Assessment delle componenti della radiazione solare per la valutazione delle potenzialità del fotovoltaico sul territorio nazionale

Dario Attilio Ronzio, Elena Collino, Filippo D´Amico, Andrea Lanza, Daniele Perona, Giovanni Quinteri

2023

Progetto Fotovoltaico ad alta efficienza

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale

Accordo di programma 2022-2024 con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.

Progetto Fotovoltaico ad alta efficienza
Work Package WP3 - Metodologie e tecnologie avanzate per mappatura, monitoraggio e ottimizzazione dell'energia generata da FV
Linea di Attività LA 3.01 - Assesment delle componenti diretta, diffusa e spettrale della radiazione solare per la valutazione delle potenzialità del fotovoltaico sul territorio nazionale

Codice identificativo RT-1.01-3.01-1

Titolo: Assessment delle componenti della radiazione solare per la valutazione delle potenzialità del fotovoltaico sul territorio nazionale
Autori: Dario Attilio Ronzio, Elena Collino, Filippo D´Amico, Andrea Lanza, Daniele Perona, Giovanni Quinteri
Verificatori: Elena Collino
Approvatori: Michele de Nigris, Salvatore Guastella

Tipologia di documento: RAPPORTO

Data di emissione: 30/06/2023

Note: prima emissione

© Copyright 2023 by Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A.
Contributo/i liberamente utilizzabile/i a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare.

Per la tutela dell'ambiente, prima di stampare questo documento pensa bene se è veramente necessario.

INDICE

INDICE 3

SOMMARIO 4

1 - INTRODUZIONE 5

2 - ANALISI DEI DATI MISURATI 8

2.1 Sito sperimentale di Milano 8

2.2 Acquisizione e validazione dei dati di misura 11

2.2.1 Livello 1: validazione dati in tempo reale 12

2.2.2 Livello 2: validazione dati d'irraggiamento solare 12

2.3 Analisi di dati spettrofotometrici 18

3 - INSTALLAZIONE DEL NEFOIPSOMETRO PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA NUVOLOSITÀ 23

3.1 Presentazione dello strumento 23

3.2 Installazione dello strumento e catena di trasmissione dei dati 25

3.3 Descrizione dell'*output* 26

3.3.1 Esempi di output e alcuni casi studio 27

3.3.2 Caso 1: 14/06/2023 27

3.3.3 Caso 2: 20/06/2023 29

3.4 Pulizia dei dati e implementazione di filtri per la riduzione del rumore 31

3.4.1 Metodo 1 32

3.4.2 Metodo 2 33

3.4.3 Rete AliceNET 34

4 - CONCLUSIONI 35

5 - BIBLIOGRAFIA 36

6 - APPENDICE: CONTROLLO DI QUALITÀ DEI DATI DI RADIAZIONE 37

6.1 Formulazione numerica 37

6.2 Grafici riepilogativi di validazione degli irraggiamenti solari 39

7 - ACRONIMI 43

SOMMARIO

Nel corso del primo anno e mezzo del triennio di ricerca 2022÷2024, parte dell'attività è consistita nella gestione, manutenzione, validazione e interpretazione delle misure acquisite presso la stazione meteorologica sperimentale di RSE di Milano, gestita dal gruppo di Ricerca Clima e Meteorologia. In particolare sono stati acquisiti dati, quali temperatura, umidità relativa, pressione al suolo, intensità e direzione del vento e una serie di misure specifiche relative all'irraggiamento integrato sullo spettro solare (irraggiamento globale, diretto normale e diffuso); sono stati acquisiti altresì gli spettri d'irradianza diretta normale forniti da uno spettrofotometro e misure fornite da un nefoipsometro, con cui è possibile ottenere informazioni precise nello spazio e nel tempo delle caratteristiche degli aerosol e delle nubi.
L'attività di validazione dei dati è divenuta operativa a valle dell'acquisizione dei files delle misure, prodotti una volta al minuto, permettendo così di poter intervenire in modo rapido per eventuali malfunzionamenti degli strumenti. In particolare, in relazione alle misure di irraggiamento, la procedura di validazione adottata è quella sviluppata da RSE e da altri esperti internazionali nell'ambito della partecipazione al task-16 "*Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications*" del *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme* (IEA-PVPS).
È inoltre proseguita la raccolta di misure degli spettrofotometri installati, oltre che a Milano, presso la sede di Piacenza, i laboratori di Sardegna Ricerche di Cagliari e presso l'*innovation hub* di Enel Green Power di Catania. Tale attività, oltre a permettere il popolamento di un *dataset* continuativo di misure di irradianza spettrale, permetterà anche di aggiornare il sistema di *machine learning* utilizzato nella metodologia ARTEMIS (*Automatic Radiative TransfEr Model for Irradiance with Satellite data* [1]), volta a stimare le componenti spettrali dell'irraggiamento diretto e diffuso, realizzata all'interno del progetto RdS 2.5. Questa metodologia richiede infatti stime accurate degli aerosol, che potranno essere dedotte dall'analisi dei dati rilevati dagli spettrofotometri. Un contributo fondamentale allo sviluppo della metodologia deriverà anche dai dati rilevati dal nefoipsometro, installato nel corso di questa attività e in grado di fornire ulteriori informazioni di caratterizzazione delle particelle e di profilazione verticale delle nubi. Lo sforzo di alimentare e validare in modalità continuativa misure ambientali, specie di caratterizzazione dell'irraggiamento, vuole supplire alla carenza di dati osservativi, utili sia per la caratterizzazione del territorio italiano, sia per la validazione di metodi di stima indiretta della radiazione solare.
I risultati ottenuti in questa LA e l'utilizzo della metodologia sviluppata nel progetto 2.5 costituiscono una base necessaria alla pianificazione della ubicazione delle nuove tecnologie di impianti fotovoltaici (celle al Si tipo IBC e HJT, celle tandem, moduli bifacciali, sistemi ad inseguimento monoassiale, ...) e alla loro gestione in esercizio.

Keywords: irraggiamento solare, fotovoltaico, nefoipsometro, SSIM, radiazione solare spettrale, validazione di misure solari.

1 - INTRODUZIONE

Il gruppo di ricerca Clima e Meteorologia (CLM), afferente al dipartimento Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche (SFE) di RSE, effettua da anni, presso la propria sede di Milano, misure di alcune variabili meteorologiche utili a varie attività di ricerca condotte dal gruppo stesso o da altri gruppi di ricerca di RSE. I dati misurati, infatti, sono utilizzati per validare le previsioni meteorologiche da modelli numerici meteorologici, per analizzare casi studio, ma anche per specifiche attività, quali (1) la previsione della produzione energetica di varie tecnologie di impianti fotovoltaici, nel progetto RdS1.1 relativo al Fotovoltaici ad alta efficienza, (2) la valutazione delle condizioni ambientali in relazione ai prelievi di contaminante dagli isolatori installati nell'area RSE, nel progetto RdS 2.6 relativo alla Resilienza del sistema elettrico, così come (3) l'alimentazione di sistemi di controllo e gestione di microreti, nel progetto RdS 2.10 dedicato alla Flessibilità del sistema elettrico. Nel corso degli anni il sito di Milano è stato arricchito di sensori dedicati alla misura delle componenti della radiazione solare, dato il forte sviluppo del fotovoltaico. Per il conseguimento degli ambiziosi obiettivi previsti dal PNIEC in termini di sviluppo del fotovoltaico nel nostro Paese, è necessario innanzitutto poter conoscere in modo esteso la disponibilità della fonte primaria, cioè l'irraggiamento solare. È opportuno ricordare che le differenti tecnologie fotovoltaiche sono in grado di sfruttare componenti diverse dell'irraggiamento solare e da qui nasce la necessità di caratterizzare la radiazione solare nelle sue componenti.

Dell'irraggiamento solare in input al top dell'atmosfera una parte giunge direttamente al suolo senza subire deviazioni ma solo un parziale assorbimento da parte dei gas costituenti l'atmosfera e degli aerosol presenti; questa porzione viene definita **componente diretta**. Una parte dell'irraggiamento solare viene invece **riflessa**, **assorbita** e **riemessa** da parte dei costituenti atmosferici e, in particolare, da parte delle nubi. La somma delle componenti diretta (*Direct Horizontal Irradiance* – DHI) e diffusa (*DIFfuse irradiance* – DIF) costituisce l'irraggiamento globale (*Global Horizontal Irradiance* – GHI), secondo la formulazione 1.1:

$$GHI = DIF + DHI = DIF + DNI * \cos(SZA) \qquad 1.1$$

dove la DNI è la *Direct Normal Irradiance*, ossia l'irraggiamento diretto incidente su una superficie perpendicolare al raggio solare e SZA è il *solar zenith angle*.

