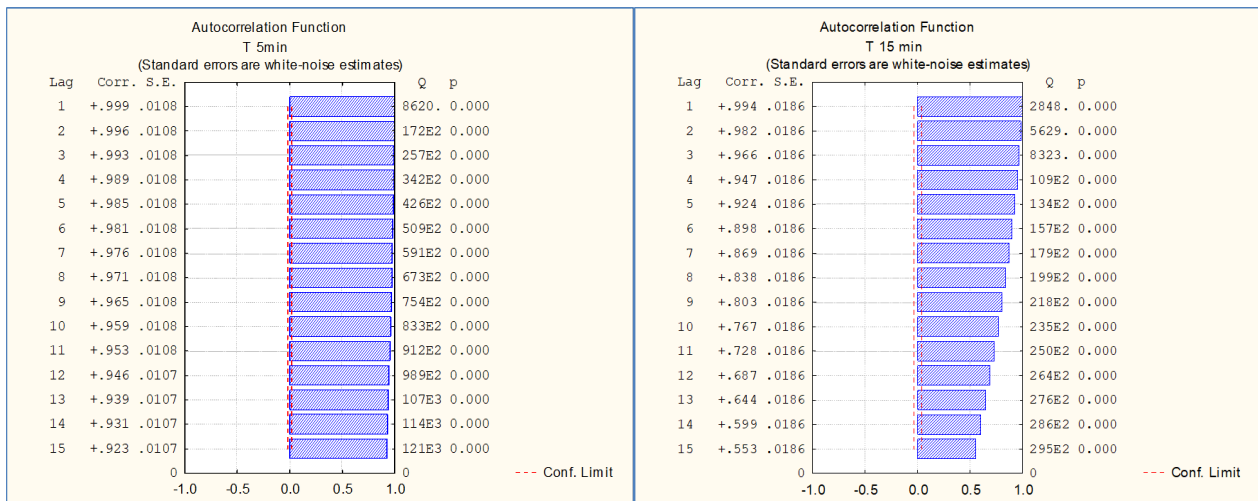


Figura 28

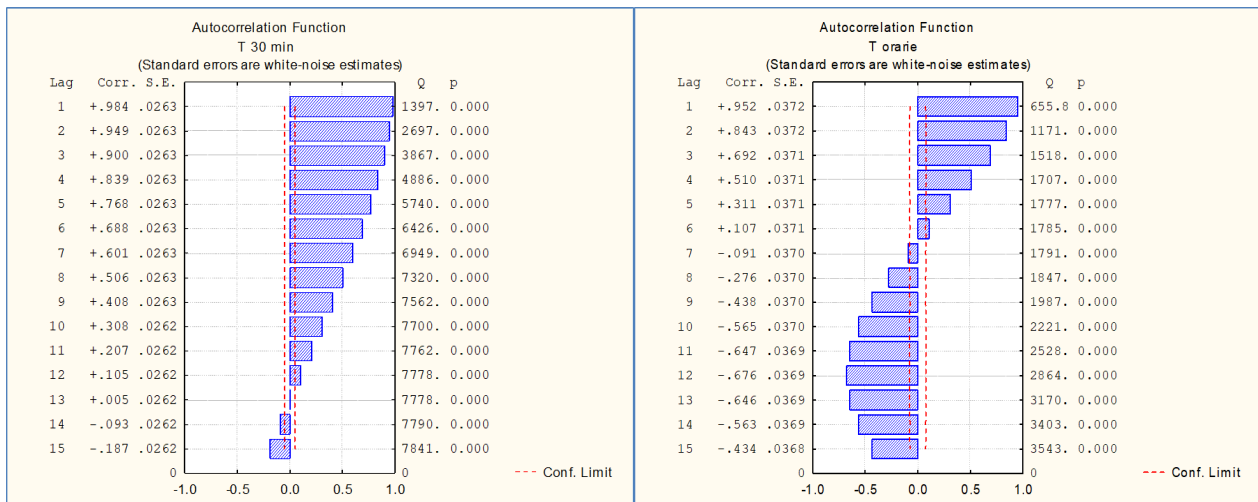


Figura 29

Di seguito le tabelle con i valori del test statistico di Ljung-Box che confermano quanto evidenziato

T 5min Giugno					T 15min Giugno				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.996	0.011	8620.1	0.00	1	0.994	0.019	2848.0	0.00
2	0.996	0.011	17196.4	0.00	2	0.982	0.019	5629.1	0.00
3	0.993	0.011	25720.0	0.00	3	0.966	0.019	8322.6	0.00
4	0.989	0.011	34183.8	0.00	4	0.947	0.019	10910.6	0.00
5	0.985	0.011	42580.6	0.00	5	0.924	0.019	13376.6	0.00
6	0.981	0.011	50903.3	0.00	6	0.898	0.019	15705.8	0.00
7	0.976	0.011	59145.6	0.00	7	0.869	0.019	17888.7	0.00
8	0.971	0.011	67300.3	0.00	8	0.838	0.019	19916.3	0.00
9	0.965	0.011	75360.3	0.00	9	0.803	0.019	21782.0	0.00
10	0.959	0.011	83320.4	0.00	10	0.767	0.019	23481.8	0.00
11	0.953	0.011	91175.4	0.00	11	0.728	0.019	25013.7	0.00
12	0.946	0.011	98920.0	0.00	12	0.687	0.019	26378.3	0.00

Tabella 7

T 30min Giugno					T orarie Giugno				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.984	0.026	1397.0	0.00	1	0.952	0.037	655.8	0.00
2	0.949	0.026	2696.9	0.00	2	0.843	0.037	1170.8	0.00
3	0.900	0.026	3867.3	0.00	3	0.692	0.037	1517.8	0.00
4	0.839	0.026	4886.2	0.00	4	0.510	0.037	1706.5	0.00
5	0.768	0.026	5740.3	0.00	5	0.311	0.037	1776.7	0.00
6	0.688	0.026	6426.1	0.00	6	0.107	0.037	1785.1	0.00
7	0.601	0.026	6948.7	0.00	7	-0.091	0.037	1791.2	0.00
8	0.506	0.026	7320.4	0.00	8	-0.276	0.037	1847.0	0.00
9	0.408	0.026	7562.0	0.00	9	-0.438	0.037	1987.3	0.00
10	0.308	0.026	7699.7	0.00	10	-0.565	0.037	2221.3	0.00
11	0.207	0.026	7761.6	0.00	11	-0.647	0.037	2528.2	0.00
12	0.105	0.026	7777.7	0.00	12	-0.676	0.037	2863.6	0.00

Tabella 8

Si riportano di seguito i grafici delle funzioni di autocorrelazione ottenuti per il mese di Dicembre 2018 rispettivamente a scala temporale di 5 minuti, 15 minuti, 30 minuti, 1h (vedi Figure 30 e 31).

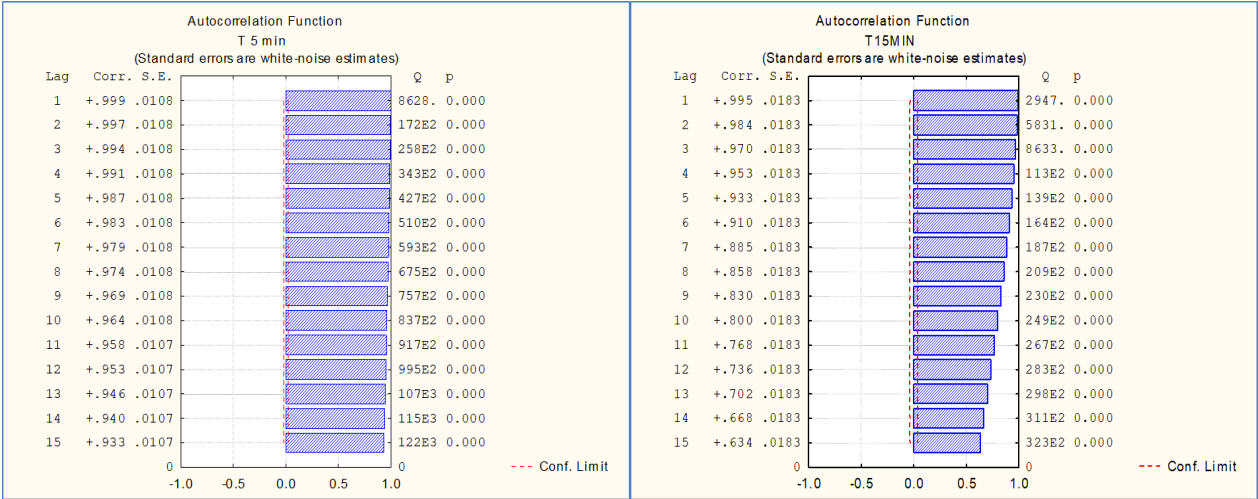


Figura 30

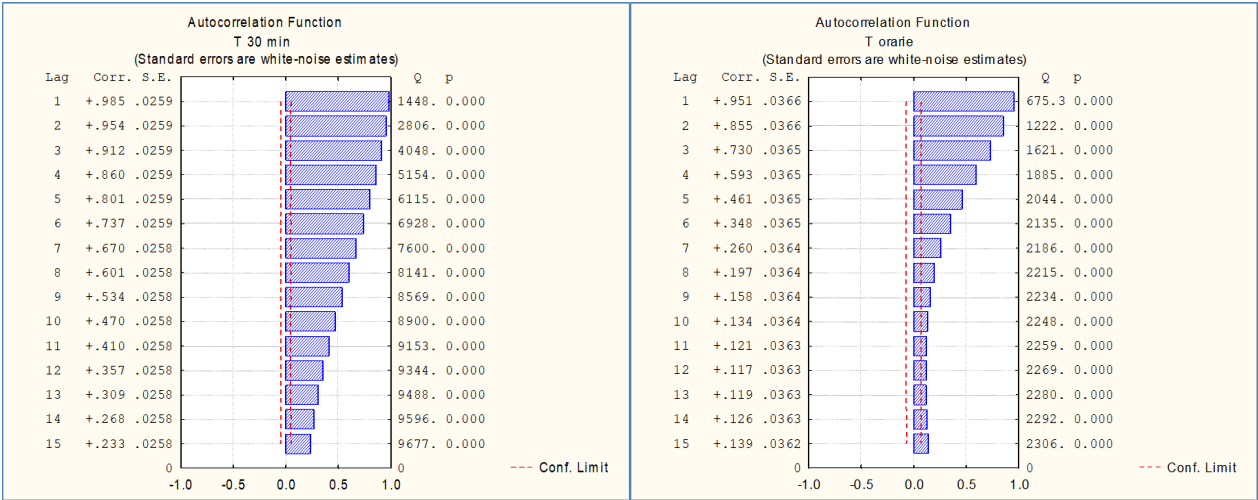


Figura 31

T 5min Dicembre					T 15min Dicembre				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.999	0.011	8627.8	0.00	1	0.9947	0.0183	2947.5	0.00
2	0.997	0.011	17218.9	0.00	2	0.9837	0.0183	5830.9	0.00
3	0.994	0.011	25762.3	0.00	3	0.9695	0.0183	8632.9	0.00
4	0.991	0.011	34250.8	0.00	4	0.9525	0.0183	11338.6	0.00
5	0.987	0.011	42678.3	0.00	5	0.9327	0.0183	13933.8	0.00
6	0.983	0.011	51038.9	0.00	6	0.9103	0.0183	16406.5	0.00
7	0.979	0.011	59327.2	0.00	7	0.8855	0.0183	18747.0	0.00
8	0.974	0.011	67538.2	0.00	8	0.8585	0.0183	20947.7	0.00
9	0.969	0.011	75666.5	0.00	9	0.8298	0.0183	23004.6	0.00
10	0.964	0.011	83707.5	0.00	10	0.7998	0.0183	24916.0	0.00
11	0.958	0.011	91656.7	0.00	11	0.7684	0.0183	26680.7	0.00
12	0.953	0.011	99509.7	0.00	12	0.7359	0.0183	28299.9	0.00

Tabella 9

T 30min Dicembre					T orarie Dicembre				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.985	0.026	1447.5	0.00	1	0.951	0.037	675.3	0.00
2	0.954	0.026	2806.3	0.00	2	0.855	0.037	1221.9	0.00
3	0.912	0.026	4048.3	0.00	3	0.730	0.037	1621.1	0.00
4	0.860	0.026	5154.2	0.00	4	0.593	0.037	1884.7	0.00
5	0.801	0.026	6114.6	0.00	5	0.461	0.036	2044.3	0.00
6	0.737	0.026	6928.2	0.00	6	0.348	0.036	2135.3	0.00
7	0.670	0.026	7600.2	0.00	7	0.260	0.036	2186.0	0.00
8	0.601	0.026	8141.4	0.00	8	0.197	0.036	2215.3	0.00
9	0.534	0.026	8568.9	0.00	9	0.158	0.036	2234.2	0.00
10	0.470	0.026	8900.3	0.00	10	0.134	0.036	2247.8	0.00
11	0.410	0.026	9153.0	0.00	11	0.121	0.036	2258.8	0.00
12	0.357	0.026	9344.1	0.00	12	0.117	0.036	2269.1	0.00

Tabella 10

Si riportano di seguito i grafici delle funzioni di autocorrelazione, per l'Umidità specifica X, ottenuti per il mese di Giugno 2018 rispettivamente a scala temporale di 5 min, 15 min, 30min, 1h (vedi Figure 32 e 33).