In presenza di copertura nuvolosa, la DNI tende ad annullarsi mentre di norma aumenta la componente diffusa DIF. Ne segue che l'irraggiamento globale GHI è strettamente dipendente dalla presenza di nuvolosità e dalle caratteristiche della stessa in termini di spessore ottico, e che la stessa quantità di GHI può essere determinata da una differente distribuzione di componente diretta e diffusa in funzione delle condizioni meteorologiche.

Per ciò che riguarda la DNI, in condizioni di cielo sereno può subire delle oscillazioni significative, a seconda del profilo verticale di atmosfera presente, principalmente determinato dal contenuto di vapor d'acqua, di ozono e dalla tipologia e quantità di aerosol presenti.

Mentre il fotovoltaico senza concentrazione solare (o piano) sfrutta principalmente la GHI, il fotovoltaico a concentrazione (*Concentrated PhotoVoltaic* – CPV) e gli impianti ad inseguimento solare sono molto sensibili alla DNI.

Per la misura della GHI e della DNI esistono strumenti diversi. Lo strumento di misura della GHI è denominato piranometro, quello per la DNI pireliometro. In particolare, per la misura di DNI è necessario disporre di un *tracker* biassiale in grado di inseguire il disco solare e su cui installare il pireliometro. Entrambi gli strumenti sono costosi, necessitano di continua manutenzione per la pulizia dei vetri protettivi e di calibrazione periodica. Dato il necessario movimento di precisione dell'inseguitore solare, la misura di DNI è molto delicata e facilmente affetta da errori in caso di disallineamenti, anche molto ridotti, da parte dell'inseguitore.

Oltre alla misura delle componenti, la stazione solare di Milano (Figura 2.2) è dotata di uno spettrofotometro (*Solar Spectral Irradiance Meter – SSIM)* (Figura 1.1), per la misura di irraggiamento diretto normale spettrale *(Spectral DNI o SDNI*).

Figura 1.1 – Spettrofotometro (SSIM) installato da RSE sul *tracker* nella postazione di EGP a Catania.

Le misure delle componenti, anche a livello spettrale, permettono la caratterizzazione del luogo in relazione alla radiazione e la verifica di metodi di stima indiretta delle componenti dell'irraggiamento. In particolare, la misura della *Spectral DNI* è fondamentale per lo sviluppo e la validazione dell'algoritmo di stima dell'irraggiamento a livello spettrale, in corso di sviluppo nel progetto RdS 2.5 [1].
Le misure di irraggiamento globale sono inoltre utilizzate nelle attività di RSE per verificare le stime dell'irraggiamento solare globale da satellite secondo il metodo *RADiation from SAFnwc* (RADSAF) .
Il metodo RADSAF effettua, a partire da dati del satellite *Meteosat Second Generation*, una stima della radiazione solare globale relativa all'intero territorio italiano. Questi dati sono aggiornati con la frequenza di acquisizione delle immagini satellitari, pari a 15 minuti e risoluzione spaziale di 4 x 4.5 km. Il metodo consiste in una regressione polinomiale di terzo grado nell'angolo di zenit (SZA) e con coefficienti dipendenti dal valore della tipologia di nube/cielo sereno (Cloud Type, CT). Dettagli circa l'algoritmo di stima si possono trovare in [2] e [3].
Il metodo ARTEMIS (*Automatic Radiative TransfEr Model for Irradiation with Satellite data*) in sviluppo nel progetto RdS 2.5, si propone essere un'alternativa e un ampliamento di RADSAF, in quanto il suo proposito consiste nella stima degli spettri dell'irraggiamento diretto normale e di quello diffuso. Integrando tali quantità sullo spettro solare, è possibile calcolare le varie componenti dell'irraggiamento solare (diretta, diffusa e globale), ma permette anche di ottenere la descrizione, a livello spettrale, della radiazione solare. Il metodo utilizza informazioni satellitari e derivate da modelli numerici regionali e globali per stimare i parametri necessari al calcolo degli spettri delle varie componenti.
In questa attività di ricerca l'effettuazione di misure continuative di radiazione solare (non solo nelle sue componenti globale, diretta e diffusa, ma anche nella distribuzione spettrale) permette di colmare la lacuna di questo tipo di misure nel nostro Paese e di creare delle serie sufficientemente lunghe per poterne ottenere delle analisi statistiche robuste.

Nefoipsometro, strumento che scansiona l'atmosfera tramite un laser, al fine di studiare l'altezza e la composizione degli strati nuvolosi, nonché la trasparenza atmosferica.

Le attività illustrate nel presente rapporto di Ricerca di Sistema hanno riguardato la **validazione in maniera automatica dei dati meteorologici e radiativi acquisiti dalla stazione meteorologica di Milano** e l'installazione di un nuovo strumento –**nefoipsometro** – per analizzare in maniera oggettiva e con elevata frequenza temporale lo stato della bassa atmosfera.
Per quanto concerne la **prima attività**, le misure di variabili meteorologiche presso la sede di Milano sono iniziate a partire da dicembre 2008. Nel tempo la stazione di misura ha aggiornato gli

strumenti e introdotti di nuovi, come descritto esaurientemente in [4]. Attualmente i dati acquisiti dalla stazione di misura sono memorizzati, in tempo reale, in un database gestito da RSE. È importante segnalare che la stazione di misura consta di due differenti postazioni: una localizzata a terra ed una sulla copertura di un edificio a circa 50 m d'altezza, in modo tale da non soffrire di problemi di oscuramento dovuti a edifici circostanti o alla vegetazione. Data la mole di dati acquisiti, si è reso necessario attivare un sistema di validazione delle misure meteorologiche e soprattutto di quelle radiative, per le quali l'individuazione di anomalie non è affatto agevole. Inoltre, è fondamentale che questa validazione dei dati sia effettuata il prima possibile rispetto al momento dell'acquisizione dei dati e che siano anche tracciate le operazioni e le tempistiche del processo di validazione.

IEA PVPS
Photovoltaic Power Systems è un *Technology Collaboration Programme* dell' IEA (*International Energy Agency*) che mira a facilitare il ruolo dell'energia fotovoltaica come pietra miliare nella transizione verso sistemi energetici sostenibili.

La metodologia di validazione dei dati di misura che si è deciso di adottare è stata descritta in un precedente rapporto di Ricerca di Sistema [5] ed è basata sull'attività condotta da RSE e da altri esperti internazionali nell'ambito del programma internazionale IEA-PVPS *Task* 16, oggetto di una recente pubblicazione [6]. Il *Photovoltaic Power Systems Programme* (PVPS) è un accordo di collaborazione di Ricerca e Sviluppo, realizzato fra Paesi aderenti all'*International Energy Agency* (IEA), al fine di sviluppare progetti congiunti relativi alla conversione dell'energia solare in elettricità. In particolare, il *Task*-16 "*Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications*" [7] ha lo scopo di migliorare l'integrazione del fotovoltaico nei sistemi elettrici nazionali, attraverso la ricerca su sistemi di previsione di produzione FV, e di definire metodi per aumentare l'accuratezza nella valutazione della risorsa solare. Nel corso dell'attività svolta dal *task* 16 negli anni 2020÷2021 sono state definite le condizioni per la validazione dei dati radiativi, riportate in Appendice 6 -del presente rapporto per praticità.

La **seconda attività** è consistita nella messa in funzione del nefoipsometro, che permette l'acquisizione di immagini molto dettagliate dello stato dell'atmosfera fino a 4000÷6000 m di quota (visione verticale e sopra il punto di misura). È così possibile studiare diversi fenomeni, quali la presenza degli aerosol atmosferici e alcune loro caratteristiche, l'estensione verticale delle eventuali nubi presenti e l'evoluzione di alcune idrometeore che possono portare a precipitazione al suolo. Queste informazioni sono essenziali, oltre che per questo progetto RdS, anche in diverse altre attività di ricerca attualmente in corso, come lo sviluppo della metodologia ARTEMIS (*Automatic Radiative TransfEr Model for Irradiance with Satellite data* [1]) per stimare le componenti radiative spettrali solari, sviluppato all'interno del progetto RdS 2.5 e potranno essere di utilità anche per una migliore caratterizzazione delle precipitazioni, quali le nevicate umide, studiate all'interno del progetto RdS 2.6 [8]. Nella successiva LA3.2 di questo progetto, le informazioni dedotte dai dati del nefoipsometro saranno anche incrociate con quelle dedotte dallo spettrofotometro *Solar Spectral Irradiance Meter* SSIM, presente nella stazione solare di Milano oltreché con i dati di irradianza fornite dal satellite geostazionario Meteosat Second Generation.

Per ciò che riguarda le misure ottenute dal nefoipsometro installato nel primo semestre del 2023, nella LA3.1 sono state sperimentate alcune tecniche di pulizia dei dati e di analisi meteorologica. Lo strumento di RSE è in via di inserimento nella rete ALICEnet, gestita da CNR-ISAC, a cui partecipano diversi Enti di ricerca, Università ed Agenzie ambientali, che ha lo scopo di monitorare, attraverso nefoipsometri, lo stato dell'atmosfera in diverse località italiane e mettere a disposizione del pubblico i dati acquisiti dalla rete. In questo modo si cercherà di condividere informazioni in modo tale da facilitare il processo che porterà ad una decodifica ed utilizzo dei dati anche nell'ambito delle ricerche che RSE sta portando avanti.

Il rapporto si articola nel seguente modo: nel §2 -si descrivono le fasi di acquisizione, di validazione e analisi dei dati meteorologici e d'irraggiamento acquisiti dalla stazione solare di Milano. In particolare, il sistema di acquisizione è stato aggiornato in modo tale da poter gestire in tutte le fasi dati ad alta frequenza temporale (2 secondi). Nel §0 è invece descritta la fase d'installazione e di acquisizione dati del nefoipsometro CL61, nonché le prime analisi sui dati. Infine, il paragrafo §4 -trae alcune conclusioni sull'attività svolta.

2 - ANALISI DEI DATI MISURATI

2.1 Sito sperimentale di Milano

Il dipartimento SFE di RSE gestisce una stazione solare e alcune stazioni meteorologiche nella sua sede di Milano.

Diverse misure meteorologiche sono state effettuate a partire dal 2008. Nel corso del tempo è aumentato il numero di grandezze monitorate, a seconda delle esigenze delle molteplici attività di ricerca che beneficiano di dati meteorologici. Precedenti rapporti di RdS descrivono l'evoluzione dell'attività sperimentale e i relativi utilizzi dei dati. A seconda delle esigenze, i dati erano acquisiti e archiviati con tempi di campionamento diversi. Nel corso delle attività della LA3.1, si è cercato di uniformare l'informazione a disposizione, organizzandola in specifiche tabelle di *database* e popolandole con dati mediati al minuto e validati. La serie temporale dei dati a un minuto, in generale, è utilizzata per validare le previsioni delle variabili meteorologiche e radiative. Particolare interesse riveste la misurazione dell'irraggiamento solare, sia a livello di componenti, sia a livello spettrale, dato il crescente sviluppo di celle fotovoltaiche selettive rispetto a diverse porzioni dello spettro elettromagnetico, [9] quali le celle tandem e le celle multigiunzione.

Al 2023, differenti gruppi di sensori sono localizzati a terra, come mostrato in Figura 2.1, altri sul tetto di un capannone industriale a circa 50 m dal suolo, dove, in particolare, sono installati i sensori che costituiscono la stazione solare, mostrati in Figura 2.2.

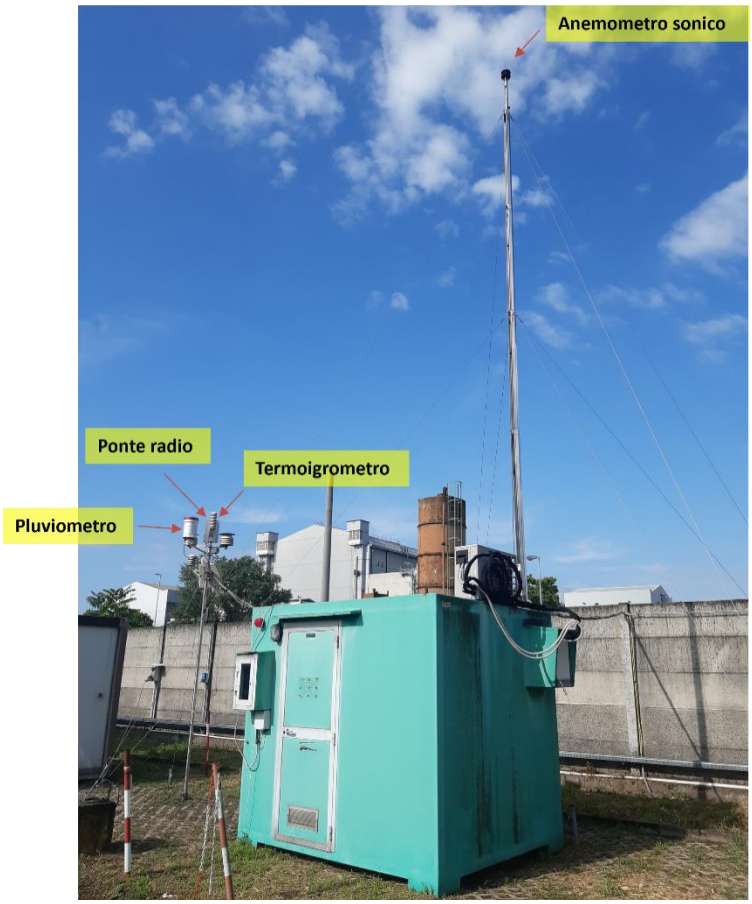


Figura 2.1 – Postazione di misura al suolo presso la sede RSE di Milano.

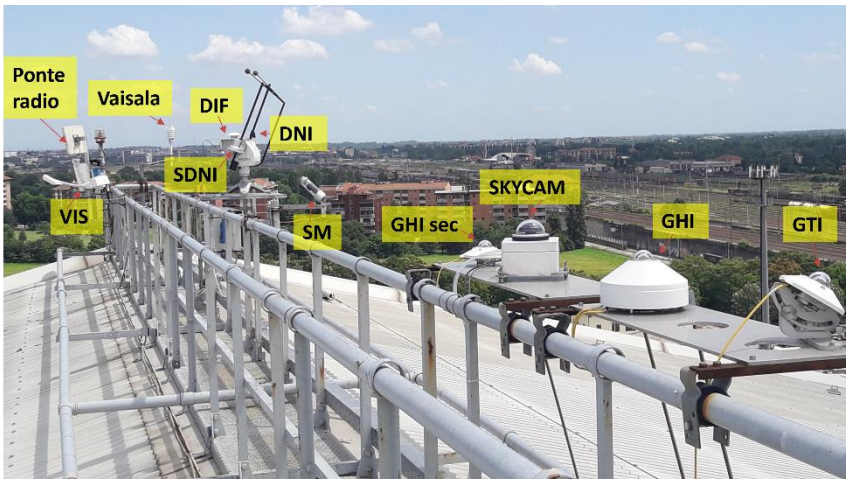


Figura 2.2 – Stazione solare di Milano a 50 m di altezza [5].

Alcune variabili meteorologiche sono misurate sia a terra che sul tetto del capannone, ma con tempi di campionamento diversi e da sensori differenti. Facendo riferimento al 2023, i tempi di campionamento e le quote a cui sono effettuate le misure delle differenti grandezze sono illustrate in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Sintesi delle misure di dati meteorologici e d'irraggiamento gestiti dal gruppo CLM di RSE. I tempi di campionamento si riferiscono al 2023.