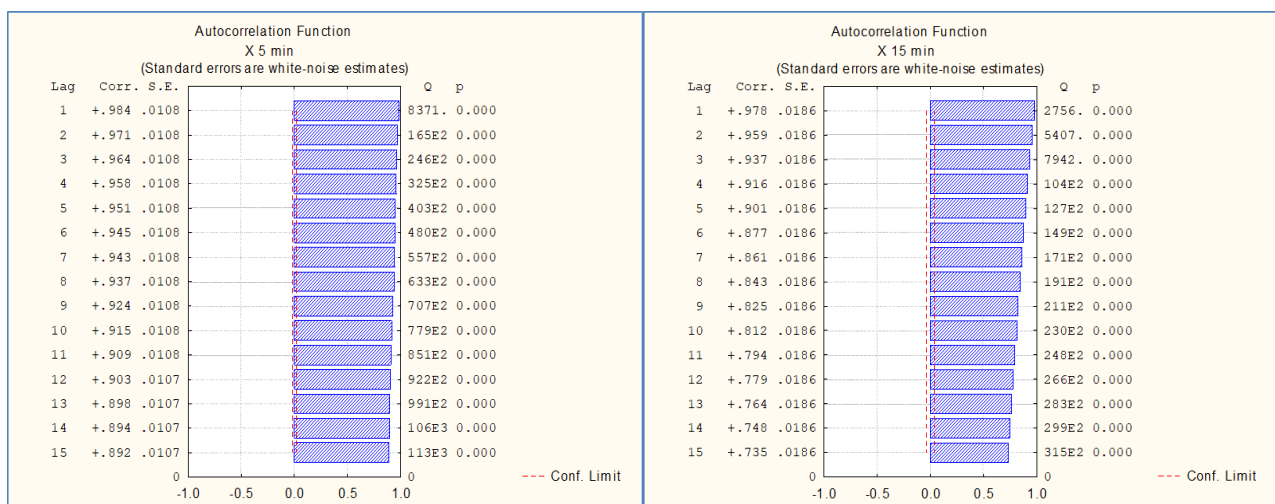


Figure 32

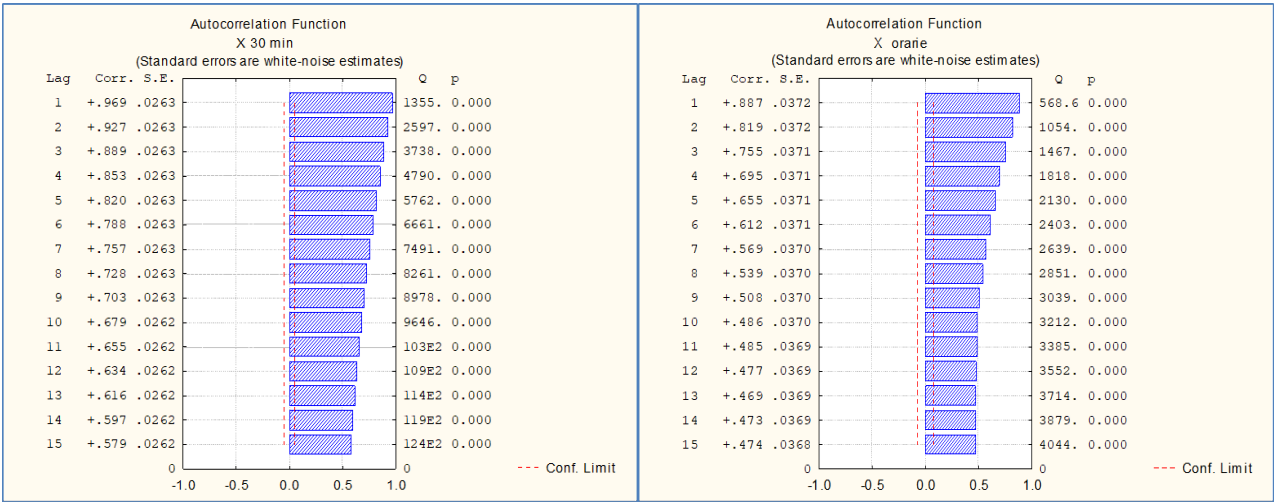


Figura 33

X 5min Giugno					X 15min Giugno				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.984	0.011	8371.3	0.00	1	0.978	0.019	2755.95	0.00
2	0.971	0.011	16521.9	0.00	2	0.959	0.019	5407.40	0.00
3	0.964	0.011	24554.8	0.00	3	0.937	0.019	7942.00	0.00
4	0.958	0.011	32484.8	0.00	4	0.916	0.019	10362.59	0.00
5	0.951	0.011	40304.4	0.00	5	0.901	0.019	12705.43	0.00
6	0.945	0.011	48029.9	0.00	6	0.877	0.019	14927.98	0.00
7	0.943	0.011	55722.6	0.00	7	0.861	0.019	17070.62	0.00
8	0.937	0.011	63310.8	0.00	8	0.843	0.019	19126.75	0.00
9	0.924	0.011	70697.6	0.00	9	0.825	0.019	21095.71	0.00
10	0.915	0.011	77945.4	0.00	10	0.812	0.019	23002.65	0.00
11	0.909	0.011	85092.9	0.00	11	0.794	0.019	24824.25	0.00
12	0.903	0.011	92155.0	0.00	12	0.779	0.019	26581.51	0.00

Tabella 11

X 30min Giugno					X orarie Giugno				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.969	0.026	1354.70	0.00	1	0.887	0.037	568.649	0.00
2	0.927	0.026	2596.53	0.00	2	0.819	0.037	1053.745	0.00
3	0.889	0.026	3738.25	0.00	3	0.755	0.037	1467.260	0.00
4	0.853	0.026	4789.75	0.00	4	0.695	0.037	1818.245	0.00
5	0.820	0.026	5761.57	0.00	5	0.655	0.037	2130.307	0.00
6	0.788	0.026	6660.65	0.00	6	0.612	0.037	2402.580	0.00
7	0.757	0.026	7491.46	0.00	7	0.569	0.037	2638.881	0.00
8	0.728	0.026	8260.64	0.00	8	0.539	0.037	2850.839	0.00
9	0.703	0.026	8977.76	0.00	9	0.508	0.037	3039.381	0.00
10	0.679	0.026	9646.26	0.00	10	0.486	0.037	3212.271	0.00
11	0.655	0.026	10269.44	0.00	11	0.485	0.037	3385.011	0.00
12	0.634	0.026	10854.64	0.00	12	0.477	0.037	3552.123	0.00

Tabella 12

Si riportano di seguito i grafici delle funzioni di autocorrelazione, per l'Umidità specifica X, ottenuti per il mese di Dicembre 2018 rispettivamente a scala temporale di 5 min, 15 min, 30min, 1h (vedi Figure 34 e 35).

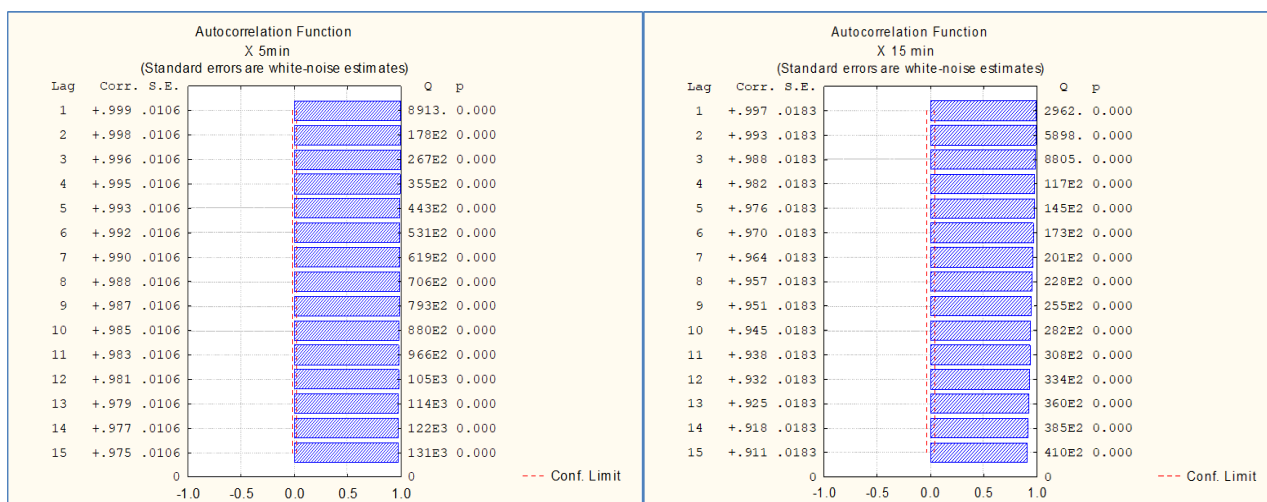


Figura 34

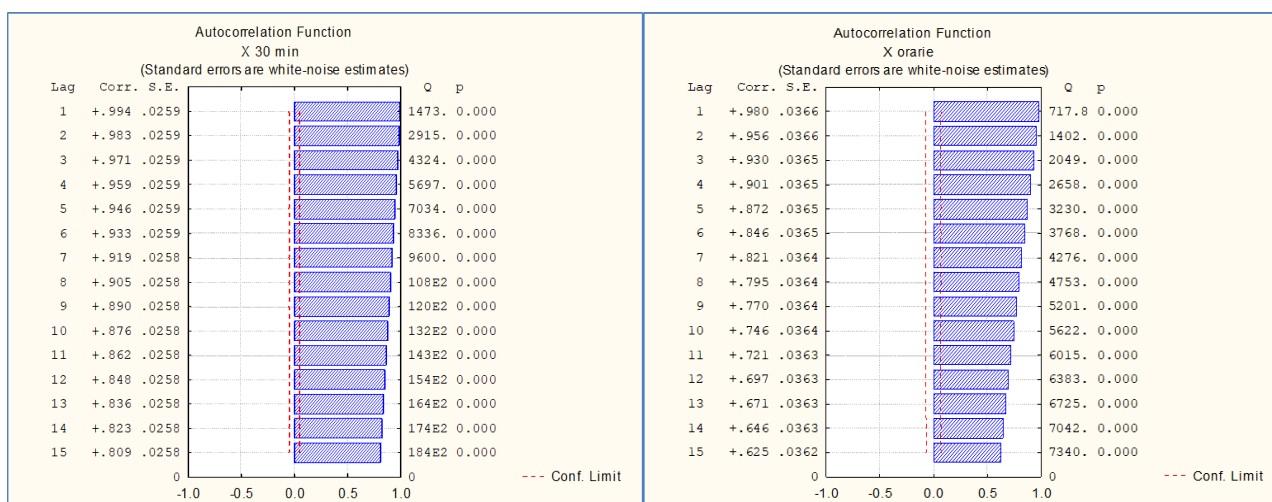


Figura 35

X 5min Dicembre					X 15min Dicembre				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.999	0.011	8912.8	0.00	1	0.997	0.018	2961.78	0.00
2	0.998	0.011	17802.4	0.00	2	0.993	0.018	5897.83	0.00
3	0.996	0.011	26667.6	0.00	3	0.988	0.018	8805.22	0.00
4	0.995	0.011	35507.3	0.00	4	0.982	0.018	11680.70	0.00
5	0.993	0.011	44322.0	0.00	5	0.976	0.018	14522.89	0.00
6	0.992	0.011	53110.2	0.00	6	0.970	0.018	17330.94	0.00
7	0.990	0.011	61871.4	0.00	7	0.964	0.018	20103.63	0.00
8	0.988	0.011	70604.3	0.00	8	0.957	0.018	22840.57	0.00
9	0.987	0.011	79306.6	0.00	9	0.951	0.018	25542.57	0.00
10	0.985	0.011	87977.5	0.00	10	0.945	0.018	28209.46	0.00
11	0.983	0.011	96616.5	0.00	11	0.938	0.018	30840.74	0.00
12	0.981	0.011	105223.2	0.00	12	0.932	0.018	33435.65	0.00