Strumento	*Variabile*	*Quota di acquisizione stazione al suolo*	*Passo di campionamento stazione al suolo*	*Quota di acquisizione stazione sul tetto*	*Passo di campionamento stazione sul tetto*
Termometro	Temperatura	2 m	2"	50 m	1'
Igrometro	Umidità relativa	2 m	2"	50 m	1'
Barometro	Pressione	2 m	2"	50 m	1'
Pluviometro	Precipitazione	2 m	2"		
Anemometro sonico	Intensità e direzione del vento	10 m	1'	50 m	1'
Piranometro	Irraggiamento globale su piano orizzontale (GHI)			50 m	2"
Piranometro	Irraggiamento diffuso su piano orizzontale (DIF)			50 m	2"
Pireliometro	Irraggiamento diretta o normale (DNI)			50 m	2"
Piranometro	Irraggiamento globale su un piano inclinato di 30° esposto verso Sud (GTI)			50 m	2"
SSIM	Irraggiamento spettrale diretto normale (SDNI)			50 m	1'
Nefoipsometro	Profilazione verticale dell'atmosfera	1 m	2"		

I sensori che rilevano le quantità radiative sono stati installati sul tetto del capannone per evitare eventuali problemi di ombre dovute a vegetazione o a edifici adiacenti. Sempre sul medesimo tetto è anche presente lo spettrofotometro SSIM per il rilevamento del SDNI.
Nelle vicinanze della stazione meteo a terra è stato installato nel corso del 2023 un nefoipsometro, illustrato in 3 -
Nell'ottica di riorganizzazione dei dati, quest'ultimi sono stati suddivisi in tre sottogruppi:

- Dati provenienti dalla stazione solare sul tetto del capannone industriale e dati meteo al suolo, tutti campionati a 2", individuati dall'identificativo 2302901;

- Dati di vento provenienti dall'anemometro sonico (Figura 2.1) posto a terra, a 10 m di altezza, campionati a 1' e individuati dall'identificativo 2302902;
- Dati meteo misurati sul tetto del capannone (stazione Vaisala), campionati a 1' e individuati dall'identificativo 2302903.

Una volta acquisiti dai PC locali, i dati devono essere trasferiti su un server centrale, per poter essere validati ed archiviati in apposite tabelle di *database*. La validazione viene effettuata utilizzando due differenti livelli di accuratezza, un livello 1 per tutte le variabili acquisite, ed un livello 2 per le sole variabili d'irraggiamento solare. Il primo livello fa uso di un controllo basato su limiti fisicamente accettabili, mentre il secondo livello utilizza una serie di controlli basati sulle linee guide prodotte dal Task 16 del PVPS, le cui formulazioni matematiche sono riportate in Appendice 6, descritte in maniera estesa in un precedente rapporto di RdS [5] .
Poiché nel corso del tempo la frequenza di campionamento è cambiata, si è deciso di riportare tutte le serie validate alla frequenza del minuto, in quanto questo è la risoluzione minima temporale generalmente richiesta per effettuare validazioni di previsioni o stime indirette delle variabili meteorologiche. In Tabella 2.2 sono riportate le variazioni nei tempi di campionamento dei dati, sia per la stazione solare che per quelle meteorologiche, durante gli anni a partire dal 2008, insieme con il riferimento della tabella in cui sono archiviati.

Tabella 2.2 – Tempi di campionamento e di archiviazione dei dati meteorologici e solari dal 12/2008. Le ultime due righe della tabella si riferiscono al nuovo sistema di archiviazione e validazione dati.

Passo campionamento	*periodo*	*tipologia*	*Tabella dati*	*Validazione*	*Numerosità media mensile campioni*
10'	12/2008÷08/2012	grezzi	Obse_Meteo	no	4800
10"	01/2018÷04/2023	grezzi	Obse_MeteoInst	no	257000
1'	10/2012÷12/2017	grezzi	Obse_Meteo	no	43000
1'	01/2018÷06/2023	mediati	Obse_Meteo	no	43000
2"	06/2021÷*online*	grezzi	Dati_SolMet_*yyyy*	sì	1255000
1'	06/2021÷*online*	mediati	Obse_SolMet	sì	42000

Nella stessa tabella è anche indicata, la numerosità approssimata dei campioni a livello mensile. A questo proposito si deve tener conto che nel tempo ci sono state anche azioni di manutenzione o disservizio, ad es. durante la pandemia da COVID-19, durante le quali il numero delle misure è diminuito.
Nel seguito saranno illustrate la fase di acquisizione delle misure dal server centrale, la metodologia operativa implementata per effettuare la validazione dei dati e alcuni grafici riepilogativi delle validazioni dei dati relativi al periodo da giugno 2021 a giugno 2023 in modo tale da poter effettuare la validazione di dati acquisiti a passo di 2". Non è stata ancora effettuata, invece, la validazione dei dati relativi al periodo precedente il 01/06/2021.

2.2 Acquisizione e validazione dei dati di misura

La fase di acquisizione, da parte del server centrale, è gestita da un apposito *script* denominato *getload-station.pl* che viene attivato alle 00:02 di ogni giorno e rimane attivo per l'intera giornata corrente. Per evitare interruzioni di acquisizione, ogni 10' viene effettuata eventualmente un tentativo di nuova attivazione. Le attività svolte dalla procedura sono, in breve:

- Acquisizione, da diversi PC, dei files contenenti i dati dei tre gruppi di misure;
- Caricamento in *database* dei dati grezzi; i dati a 2" sono caricati in una tabella denominata Dati_SolMet_yyyy, dove *yyyy* indica l'anno, mentre i dati a 1' (2302902 e 2302903) in Obse_SolMet;
- Tutti i dati sono sottoposti ad una validazione di livello 1, descritta in §2.2.1. I dati a 2" sono anche mediati a 1' e caricati in Obse_SolMet;
- In una tabella di appoggio (Stato_SolMet) si tiene traccia delle ultime date di caricamento e di aggiornamento delle varie fasi di acquisizione e validazione.

La fase di validazione dei dati d'irraggiamento è gestita da un altro *script*, denominato *qc-check.pl*, e consta di diverse attività, eseguite in parte in tempo reale a valle dell'attivazione dello *script getload-station.pl* e in parte periodiche:

- Controllo della raggiungibilità in rete dei PC di acquisizione, altrimenti viene effettuata una segnalazione al responsabile di turno;
- Acquisizione ogni 2 giorni dei dati d'irraggiamento campionati a 1' in condizioni di cielo sereno dal portale *Soda radiation Data* (www.soda-is.com)[1] per il sito di Milano, ovvero per le località dove si vuole effettuare la validazione dei dati d'irradianza; idati importati sono calcolati applicando il metodo McClear [10] per calcolare le diverse componenti dell'irraggiamento solare sulla base di un carico aerosolico dell'atmosferica acquisito dal *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS); i dati a 2" sono calcolati tramite un'interpolazione temporale dei dati al minuto; questi dati servono per svolgere diversi test di valutazione dell'accuratezza delle misure solari, applicati durante la validazione di livello2;
- Attivazione della procedura di validazione livello 2 dei dati d'irraggiamento;
- Produzione di grafici di verifica in tempo reale e periodicamente.

[1] *I prodotti SoDa sono sviluppati in collaborazione con il centro di ricerca O.I.E. di Mines ParisTech, Armines e Vaisala Oyj e consistono in un set di informazioni relative all'irraggiamento solare.*

2.2.1 Livello 1: validazione dati in tempo reale

Questa validazione viene effettua in fase di acquisizione in tempo reale di tutte le misure. In questa modalità il controllo viene effettuato esaminando se i valori misurati rientrano in un intervallo fisicamente plausibile per il sito di Milano e se non è presente un'escursione troppo ampia tra misure consecutive, in quanto indicatore di anomalie nella misurazione. In Tabella 2.3 sono riportati i valori di soglia utilizzati per questo primo filtraggio dei dati, in funzione di ciascuna grandezza.

Tabella 2.3 – Livello 1: valori minimi, massimi ed escursione tra misure consecutive utilizzati per filtrare eventuali valori spuri nelle misure. I valori soglia di pressione a livello del suolo dipendono dalla quota della stazione di misura.

Variabile	*Valore minimo*	*Valore massimo*	*Escursione massima*
Temperatura [°C]	-20	50	4
Umidità relativa [%]	20	100	5
Pressione a livello del suolo [hPa]	950	1100	10
Precipitazione [mm]	0	32767	5
Intensità del vento [m/s]	0	50	2
Direzione del vento [°]	0	360	20
Irraggiamento solare globale [W/m2]	4	1100	300
Irraggiamento solare diffusa [W/m2]	4	1100	300
Irraggiamento solare diretta normale [W/m2]	4	1100	300
Irraggiamento solare su piano inclinato di 30° [W/m2]	4	1100	300

I dati a 2", dopo la validazione di livello 1, sono trasmessi al *Laboratorio Distributed Energy Resources Test Facility di* RSE. Essi sono utilizzati per alimentare i sistemi di controllo e gestione ivi presenti e sperimentati nel progetto RdS 2.10 e in *Mission Innovation*, relativamente a microreti/sistemi multienergetiche.

2.2.2 Livello 2: validazione dati d'irraggiamento solare

I dati d'irraggiamento solare sottoposti a validazione consistono in:

- Irraggiamento globale solare su piano orizzontale (GHI);
- Irraggiamento diffuso su piano orizzontale (DIF);
- Irraggiamento diretto normale (DNI);
- Irraggiamento su piano inclinato di 30° ed esposto a Sud (GTI o GTI30).

Il processo di validazione di secondo livello adotta una serie di verifiche definite nell'ambito del *Task* 16 del progetto PVPS. Si deve tener presente che i motivi per cui le diverse componenti possono essere non corrette sono molteplici, dalla diversa accuratezza dei sensori (le precisioni di misura possono variare da strumento a strumento), a malfunzionamenti del *tracker* su cui è montato il pireliometro per la misura della DNI, a interferenze nella fase di misura e/o di trasmissione dei dati. La procedura di controllo esamina quindi se i dati misurati sono fisicamente plausibili (*test* ERL e PPL), se sono coerenti tra loro nel limite dell'accuratezza degli strumenti (*test* BSRN e K-*tests*), e se sussistono problemi di puntamento (*test Tracker*). La formulazione matematica dei suddetti *test* è riepilogata in Appendice 6 -. L'insieme dei controlli hanno ambiti di applicabilità diversi, a seconda ad es. dell'altezza solare, ma se solo uno dei test non viene superato, l'intero record di dati viene invalidato. La procedura di validazione viene applicata ai dati a 2" per evitare l'introduzione di incoerenze tra le diverse misure in fase di aggregazione o di media dei dati su intervalli temporali maggiori. I dati a 1' sono calcolati utilizzando solo i dati classificati come validi.

Le Figura 2.3÷Figura 2.5 mostrano una serie di grafici che permettono una maggiore comprensione della qualità dei dati d'irraggiamento misurati. Le variabili che sono rappresentate nei grafici, oltre agli irraggiamenti misurati, sono:

- Angolo di zenit e di azimut;
- GHI_{calc}, DNI_{calc}, ottenute a partire dalle misure complementari utilizzando la 1.1;
- Il *clearness (o clearsky) index* $k_c = GHI/GHI_{SODA}$, in cui GHI_{SODA} è l'irraggiamento a cielo sereno su piano orizzontale derivato da SODA;
- I parametri K, K_n e K_t descritti dalle equazioni 6.2, 6.3 e 6.4.

In Tabella 2.4 sono riportate le tipologie dei grafici presenti nelle composizioni delle Figura 2.3÷Figura 2.5. Le figure sono state ottenute utilizzando i dati a 2" ma campionati a 10" per mere esigenze grafiche. In appendice §o sono riportati i grafici ottenuti utilizzando anche i dati non validati (Figura 6.1÷Figura 6.3), mentre nelle Figura 2.3÷Figura 2.5 i dati invalidati sono stati esclusi.

Tabella 2.4 – Significato dei vari grafici presenti nelle composizioni di Figura 2.3÷Figura 2.5 e Figura 6.1÷Figura 6.3.

<table>
<tr><td rowspan="2">(1) $DNI_{meas} – DNI_{calc}$</td><td colspan="2">(2) Evoluzione temporale della GHI</td></tr>
<tr><td colspan="2">(3) Evoluzione temporale della DNI</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(4) Evoluzione temporale di GHI_{meas}/GHI_{calc}</td><td colspan="2">(5) Evoluzione temporale del clearness index</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>(6) GHI_{calc} vs. GHI_{meas}</td><td>(7) K vs. K_t</td><td>(8) Massimo valore di GHI vs. zenit e azimut</td></tr>
<tr><td>(9) GHI_{am}/GHI_{pm} vs. azimut</td><td>(10) K_n vs. K_t</td><td>(11) Massimo valore di DNI vs. zenit e azimut</td></tr>
</table>

Le figure in posizione (1) illustrano la frequenza dei campioni dello scarto tra DNI misurata e ricalcolata in funzione dell'angolo di azimut. Questa tipologia di grafico cerca di mettere in rilievo la presenza di importanti scostamenti tra la DNI e la DNI_{calc} e per quali valori di azimut si sono verificati, in quanto se esistessero problemi sistematici in corrispondenza di particolari valori di azimut, potrebbero esservi problemi di ombreggiatura o di funzionamento del tracker.

I grafici in posizione (9), invece, permettono di individuare situazioni fortemente non simmetriche nella radiazione misurata al mattino e al pomeriggio, che potrebbero essere indici di disallineamenti degli orologi o riferimenti temporali errati.

Le figure in posizione (4) e (5) mostrano gli andamenti temporali del rapporto tra l'irraggiamento globale misurato e quello ricalcolato tramite la 6.1, che dovrebbe assumere un valore prossimo ad 1, e l'andamento del *clearness index* k_c, che assume un valore prossimo ad 1 in corrispondenza delle situazioni di cielo sereno e prossimo a 0 in situazioni di cielo completamente nuvoloso.

I grafici in posizione (6) sono diagrammi di dispersione dell'irraggiamento globale calcolato rispetto a quello misurato, e più i dati sono in accordo tra loro, più vicino alla diagonale si posizionano. Esaminando le figure (6) dei dati grezzi, invece, si osserva la presenza di molte misure di GHI bassa e di elevati valori di GHI ricalcolata, indice questo di un'anomalia nelle misure delle componenti diretta e diffusa. Un confronto tra le figure (4) e (6) permette anche di individuare i periodi e l'ampiezza di tali anomalie.

Le figure in posizione (2) e (3) mostrano le *heatmap* dell'andamento temporale della GHI e della DNI, rispettivamente, al variare del tempo, dato che l'asse orizzontale indica il giorno dell'anno (*day of year*, DOY) e l'asse verticale l'ora del giorno (*hour of day*, HOD). La colorazione è funzione dell'intensità dell'irraggiamento. Le macchie bianche indicano assenza di misure in seguito al processo di validazione.

Le figure in posizione (7) mostrano i diagrammi di dispersione di K rispetto a K_t. In rosso sono rappresentati i dati invalidati secondo i K-tests, in marrone i dati con SZA >= 75°, in giallo i dati con SZA < 75°, in nero i dati con GHI < 50 W/m² e quindi non soggetti al processo di validazione. Le linee rette rappresentano le soglie da rispettare e sono colorate in base al dominio di applicazione. Esaminando i corrispondenti grafici relativi ai dati grezzi (riportati in appendice §6 -), si osserva che il campione di dati invalidati non è particolarmente numeroso.

Le figure in posizione (10) sono diagrammi di dispersione della K_n rispetto a K_t, e – a partire dalle loro definizioni – il vincolo $K_n<K_t$ equivale a richiedere che la componente diretta su piano inclinato sia inferiore alla componente globale riferita allo stesso piano. L'esame dei grafici con i dati grezzi evidenzia che raramente le misure violano questa condizione. I punti in nero sono sempre punti che non ricadono nel dominio di valutazione (in questo caso GHI<50 W/m²).

I grafici riportati in posizione (8) e (11) sono le isosuperfici dei valori massimi di GHI e di DNI, rispettivamente, al variare dell'altezza solare (in verticale) e di azimut (in orizzontale) nel corso del periodo temporale esaminato. Anche questi grafici, come quelli in posizione (1), permettono di individuare possibili anomalie connesse con l'angolo di azimut, ad es. per la presenza di ostacoli fissi o variabili (ovvero per la presenza di vegetazione il cui manto può variare nel corso dell'anno).

È utile osservare che il confronto tra Figura 2.5, ottenuta utilizzando i dati validati, e Figura 6.3, relativa ai dati grezzi permette di individuare la presenza di un periodo tra gennaio e febbraio 2023 durante il quale esiste una inconsistenza nelle misure delle componenti dell'irraggiamento durante il primo pomeriggio.