Tabella 13

X 30min Dicembre					X orarie Dicembre				
Lag	Autocorrelation Function				Lag	Autocorrelation Function			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p		Auto-Corr.	Std.Err.	Box & Ljung Q	p
1	0.996	0.011	8620.1	0.00	1	0.994	0.019	2848.0	0.00
2	0.996	0.011	17196.4	0.00	2	0.982	0.019	5629.1	0.00
3	0.993	0.011	25720.0	0.00	3	0.966	0.019	8322.6	0.00
4	0.989	0.011	34183.8	0.00	4	0.947	0.019	10910.6	0.00
5	0.985	0.011	42580.6	0.00	5	0.924	0.019	13376.6	0.00
6	0.981	0.011	50903.3	0.00	6	0.898	0.019	15705.8	0.00
7	0.976	0.011	59145.6	0.00	7	0.869	0.019	17888.7	0.00
8	0.971	0.011	67300.3	0.00	8	0.838	0.019	19916.3	0.00
9	0.965	0.011	75360.3	0.00	9	0.803	0.019	21782.0	0.00
10	0.959	0.011	83320.4	0.00	10	0.767	0.019	23481.8	0.00
11	0.953	0.011	91175.4	0.00	11	0.728	0.019	25013.7	0.00
12	0.946	0.011	98920.0	0.00	12	0.687	0.019	26378.3	0.00

Tabella 14

In tutti i casi analizzati i valori di ACF si dimostrano positivi ed elevati nell'arco orario, evidenziando un alto grado di correlazione lineare tra i dati della serie. I test statistici di Ljung-Box riportati in seguito confermano tale risultato, mostrando in tutti i casi valori di P-value molto prossimi allo zero.

L'autocorrelazione mostrata sia per la temperatura sia per l'umidità specifica, analizzate in un mese tipo, invernale (Dicembre) ed estivo (Giugno), conferma la ridotta variabilità delle due grandezze nell'intervallo orario, già in parte evidente dall'analisi dei *timeplots* temporali analizzati nei capitoli precedenti.

4.2 Normality Test per le temperature e l'umidità specifica

Può essere inoltre di interesse completare l'analisi statistica delle misure in esame verificando quanto la distribuzione dei dati disponibili sia assimilabile a distribuzioni normali. Tale aspetto può essere rilevante ai fini di ulteriori analisi e test sulle grandezze considerate.

Tra le diverse metodologie, grafiche ed analitiche, disponibili per la verifica statistica di normalità di una serie dati, è stata utilizzato il test di Saphiro-Wilk, di tipo non parametrico, per il quale valgono le seguenti assunzioni

$$H_0: a = 0 \text{ distribuzione normale}$$

$$H_1: a \neq 0 \text{ distribuzione non riconducibile alla normale}$$

I valori della probabilità associati al test sono di seguito riassunti:

- P-value > 0,05 consentono di accettare l'ipotesi nulla, di distribuzione normale
- P-value < 0,05 consentono di respingere l'ipotesi nulla

La verifica di normalità della distribuzione delle serie in esame è stata effettuata su gli stessi mesi tipo, Giugno e Dicembre, considerando i dati a scala oraria

Nelle figure e nelle tabelle a seguire vengono riportati i Normality test per i dati orari relativi alla Temperature e all' Umidità specifica per i mesi di Giugno e Dicembre 2018.

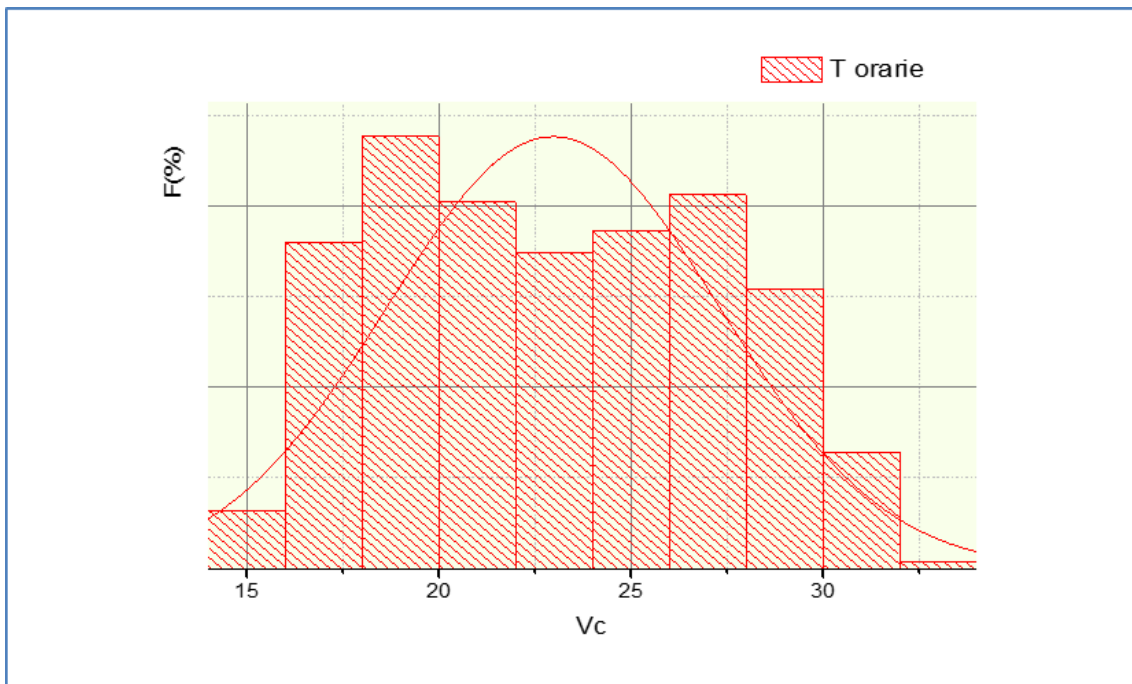


Figura 36

Mese: Giugno	DF	Statistic S-W test	P-value	Decision at level (5%)
T orarie	720	0.9636	2.25E-12	Reject normality

Tabella 15

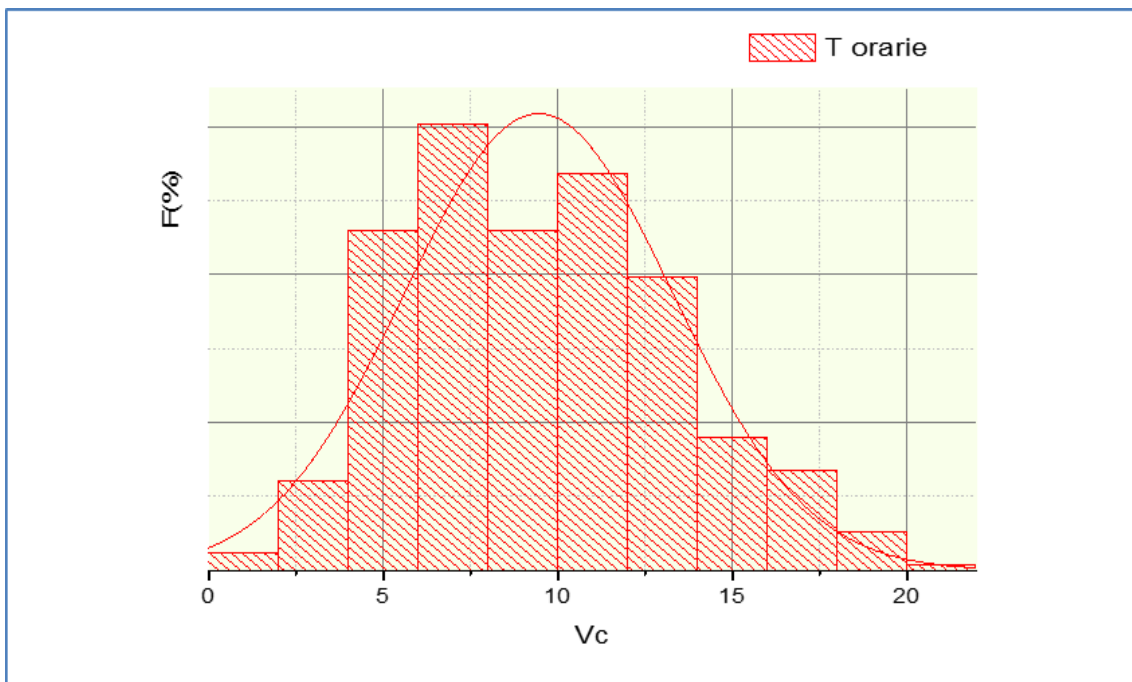


Figura 37

Mese: Giugno	DF	Statistic S-W test	P-value	Decision at level (5%)
T orarie	744	0.9812	1.49E-08	Reject normality

Tabella 16

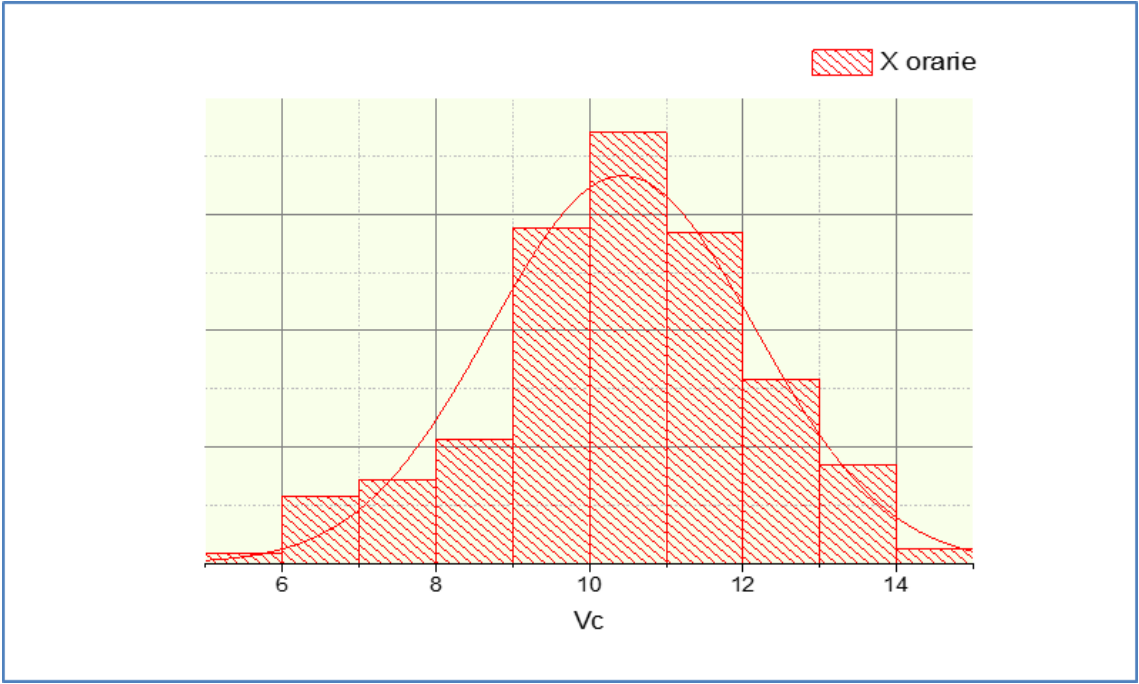


Figura 38

Mese: Giugno	DF	Statistic S-W test	P-value	Decision at level (5%)
T orarie	720	0.9857	1.72E-06	Reject normality