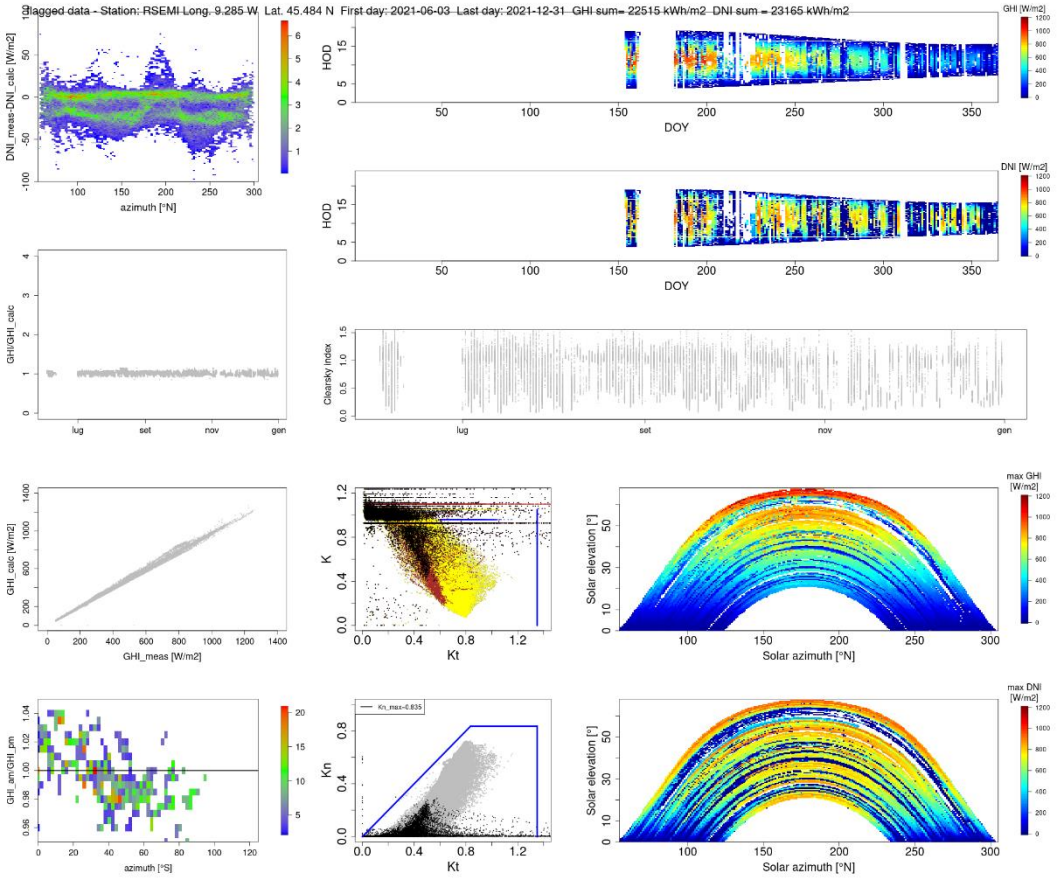


Figura 2.3 – Grafici riepilogativi dei dati privati dei dati invalidati a 2", ricampionati a 10" per esigenze grafiche, relativi al secondo semestre del 2021. La specifica dei singoli grafici e del loro posizionamento è riportata in Tabella 2.4.

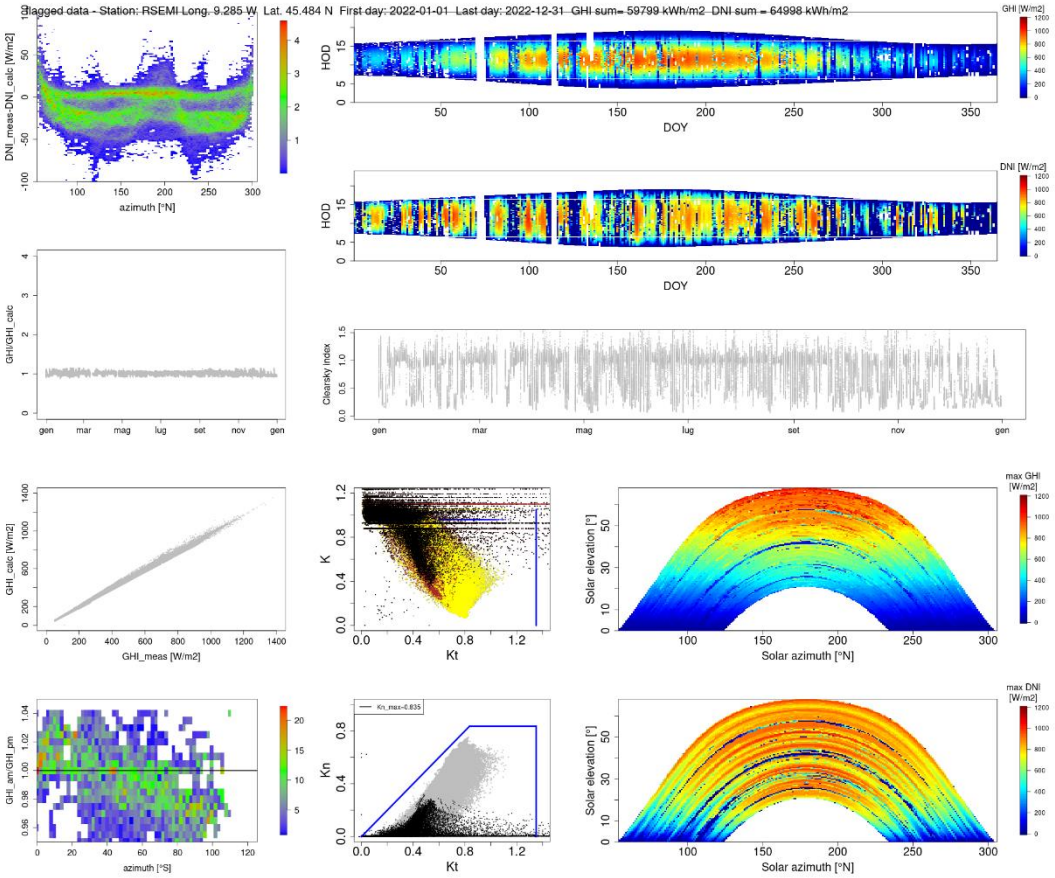


Figura 2.4 – Grafici riepilogativi dei dati privati dei dati invalidati a 2", ricampionati a 10" per esigenze grafiche, relativi al 2022.

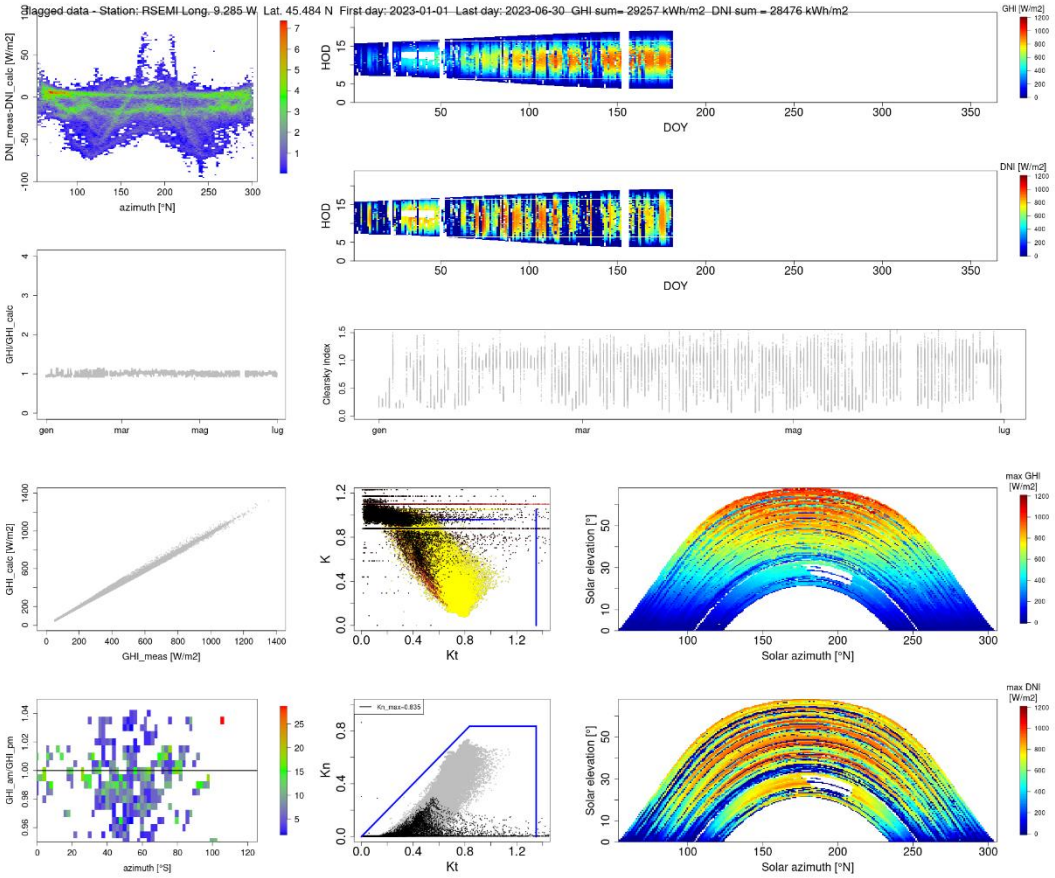


Figura 2.5 – Grafici riepilogativi dei dati privati dei dati invalidati a 2", ricampionati a 10" per esigenze grafiche, relativi al primo semestre del 2023.