Tabella 17

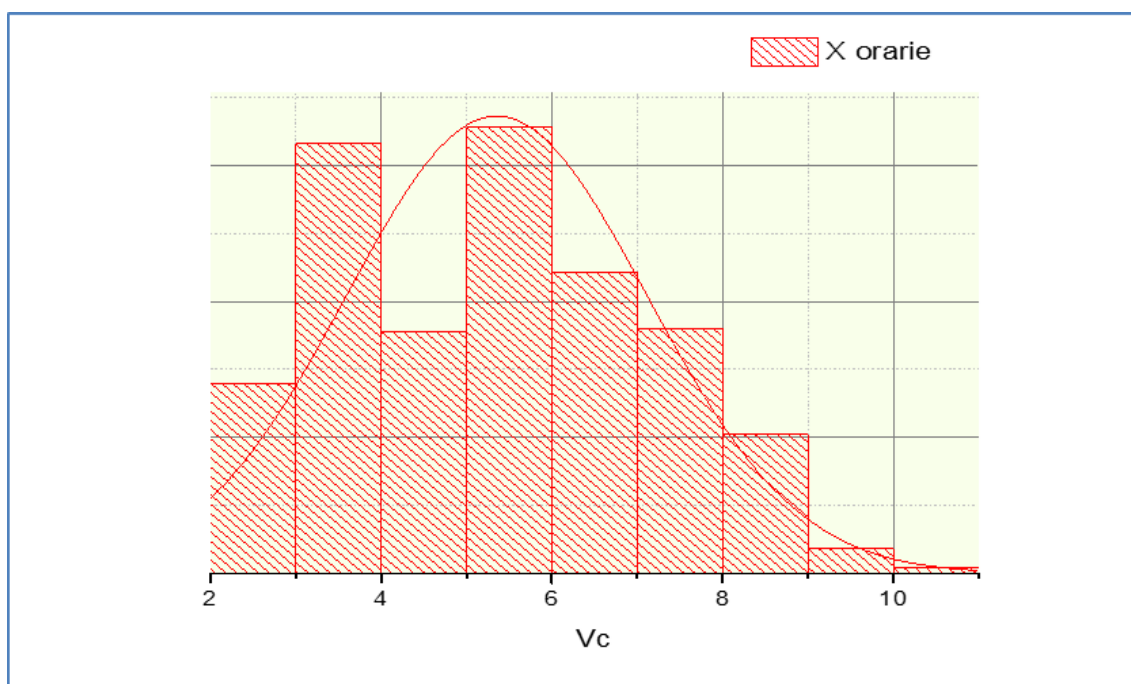


Figura 39

<i>Mese: Giugno</i>	<i>DF</i>	<i>Statistic S-W test</i>	<i>P-value</i>	<i>Decision at level (5%)</i>
T orarie	744	0.9655	3.12E-12	Reject normality

Tabella 18

Come evidente dai grafici, e dai test eseguiti, la distribuzione dei mesi tipo (relativi alla temperatura e l'umidità non risulta assimilabile a distribuzioni di tipo normale

Il normality test è stato in seguito eseguito anche per l'intero campione annuale delle temperature, ricorrendo in questo caso al Test di Lillefors, a sua volta basato su quello di Kolmogorov-Smirnov. Tali test sono infatti più idonei per elevata numerosità del campione in esame.

Senza entrare nelle specificità statistiche dei suddetti test, per le quali si rimanda a testi di riferimento si riportano le assunzioni di base, che sono sostanzialmente analoghe a quelle già esposte:

$$H_0: a = 0 \text{ distribuzione normale}$$

$$H_1: a \neq 0 \text{ distribuzione non riconducibile alla normale}$$

Per i valori di P-value valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza.

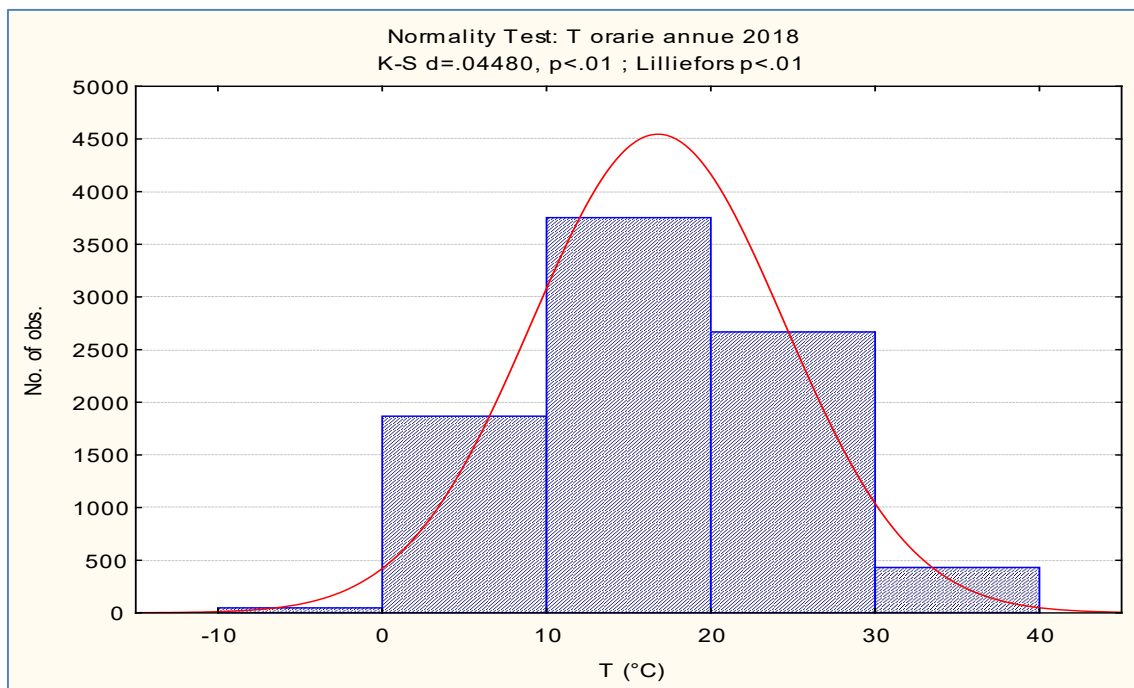


Figura 40

Anche in questo caso, analizzando l'intero campione annuale di dati a livello orario seppur con valori diversi, la distribuzione risulta non assimilabile ad una distribuzione normale. Risultati analoghi sono stati ottenuti per le umidità, su base annuali, che per motivi di sintesi non sono stati riportati nel report.

4.3 La variabilità della radiazione solare

L'*irradianza* solare è la misura della potenza trasportata dai raggi solari che incide sull'unità di superficie e si misura in watt al metro quadro (W/m^2). Si associa a un istante dato, ma può essere integrata nel tempo per calcolare invece l'energia che incide l'unità di superficie (*irradiazione*), che viene misurata in joule al metro quadro (J/m^2), che è l'unità prevista nel Sistema Internazionale, oppure in wattora – o il multiplo kilowattora – al metro quadro (kWh/m^2), più usata in ambito tecnico. A parità di potenza trasportata dai raggi solari, quella depositata sulla superficie ricevente dipende dall'angolo d'incidenza che i raggi stessi formano con la superficie stessa: si parla allora d'irradianza *orizzontale*, se la superficie è parallela con il suolo terrestre, oppure d'irradianza *normale* se la superficie ricevente è disposta perpendicolarmente alla direzione di arrivo dei raggi solari.

Il fenomeno radiativo presenta un'ulteriore complicazione legata al fatto che i raggi solari provenienti dal Sole sono in parte assorbiti e in parte deviati dalle molecole d'aria presenti nell'atmosfera. Pertanto, solo una frazione di essi raggiunge direttamente il suolo, la cosiddetta irradianza *diretta*, la quale ha la peculiarità di provenire da un'unica direzione, che cambia con continuità nel corso del giorno e corrisponde a quella in cui si trova il Sole istante per istante. Dall'intero emisfero della volta celeste invece giungono al suolo anche i raggi solari deviati in ogni direzione verso il basso dalle molecole dell'aria (irradianza *diffusa*). L'irradianza solare complessiva che giunge al suolo dopo aver attraversato l'atmosfera è data dalla somma delle irradianze diretta e diffusa ed è detta irradianza *globale*. Una misura del potere di attenuazione dell'irradianza solare in atmosfera è data dal rapporto:

$$K_T = \frac{I}{I_o} = \frac{GHI}{EHI}$$

In cui GHI è l'irradianza globale orizzontale (misurata al suolo), mentre la quantità EHI corrisponde all'irradianza extraatmosferica orizzontale, ovvero quella che si riscontra in cima all'atmosfera, dopo aver attraversato pressoché indenne lo spazio interplanetario fra Sole e Terra, e prima di essere attenuata nell'attraversare l'atmosfera terrestre. K_T è detto coefficiente di trasmissione globale (*Clearness Index*).

La radiazione solare costituisce la fonte energetica primaria degli impianti di potenza solari e pertanto è importante poterla stimare con accuratezza, in quanto non è una fonte stabile ma dipende sensibilmente dalla variabilità atmosferica indotta dalla presenza delle nubi: queste sono responsabili della sottrazione di una quota consistente dell'energia solare che attraversa l'atmosfera prima di giungere al suolo. Il coefficiente K_T si rivela un parametro utile per discriminare i momenti sereni (ossia quelli caratterizzati dalla totale assenza delle nubi) da quelli parzialmente o totalmente nuvolosi.

È necessario disporre di espressioni che correlano le irradianze (diretta normale, diffusa orizzontale e globale orizzontale) alle differenti condizioni del tempo atmosferico. Sono riassunti i diversi fattori che concorrono all'attenuazione della radiazione solare:

- la lunghezza effettiva del percorso dei raggi,
- il tipo e la densità delle molecole d'aria gassose incontrate durante il percorso,
- l'entità del vapore acqueo (umidità) e degli aerosol (micro-particelle solide inquinanti) presenti,
- l'intensità delle nubi.

Nella Figura 41 sono presentati due giorni consecutivi con una GHI misurata, al minuto e all'ora. I due giorni sono il 13 e 14 gennaio 2018; il primo giorno ha condizioni di cielo sereno e il secondo giorno ha condizioni di cielo nuvoloso. Il giorno nuvoloso mostra gli effetti transitori delle nuvole che causano fluttuazioni nella GHI mentre il giorno limpido mostra la classica curva a campana della GHI.

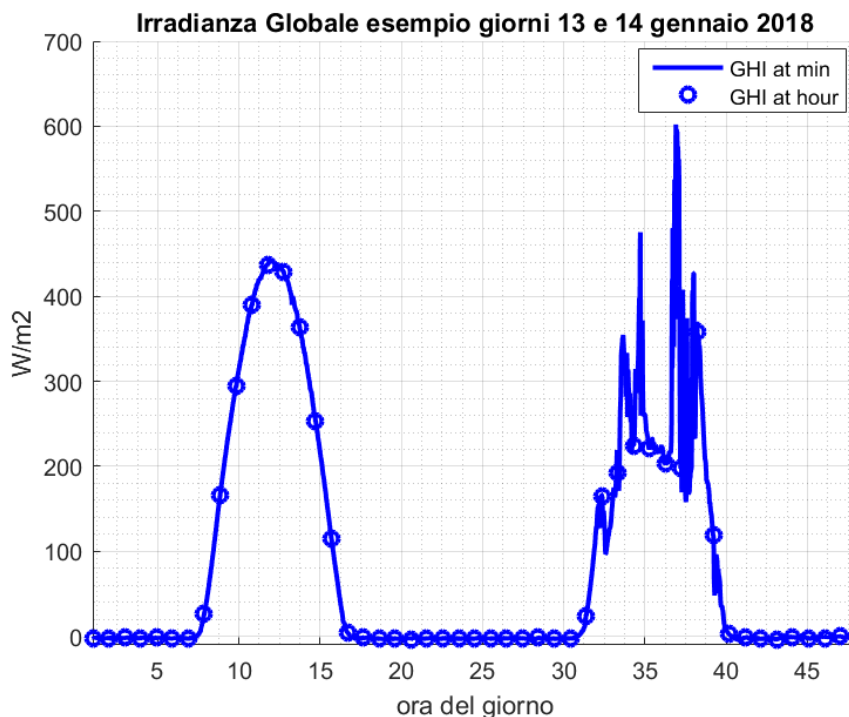


Figura 41

(Due giorni consecutivi di GHI (13-14 gennaio 2018) misurati al minuto e orari

L'esempio presentato mostra le diverse condizioni del cielo dove per il giorno 13 gennaio il K_T è 0.652 e per il 14 gennaio è 0.498.

Nella Tabella 19 sono presentate le diverse condizioni del cielo per il 2018, osservate in Casaccia, in funzione del coefficiente K_T

<i>Tipo di cielo</i>	<i>Giorni osservati</i>
$K_T < 0,65$ nuvoloso	242
$K_T \geq 0,65$ sereno	120

Tabella 19
(Giorni sereni e nuvolosi in 2018)

L'energia giornaliera per il 13 gennaio considerando una frequenza al minuto è 2448,3 Wh/m² mentre con frequenza oraria è 2450,3 Wh/m². Per il 14 gennaio (giorno nuvoloso) l'energia giornaliera è 1886,7 Wh/m² con frequenza al minuto è 1678.1 Wh/m² con frequenza oraria.

Tale aspetto implica l'energia misurata può avere valori differenti in funzione della frequenza di campionamento (frequenza oraria o frequenza al minuto). Questa differenza è molto più accentuata se il giorno è nuvoloso (differenza di circa 200 Wh/m² per il 14 gennaio), mentre per un giorno sereno tale differenza è praticamente nulla.

Lo scopo dello studio sarà quello di sviluppare metodologie appropriate per generare dati sub-orari delle tre componenti dell'irradianza solare.

Le metodologie saranno applicate a partire dai profili orari registrati al suolo; la validazione dei modelli studiati sarà effettuata con i dati al minuto delle misure realizzate nel sito ENEA Casaccia. Il modello sarà poi esteso a differenti località italiane per cui sono disponibili solo dati orari.

Da quanto esposto emerge che la scelta del modello più opportuno dipende fortemente dalle condizioni di cielo in esame (sereno o nuvoloso), come riassunto nel diagramma di flusso mostrato di seguito.

In particolare, per condizioni di cielo sereno sono utilizzabili due diversi modelli, uno fisico e l'altro matematico (interpolazione); in condizioni di cielo nuvoloso, caratterizzato da maggior variabilità, si deve ricorrere invece a modelli matematici (stocastici/probabilistici).

Tali modelli sono sinteticamente descritti nei paragrafi successivi.

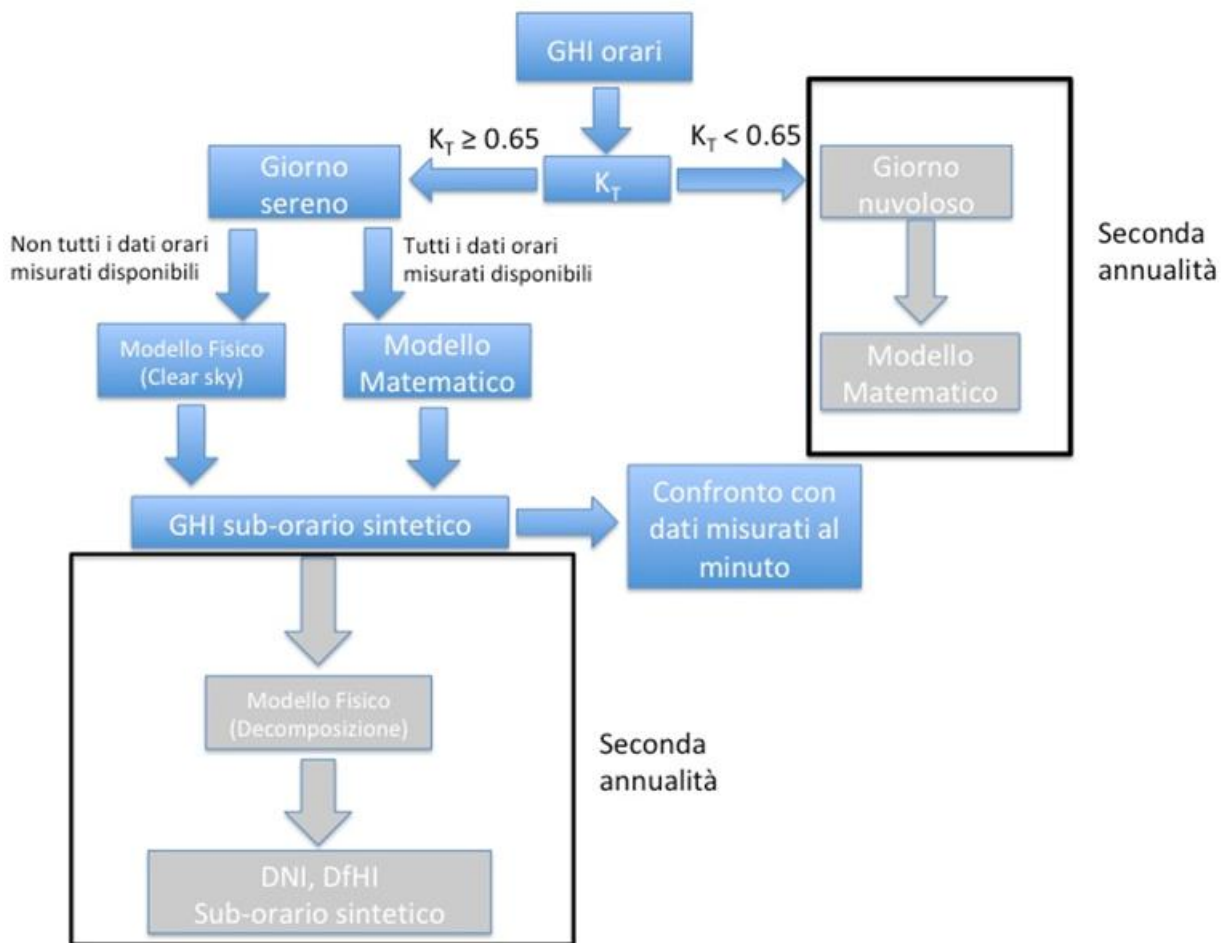


Figura 42

3.1.1 Modello fisico cielo sereno (Clear Sky)

L'irradianza extra-atmosferica su piano orizzontale dipende dalla potenza irradiante del Sole, dalla distanza variabile Sole-Terra e dall'angolo d'inclinazione dei raggi solari. Si calcola con la seguente espressione:

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos \vartheta_z$$

Dove:

I_{sc} è la *costante solare*, il cui valore è 1367 W/m^2 ;

E_0 è il *fattore di eccentricità dell'orbita terrestre*; esprime la dipendenza dalla distanza Terra-Sole;

$$E_0 = (r_0/r)^2$$

r_0 , r sono rispettivamente i valori medio e corrente della distanza Sole-Terra; r_0 è costante ($150 \cdot 10^6 \text{ km}$) mentre r varia nel corso dell'anno.

Il prodotto della costante solare per il fattore di eccentricità è l'*irradianza extra-atmosferica normale* (*Extraterrestrial Normal Irradiance*, ENI):

$$I_{0n} = I_{sc} E_0$$

(in base all'uguaglianza precedente, la costante solare è pari all'irradianza normale extra-atmosferica quando la Terra è alla distanza media, ossia $E_0 = 1$);

ϑ_z è l'angolo zenitale, ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale. Tale angolo varia durante il giorno; è massimo all'alba e al tramonto ($= \pi/2$) ed è minimo a mezzogiorno solare, ossia all'istante in cui il Sole transita per il piano meridiano della località; così, $\cos \vartheta_z$ (e, di conseguenza, pure EHI) è nullo agli istanti iniziale e finale dell'arco diurno e raggiunge il valore massimo nell'istante centrale del giorno. Per definizione, l'angolo zenitale e l'*angolo di elevazione* (o *altezza*) *del Sole* sono complementari.

In letteratura, sono disponibili espressioni o tabelle di E_0 (in funzione del giorno dell'anno) e di $\cos \vartheta_z$ (in funzione del giorno dell'anno e del momento della giornata).

La radiazione solare che giunge al suolo risente delle vicissitudini che subisce nell'attraversare lo strato di atmosfera che avvolge la Terra. Una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (*scattering*) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapore acqueo, le nubi e gli aerosol); così, alcuni raggi vengono deviati verso il basso e raggiungono il suolo sotto forma di *radiazione solare diffusa* proveniente da ogni direzione del cielo. Ma non tutti i raggi solari vengono intercettati: infatti, parte di essi attraverseranno l'atmosfera indenni e giungeranno al suolo come *radiazione solare diretta*. La direzione di provenienza di quest'ultima non sarà ora l'intera volta celeste, bensì uno stretto angolo solido di cielo in cui si trova il Sole al momento, posizione che cambia nel corso della giornata. La *radiazione solare globale* che investe una superficie disposta orizzontalmente è data infine dalla somma delle componenti diretta e diffusa:

$$I = I_b + I_d = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_d$$

in cui:

I è l'irradianza (potenza incidente sull'unità di superficie) solare globale sul piano orizzontale (*Global Horizontal Irradiance*, GHI);

I_b è l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale;

I_{bn} è l'irradianza solare diretta sul piano normale (*Direct Normal Irradiance*, DNI);

I_d è l'irradianza solare diffusa sul piano orizzontale (D_{iff});

Il risultato netto della presenza dell'atmosfera si traduce in un'attenuazione dell'irradianza che giunge dal Sole fino alla sommità dell'atmosfera. In formula:

$$I = K_T \cdot I_0$$

Nella modellistica adottata in ENEA, questo viene scritto nella forma:

$$K_T = K_{Tc} K_c = B \cos^\alpha \vartheta_z \cdot e^{-P_i - A_i^2}$$

dove:

$K_{Tc} = B \cos^\alpha \theta_z$ è il coefficiente di trasmissione (globale) in condizione di cielo sereno (*clear-sky transmittance*). α è un parametro sperimentale che determina la “forma” tramite il termine $\cos^\alpha \theta_z$ della curva di attenuazione dell’irradianza globale nell’arco della giornata per condizioni di cielo sereno e di norma vale 0.15, mentre il parametro B ne modula il valore massimo;

$K_c = e^{-P_i - A_i^2}$ è indice di serenità. Nella formula, i è l’indice di copertura nuvolosa. Per l’atmosfera serena $i = 0$;

quindi in condizioni di cielo sereno:

$$K_T = K_{Tc} = B \cos^\alpha \theta_z$$

Dalla quale:

$$B = K_T / \cos^\alpha \theta_z$$

Quindi è possibile calcolare l’irradianza solare globale sul piano orizzontale in condizioni di cielo sereno:

$$I = I_0 \cos^\alpha \theta_z$$

3.1.2 Modello matematico

La Figura 41 mostra che la valutazione di sequenze sub-orarie di dati solari non è così semplice soprattutto per le giornate nuvolose. Numerosi studi sono stati proposti per rispondere a questa esigenza. Alcuni di questi hanno utilizzato diversi metodi stocastici (catena di Markov o modelli autoregressivi), metodo gaussiano autoregressivo dipendente dal tempo e analisi di Fourier per costruire una serie temporale sintetica di dati di irradianza. Tuttavia, la maggior parte di questi algoritmi e altri algoritmi simili in letteratura [1, 2, 4, 5, 6 e altri], generano dati orari sintetici dalla radiazione giornaliera misurata o dall'indice di chiarezza media giornaliera. Tutti i metodi disponibili in letteratura cercano di colmare le lacune tra le risorse di dati generalmente disponibili e i parametri richiesti dalle applicazioni solari. Fino ad ora, non è stato possibile trovare nessuno studio che generi coppie di dati di irradianza ad alta risoluzione temporale in cui esistono solo dati orari.

Il punto di partenza per il nostro studio è il metodo presentato da Polo et al. [7], e Grantam et al. [5], selezionato dopo una lunga e approfondita valutazione ed elaborazione di altri metodi disponibili in letteratura. Entrambi gli studi utilizzano gli "stadi" delle condizioni del cielo in cui differiscono nella fase iniziale, ad esempio in base a ciascun valore dell'indice di chiarezza normalizzato e dell'indice di cielo limpido per classificare le diverse condizioni del cielo. Gli esempi presentati nella Figura 44 ci guidano a seguire la letteratura e a selezionare diversi indici di chiarezza al fine di trovare le migliori sequenze sintetiche ridimensionate dai dati orari per le diverse fasi del cielo.

Anche in condizioni di cielo sereno è facile osservare (Figura 46) che una semplice interpolazione lineare dei dati orari si adatta bene per il calcolo dei dati al minuto.