2.3 Analisi di dati spettrofotometrici

RSE sta gestendo alcuni spettrofotometri, più precisamente dei SSIM (*Solar Spectral Irradiance Meter*), che permettono di misurare lo spettro dell'irraggiamento diretto normale (SDNI) in diverse località del territorio italiano: Milano e Piacenze (sedi di RSE, postazioni RSE-MI e RSE-PC), Cagliari (presso i laboratori di Sardegna Ricerche in località Macchiareddu, postazione SR-CA) e Catania (presso l'*innovation hub* di Enel Green Power, postazione EGP-CT). L'acquisizione dei dati, che purtroppo non è stata costante nel tempo, è iniziata ad agosto 2017 per il SSIM di Milano, a gennaio 2017 per quello di Piacenza, a settembre 2019 per quello di Cagliari e da ottobre 2021 per il SSIM di Catania.

Anche la numerosità mensile dei campioni acquisisti è stata varia. Si deve però tener presente che lo strumento è in grado di valutare lo spettro della DNI solo in condizioni di cielo sereno o con leggera copertura, per cui l'assenza di misure è dovuta sia a problemi di manutenzione sia a condizioni meteorologiche avverse. In Figura 2.6 è riportata la numerosità dei campioni mensili di spettri solari memorizzati in un database dedicato del gruppo di Clima e Meteorologia. I dati sono acquisiti in generale con un tempo di campionamento di 1', e gli spettri sono archiviati ogni 5'.

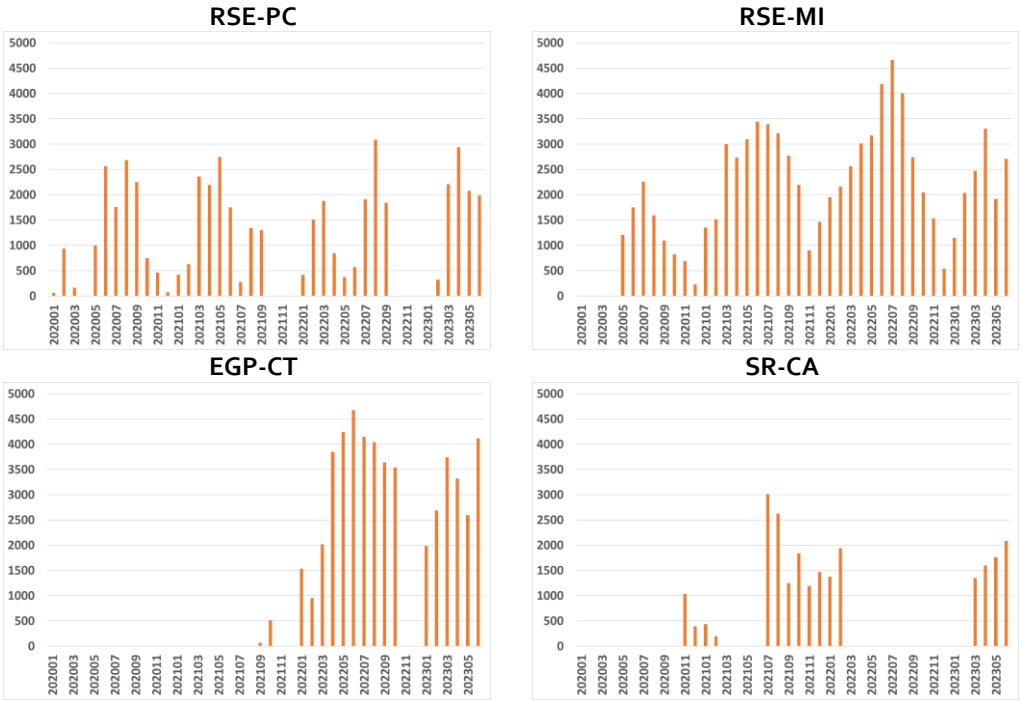


Figura 2.6 – Numerosità dei campioni di spettri della radiazione diretta normale SDNI cumulati a livello mensile da gennaio 2020 a giugno 2023 per le quattro postazioni gestite da RSE.

I dati spettrali non sono di semplice validazione, e in precedenti rapporti di RdS sono state esaminate varie metodologie, descritte in [5], e consistenti nei seguenti approcci:

- Analisi degli spettri basata sull'energia media dei fotoni (*Average Energy per Photon*, APE) associata agli spettri. In questo caso si deve calcolare la quantità $APE\,[eV] = \frac{hc}{q}\int_{300}^{1100} G(\lambda)d\lambda / \int_{300}^{1100} \lambda G(\lambda)d\lambda$, in cui $G(\lambda)$ è la radianza spettrale e h, c, q sono rispettivamente la costante di Planck, la velocità della luce e la carica dell'elettrone. In condizioni di cielo sereno e con bassi valori di spessore ottico degli aerosol e basso contenuto di acqua precipitabile, il valore di APE per un air mass AM (secante dell'angolo di zenit) di 1.5 è pari ad 1.83 eV. I valori che deviano in maniera eccessiva da questa soglia possono essere ritenuti non accettabili.

- Confronto tra valore di DNI misurata da pireliometro a terra, quando disponibile, e dato SDNI integrato sull'intero spettro solare (tenendo conto anche della funzione di risposta del pireliometro). Scarti eccessivi tra questi valori *broadband* denotano problemi di misura.
- Costruzione di uno spettro "sintetico" e analisi dello scarto rispetto allo spettro misurato.

L'ultimo metodo risulta più efficace dei precedenti e di più semplice automatizzazione. Questa procedura consiste nell'effettuare un'inversione dello spettro per calcolare un insieme di parametri atmosferici che determinano la forma dello spettro. In particolare, la SDNI dipende dal contenuto totale di acqua precipitabile, di ozono e della tipologia e contenuto di aerosol atmosferici, valutato attraverso le tre coppie dei parametri dei coefficienti di estinzione e degli esponenti di Angström. Basandosi su quanto sviluppato in ARTEMIS, vengono calcolati i parametri atmosferici che caratterizzano lo spettro misurato con cui viene poi ricalcolato lo spettro "sintetico". Per inciso, la metodologia permette anche di prolungare fino a 4000 nm quegli spettri di cui si dispongono delle misure solo fino a 1200 nm (Catania). Se è stato possibile calcolare tutti i parametri, con valori compresi in determinati intervalli di validità fisica, e se l'errore tra lo spettro misurato e quello "sintetico" è piccolo, lo spettro viene classificato come valido.

A titolo esemplificativo, in Figura 2.7 sono riportati in a) gli andamenti dello spettro misurato in Milano (in nero) e ricostruito (in rosso) relativi al 27/06/2023 alle 11:00 UTC. L'errore percentuale tra gli scarti dei due spettri è estremamente piccolo (0.378 %), tanto che le due curve sono sostanzialmente sovrapposte. A destra b) sono riportate le trasmittanze dell'ozono (in rosso), del vapor acqueo (in blu) e degli aerosol (in nero) dedotti dall'operazione di ricostruzione.