Il valore limite di 0.65 del K_T per definire il tipo del cielo potrebbe non essere sempre sufficiente. Tuttavia, questo metodo per selezionare le condizioni di cielo sereno è valido solo quando rimane il cielo sereno per

tutto il giorno. In letteratura si trovano non solo due intervalli, ma le giornate vengono suddivise in base a 4 intervalli di valori di K_T . Questo si osserva anche in Polo et al.

Sono state identificate diverse condizioni del cielo in base ai valori del coefficiente di trasmissione globale giornaliero calcolati dai valori orari osservati della radiazione globale orizzontale.

<i>Tipo di cielo</i>	<i>Giorni osservati</i>
$0 < K_T \leq 0,35$ <i>nuvoloso</i>	73
$0,35 < K_T \leq 0,50$ <i>parzialmente nuvoloso</i>	54
$0,50 < K_T \leq 0,65$ <i>parzialmente sereno</i>	115
$K_T \geq 0,65$ <i>sereno</i>	120

Tabella 20

Altre due condizioni sono imposte per evitare che i dati generati hanno valori oltre i limiti fisici. Da un lato, tutti i valori di irraggiamento durante la notte sono fissati a zero e durante il giorno viene imposto come valore massimo il valore della radiazione globale extraatmosferica per quel dato giorno.

3.1.3 Confronti preliminari dei modelli individuati per cielo sereno

Messo a punto un qualunque modello con un insieme di dati acquisiti mediante misurazione, occorre poi confrontare le misure con le corrispondenti stime e valutare se l'entità degli scostamenti non è tale da invalidare la bontà del modello proposto.

Nella pratica, gli errori sono inevitabili: per definizione, un modello – ancorché raffinato – costituisce solo un'approssimazione della realtà che vuole descrivere. Di norma, di un buon modello si desidera che gli errori siano 1) piccoli in assoluto e 2) comunque distribuiti in entrambi i versi, positivo e negativo, in modo che quelli di un segno compensino algebricamente quelli di segno opposto: in altre parole, non si abbiano previsioni sistematicamente più grandi (sovrastima) o più piccole (sottostima) delle osservazioni. Le due caratteristiche appena richiamate fanno riferimento ad aspetti concettualmente distinti degli errori di previsione, ossia alla *precisione* nel primo caso e all'*esattezza* (o *accuratezza*) nel secondo.

Non è detto che precisione ed esattezza si presentino sempre assieme, infatti previsioni esatte possono nondimeno essere imprecise. Nella Figura 43 la differenza fra i due concetti è mostrata graficamente ricorrendo ai diagrammi di dispersione: in caso di previsioni esatte i punti che rappresentano le coppie (osservazioni=misure, previsioni=stime) si distribuiscono in maniera sufficientemente simmetrica rispetto alla bisettrice del diagramma, e sono poi tanto più addensati su di essa quanto più le previsioni sono precise; se invece le previsioni sono inesatte, i punti si disporranno tendenzialmente al di sopra (sovrastima) ovvero al di sotto (sottostima) della bisettrice stessa.

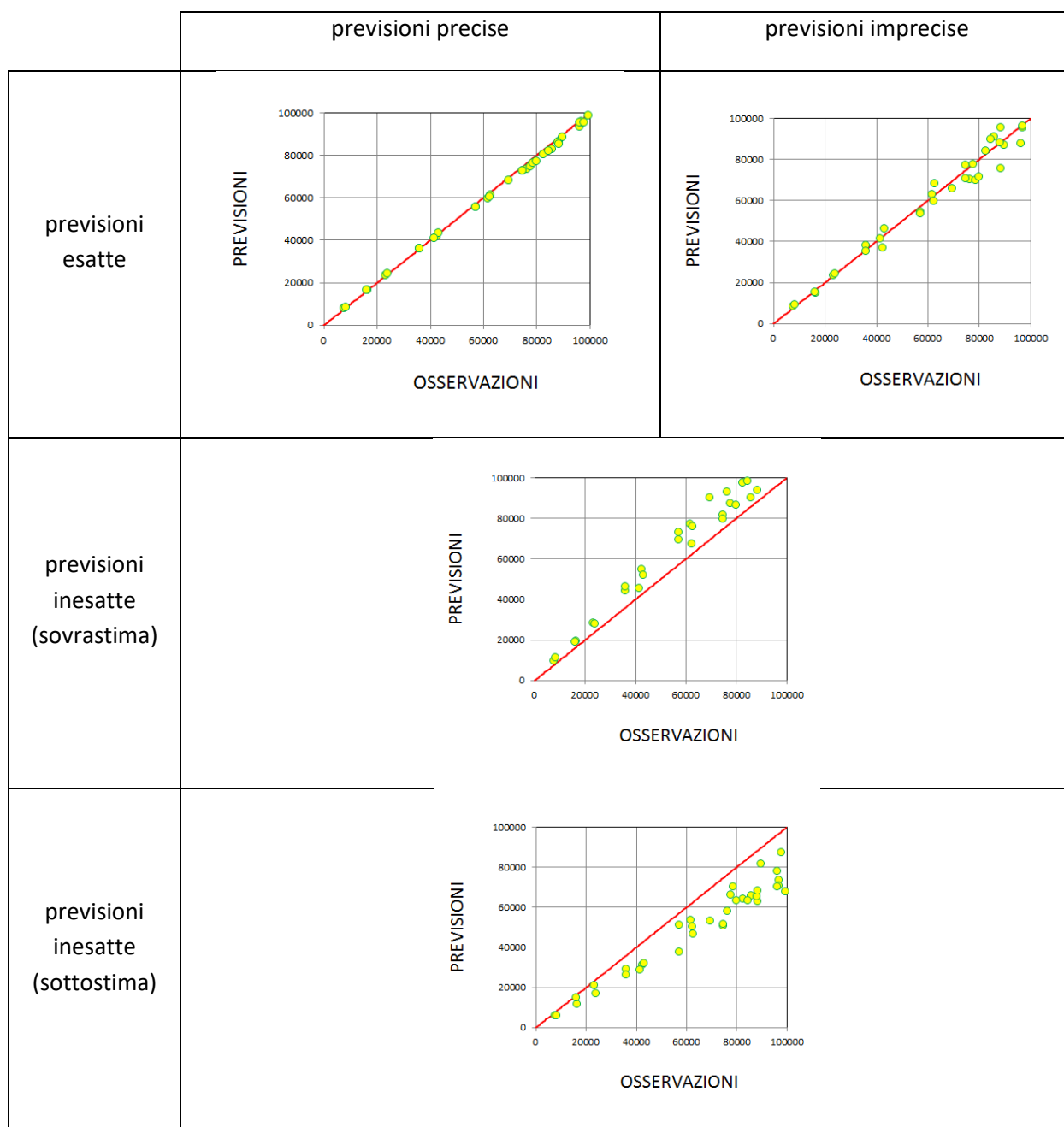


Figura 43

(Figura. Previsioni vs osservazioni: esattezza ($\equiv$ accuratezza) e precisione)

La statistica mette a disposizione numerosi parametri o *indici di accostamento* per quantificare – e anche qualificare – le differenze fra osservazioni e previsioni, perché non esiste uno solo che catturi entrambe le proprietà di precisione ed esattezza e possa di conseguenza essere assunto a riferimento per stabilire la bontà complessiva di una serie di previsioni. Qui di seguito ne sono elencati alcuni.

Il primo di questi, detto Mean Bias Error (MBE), è semplicemente la differenza fra la media delle stime e quella delle misure. Nel nostro caso è:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,s} - I_{i,m})$$

Nell'espressione precedente, N è il numero totale delle coppie (misura, stima) dei dati; il pedice 'i' si riferisce alla i-esima coppia, mentre 'm' ed 's' rispettivamente alle misure e alle stime. È utile ricorrere anche al calcolo del cosiddetto Mean Absolute Error (MAE), che in questo caso dà:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{i,c} - I_{i,m}|$$

Un altro indice di scostamento molto usato è il Root Mean Squared Error (RMSE) il quale, rispetto al precedente MAE, considera i quadrati degli scarti anziché i valori assoluti, ciò al fine di attribuire nella sommatoria un peso maggiore agli scarti più elevati. Abbiamo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,c} - I_{i,m})^2}$$

Considerando le condizioni del cielo dalla Tabella 20, sono stati selezionati quattro giorni “clear sky” nel 2018 (due a febbraio e due a luglio) e le relative irradianze orarie globali su piano orizzontale. Per questi giorni sono stati testati i modelli sia fisico che matematico su esposti. Le figure seguenti rappresentano l'andamento giornaliero della irradianza globale al minuto calcolata con il modello fisico confrontata con l'irradianza al minuto misurata al suolo e i relativi grafici di dispersione.

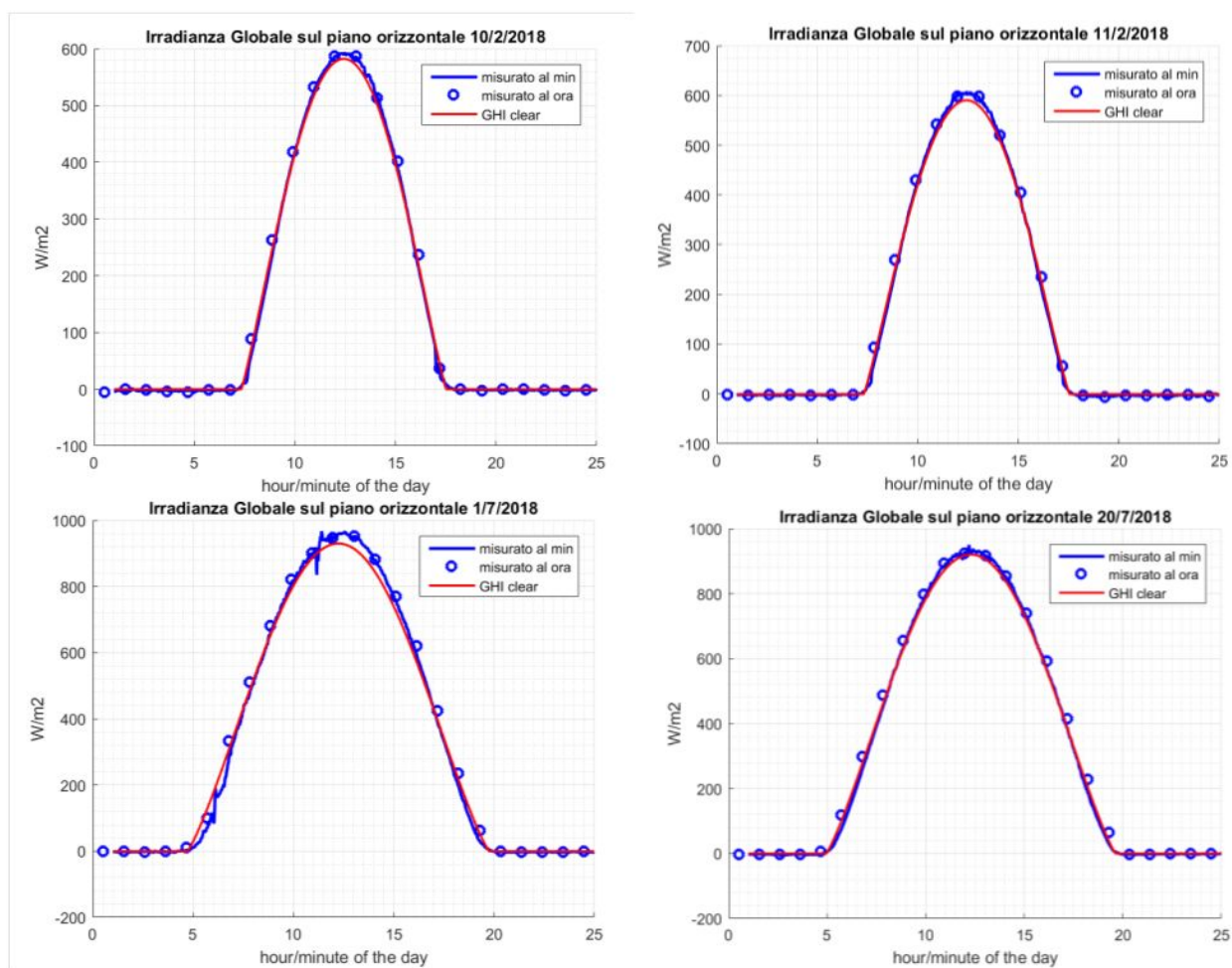


Figura 44

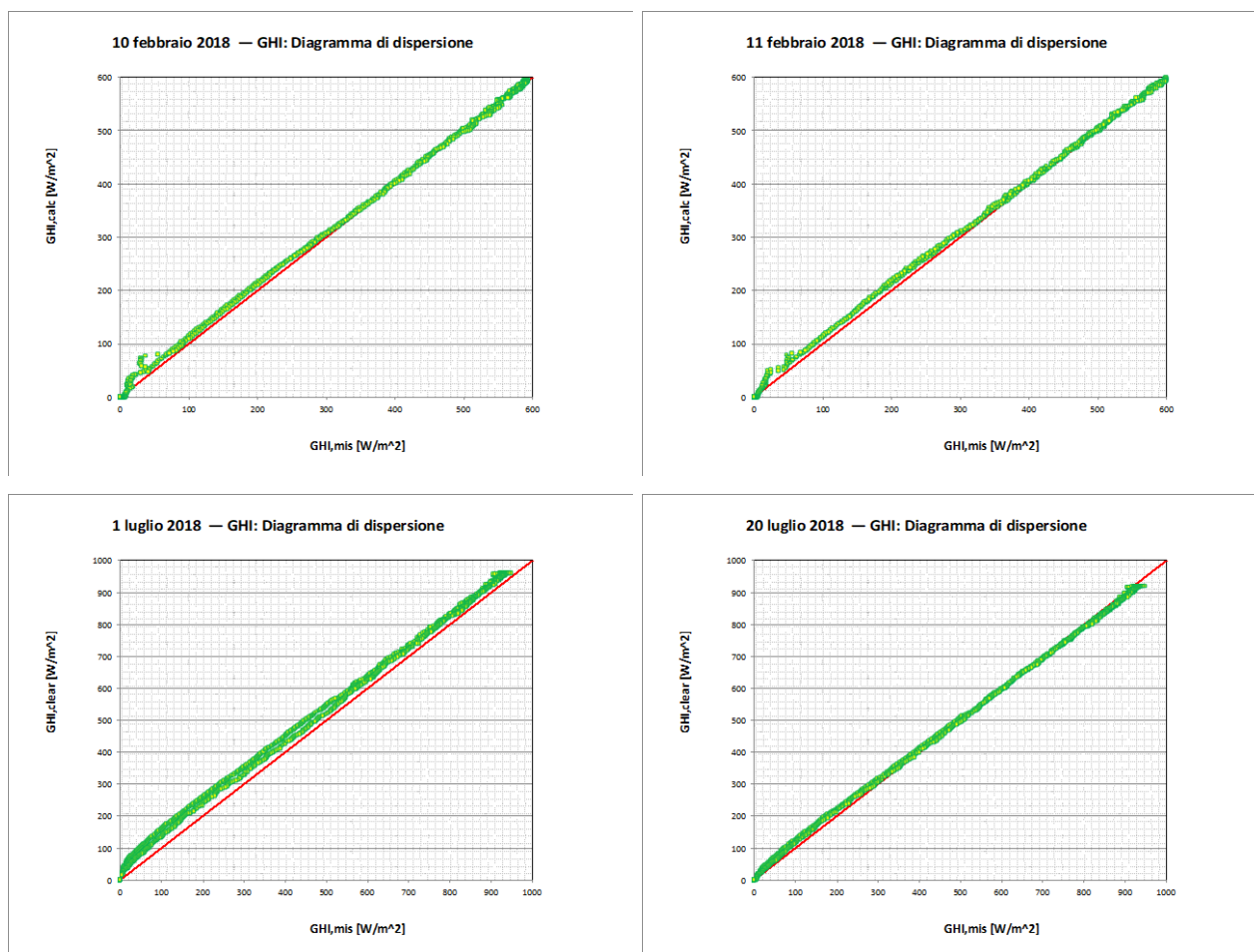


Figura 45

Giorno	Numero dati	MBE [W/m^2]	RMSE [W/m^2]	MBE%	RMSE%
10 febbraio	1440	2.4	5.7	1.6	3.7
11 Febbraio	1440	2.8	6.1	1.8	3.9
1 Luglio	1440	9.5	19.6	2.8	5.7
20 Luglio	1440	2.4	8.8	0.7	2.6

Tabella 21

Qui di seguito sono mostrati i risultati ottenuti con il modello matematico. In condizioni di cielo sereno i valori d'irradianza al minuto sono generati sia da un'interpolazione lineare che da un'interpolazione cubica dei valori orari.

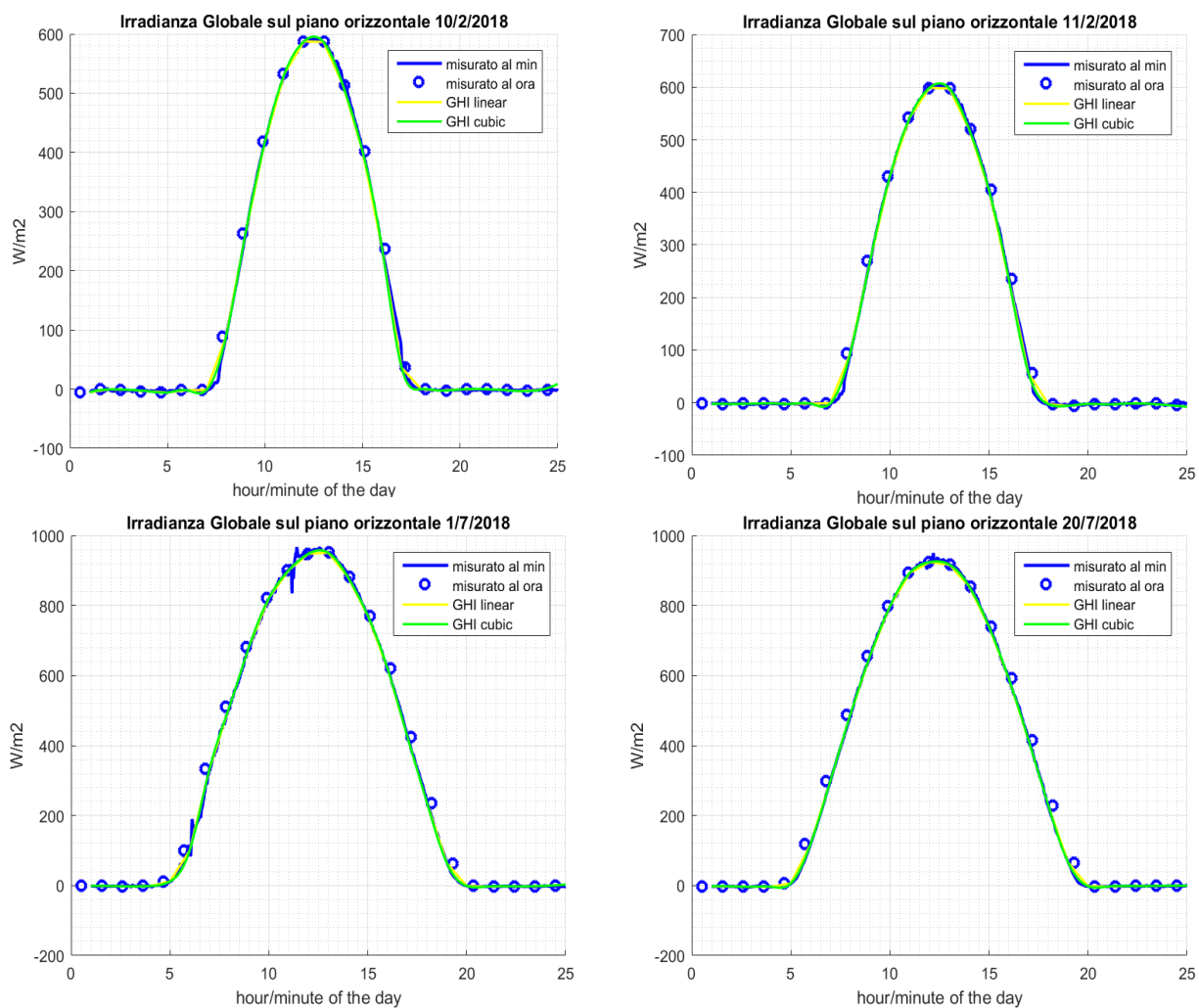


Figura 46

(Esempio per 4 giorni in condizioni di cielo sereno con modello matematico lineare e cubico, K_T 0,65)

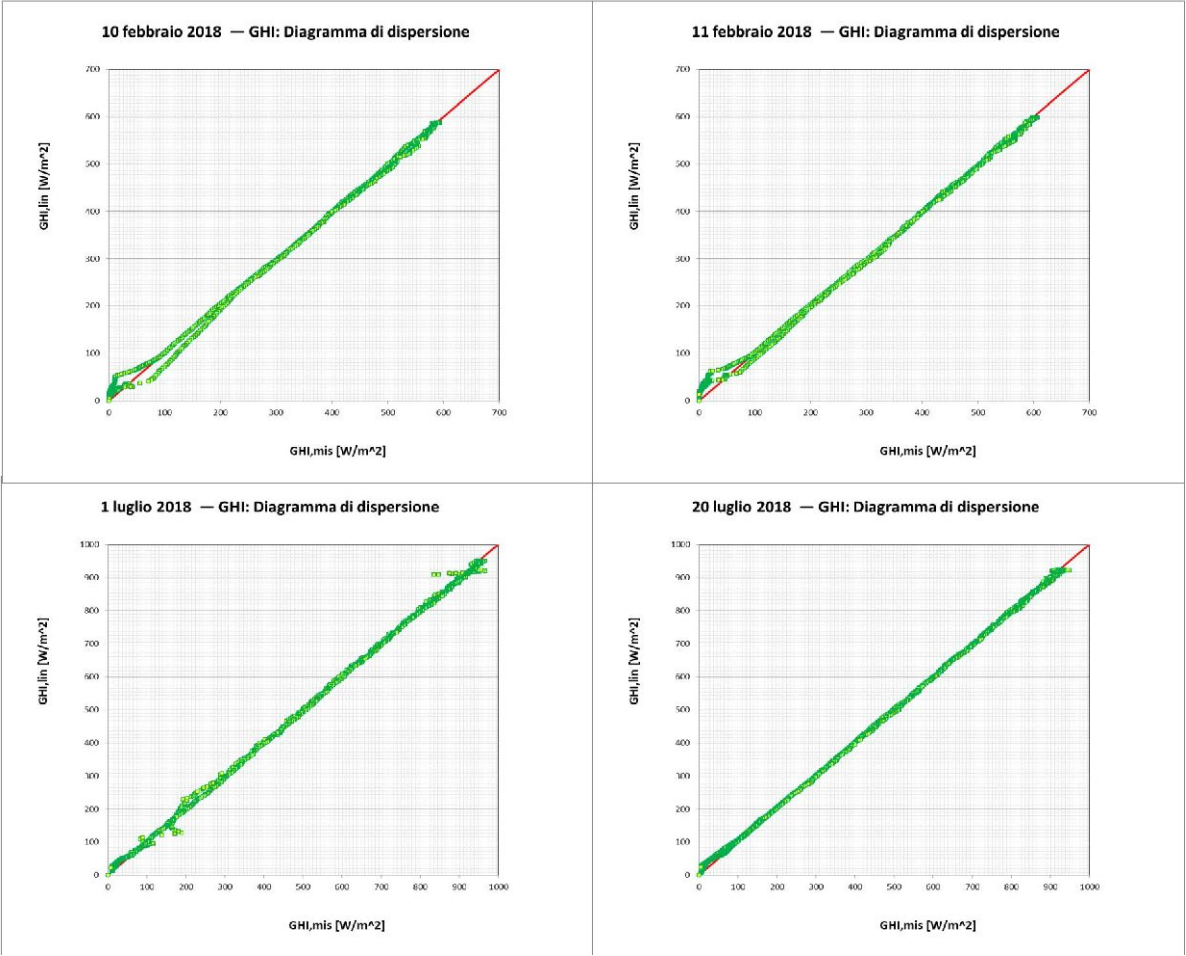


Figura 47

(Grafico a dispersione, GHI al minuto confronto con GHI sintetica lineare per il quattro giorni sereni)