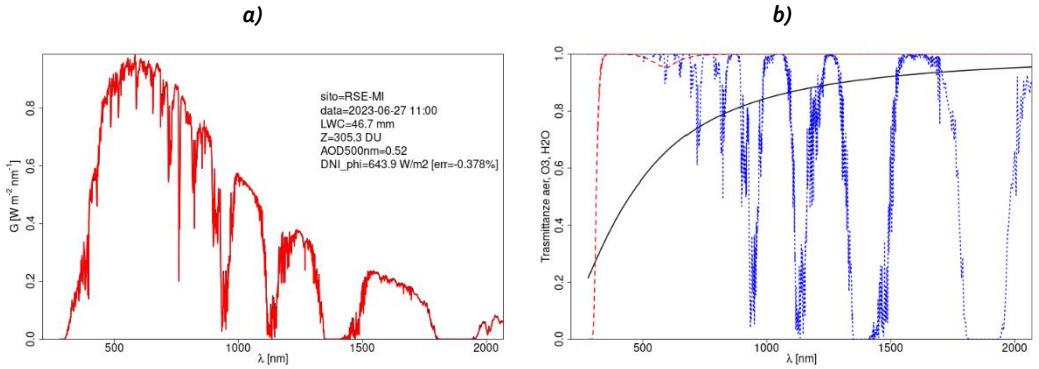


Figura 2.7 – a) Andamento dello spettro misurato (in nero) e di quello "sintetico" in rosso. In legenda sono riportati i valori di alcuni parametri dedotti in fase di retrieving e l'errore percentuale tra i due spettri. b) Andamento delle trasmittanze dell'ozono (linea tratteggiata rossa), del vapor acqueo (linea puntinata blu) e degli aerosol (linea continua nera).

Per meglio comprendere il popolamento del *database* degli spettri di DNI, sono qui riportati alcuni andamenti temporali delle *heatmap* dell'irraggiamento diretto normale DNI ottenuti integrando i dati misurati degli spettri di SDNI acquisiti ogni minuto. I grafici sono dello stesso tipo (3) di Tabella 2.4, ottenuti utilizzando i dati misurati campionati al minuto. In questo modo è così possibile individuare facilmente sia i periodi di interruzione delle misure e/o di condizioni meteorologiche perturbate, sia possibili problemi nel sistema di puntamento, come ad esempio risulta evidente esaminando i dati di DNI di Cagliari del periodo estivo del 2021 (Figura 2.9), situazione evidenziata dal cerchio rosso. Le Figura 2.8÷Figura 2.11 riportano le *heatmap* della radiazione diretta normale DNI ottenuta integrando i dati di radianza spettrale misurata nelle quattro postazioni di misura gestite da RSE (Milano, Cagliari, Piacenza e Catania).

I grafici riportano in ascissa il giorno dell'anno (DOY), mentre in ordinata l'ora del giorno (HOD). I dati sono tutti campionati ad un minuto.

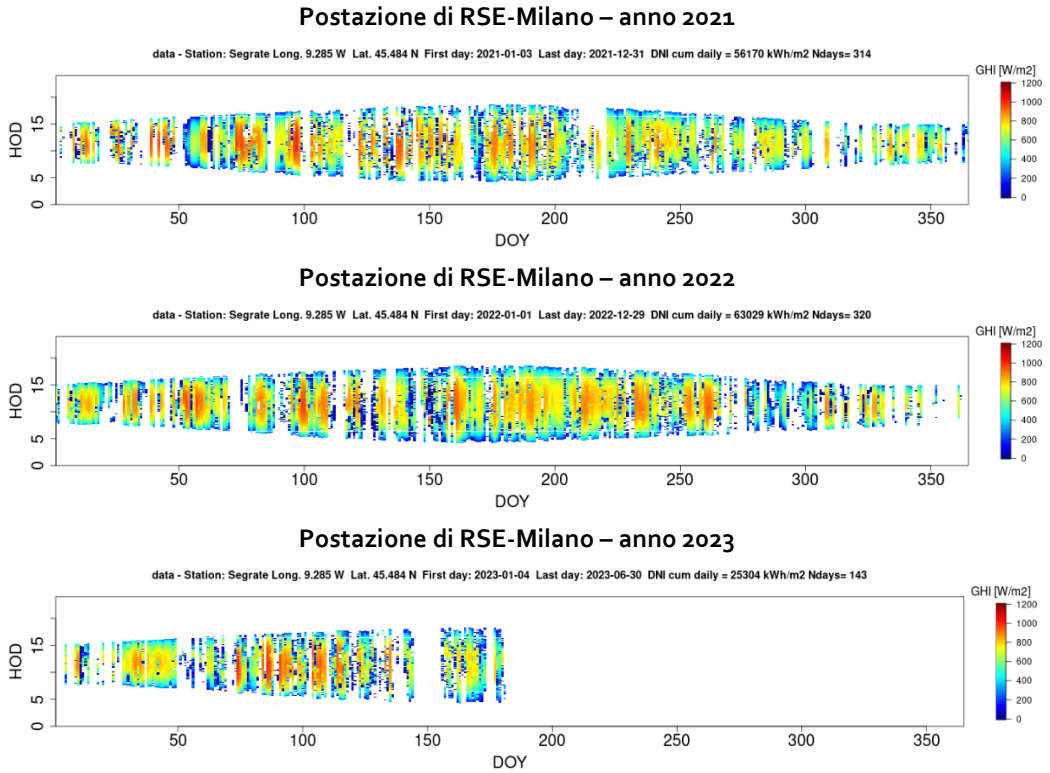


Figura 2.8 – Isosuperfici della radiazione diretta normale DNI in funzione del giorno dell'anno (DOY) e dell'ora giornaliera (HOD) per il periodo 2021÷2023 per la postazione di Milano.

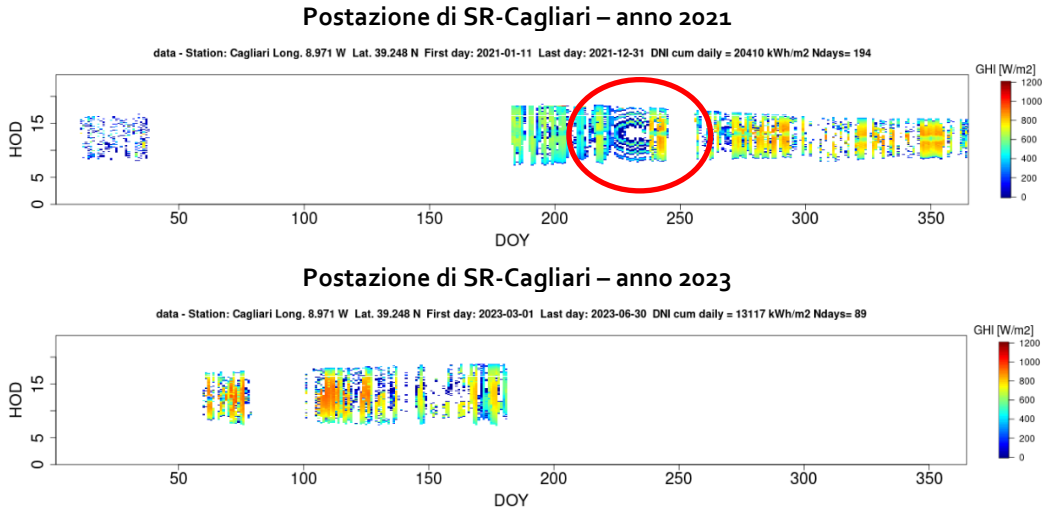
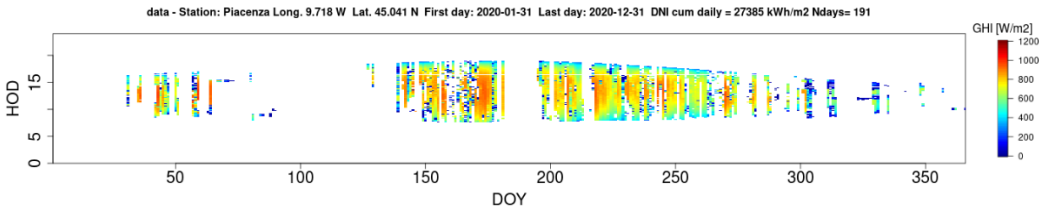
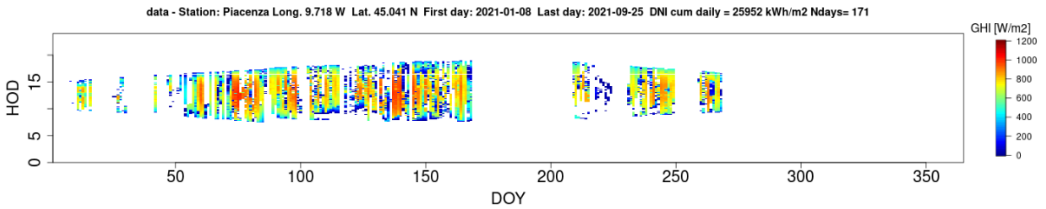


Figura 2.9 – Isosuperfici della radiazione diretta normale DNI in funzione del giorno dell'anno (DOY) e dell'ora giornaliera