Giorno	Numero dati	MBE [W/m²]	RMSE [W/m²]	MBE%	RMSE%
10 febbraio	1440	-0.2	2.9	-0.7	11.4
11 Febbraio	1440	-0.1	2.7	-0.3	10.6
1 Luglio	1440	-0.2	3.0	-0.3	5.4
20 Luglio	1440	-0.1	2.2	-0.1	4.1

Tabella 22

(statistica per il modello lineare)

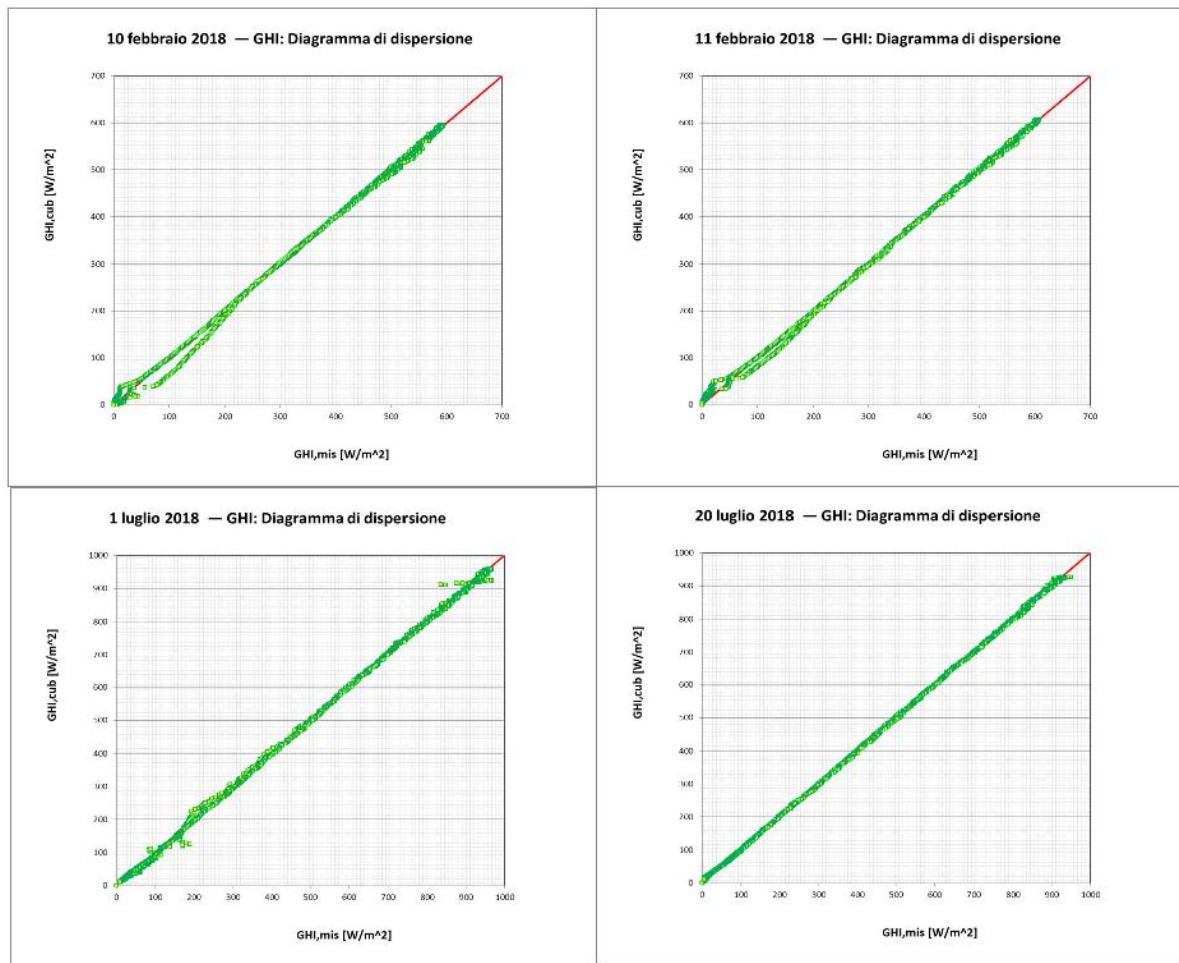


Figura 48

(Grafico a dispersione, GHI al minuto confronto con GHI sintetica cubica per il quattro giorni sereni)

Giorno	Numero dati	MBE [W/m²]	RMSE [W/m²]	MBE%	RMSE%
10 febbraio	1440	-0.2	2.7	-0.7	10.8
11 Febbraio	1440	-0.1	1.9	-0.3	7.6
1 Luglio	1440	-0.1	2.9	-0.2	5.1
20 Luglio	1440	0.0	1.2	0.0	2.2

Tabella 23

(statistica per il modello cubico)

4 Conclusioni

L'attività della linea LA1.23 del WP.1 del Progetto 1.5 è finalizzata all'elaborazione di grandezze climatiche a scala sub-oraria, da utilizzarsi nelle valutazioni energetiche di edifici ad alta efficienza. L'utilizzo di metodi di calcolo più evoluti consente infatti di utilizzare tali grandezze e migliorare l'accuratezza dei risultati sia in termini energetici, sia nella previsione della produzione da fonti rinnovabili.

In particolare, nella prima annualità è stata condotta l'analisi preliminare delle misure climatiche disponibili, per individuare degli opportuni modelli di elaborazione per la disaggregazione dei dati a livello orario.

Partendo dalle misure effettuate nel Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, sono state preliminarmente analizzate le grandezze a diversa scala temporale, analizzando differenti profili tipo e i principali indicatori statistici descrittivi.

Successivamente è stata condotta l'analisi statistica delle serie, per valutare il grado di variabilità dalle grandezze in esame nell'arco orario.

Attraverso l'analisi delle funzioni di autocorrelazione (ACF) è stato valutato il grado di variabilità temporale delle serie di T (°C) ed Umidità X (g/kg r), evidenziando un rilevante legame lineare tra i dati in esame nell'arco orario.

Per quanto riguarda invece l'irradianza, le cui differenti componenti variano in maniera differente, l'analisi a livello orario di alcuni giorni tipo, hanno fortemente suggerito che la valutazione di sequenze sub-orarie risulta notevolmente più complessa soprattutto per le giornate nuvolose.

In definitiva, le analisi svolte hanno portato alla scelta di differenti modelli di elaborazione per il *downscaling* temporale delle grandezze esaminate: per l'elaborazione delle temperature e delle umidità, saranno applicati modelli di interpolazione lineare o di tipo polinomiale (*Spline*), la cui applicazione sarà meglio approfondita nella successiva annualità.

Più articolata sarà invece l'elaborazione delle diverse componenti della radiazione solare, che come già evidenziato presentano un maggior grado di variabilità nell'arco orario e sono inoltre dipendenti dalle condizioni di cielo del momento (*tempo attuale o presente*). Numerosi studi sono stati proposti per ovviare a questa difficoltà: in alcuni sono stati utilizzati metodi stocastici (catena di Markov o modelli autoregressivi), in altri un metodo gaussiano autoregressivo, e in altri ancora l'analisi di Fourier per costruire una serie temporale sintetica di dati di irradianza. Tuttavia la maggior parte di questi metodi sono stati applicati per generare dati orari sintetici a partire dalla radiazione giornaliera misurata o dal coefficiente di trasmissione globale (*clairness index*) medio giornaliero (ma non serie sintetiche sub-orarie a partire da dati orari "misurati")

Per il nostro studio, alla luce delle valutazioni e dei confronti fra i metodi disponibili, ci si è orientati verso l'applicazione del metodo proposto in Polo et al., e Grantam et al. che adottano la tecnica della distribuzione β (beta), con parametri calcolati separatamente per le diverse "classi di cielo" individuate in base ai valori del coefficiente di trasmissione globale K_T ; per la sola classe di cielo sereno, infine, il modello statistico della distribuzione B è stato efficacemente affiancato da un modello fisico e dalle interpolazioni lineare e spline (cubica).

Importante inoltre diventa la scelta della scala temporale di downscaling dei dati (5min, 10min, 15min ecc) in quanto essa influisce in maniera rilevante sulle valutazioni di producibilità e di performance degli impianti solari in esame [11].

Nella seconda annualità, mediante l'applicazione dei modelli di elaborazione individuati, saranno prodotte serie degli anni tipo (TMY) relativi alle grandezze considerate, e validate rispetto alle misure disponibili. Le serie, a diversa scala sub-oraria, saranno estese alle differenti località italiane di riferimento in accordo alla norma UNI 10349.

5 Riferimenti bibliografici

- 1 G.E.P. Box e G. Jenkins (1976), "Time Series Analysis: Forecasting and Control", Holden-Day.
- 2 J.M. Bright, C.J. Smith, P.G. Taylor e R. Crook, "Stochastic generation of synthetic minutely irradiance time series derived from mean hourly weather observation data", Solar Energy 115 (2015) 229-242, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.032>
- 3 T. Crescenzi, M. Falchetta, A. Fontanella, E. Metelli, A. Miliozzi, F. Spinelli e L. Sipione, (2016), "Opportunità di applicazione delle tecnologie solari termodinamiche in Italia", ENEA, Roma. ISBN: 978-88-8286-335-7. https://www.researchgate.net/publication/305298274_Opportunita_di_applicazione_delle_tecnologie_solari_termodinamiche_in_Italia
- 4 N.A. Engerer, "Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance for southeastern Australia", Solar Energy 116 (2015) 215-237, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.012>
- 5 A.P. Grantham, P.J. Pudney, L.A. Ward, M. Belusko, J.W. Boland, "Generating synthetic five-minute solar irradiance values from hourly observations", Solar Energy 147 (2017) 209-221, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.026>
- 6 S. Krahenmann, A. Walter, S. Brien, F. Imbery, A. Marzarakis, "High-resolution of hourly meteorological variables for Germany", Theor Appl Climatol (2018) 131:899-926, DOI 10.1007/s00704-016-2003-7
- 7 J. Polo, L.F. Zarzalejo, R. Marchante, A.A. Navarro, "A simple approach to the synthetic generation of solar irradiance time series with high temporal resolution", Solar Energy 85 (2011) 1164-1170, doi:10.1016/j.solener.2011.03.011
- 8 F. Spinelli, E. Coglian, A. Maccari e M. Milone (2007), "La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare per la pubblicazione dei dati", Rapporto tecnico ENEA SOL/RS/2007/21, Roma. <http://www.solaritaly.enea.it/Documentazione/Archivio%20Radiazione%20e%20Solaritaly.pdf>
- 9 F. Spinelli (2009), "Attività di misurazione e stima dell'irraggiamento solare in ambito dipartimentale: ricognizione della situazione attuale e proposte", Rapporto tecnico interno ENEA, SOL/RS/2009/15, Roma, 27 aprile 2009.
- 10 F. Spinelli, "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).
- 11 H. Suehrcke e P.G. McCormick (1988), "The frequency distribution of instantaneous insolation values", Solar Energy, Volume 40, Issue 5, 1988, Pages 413-422. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90096-5)
- 12 E. Wey, C. Thomas, P. Blanc, B. Espinar, M. Mouadine, M.H. Bouhamidi, Y. Belkadir, "A fusion method for creating sub-hourly DNI based TMY from long-term satellite-based and short-term ground-based irradiation data", HAL Id: hal-007797709, 22 January 2013
- 13 W. Zhang, W. Kleiber, A.R. Florita, B.M. Hodge, B. Mather, "A stochastic downscaling approach for generating high-frequency solar irradiance scenarios", Solar Energy, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.019>
- 14 ISPRA, "Linee Guida, 2013 per l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici".
- 15 UNI 10349-2 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 2: Dati di progetto".
- 16 UNI 10349-3 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici".
- 17 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".

- 18 US Department of Commerce, “Engineering statistics handbook”, NIST/SEMATECH, 2013.
<https://www.itl.nist.gov>

6 Abbreviazioni ed acronimi

ACF	<i>Auto Correlation Function</i> (autocorrelazione di una serie di misure)
AMT	Anno meteorologico tipico
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>)
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
GHI	Irradia[nza zione] globale su piano orizzontale (<i>Global Horizontal Irradia[nce tion]</i>)
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> (Errore assoluto medio)
MBE	<i>Mean Bias Error</i> (Errore medio)
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> (Radice dell’errore quadratico medio)
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione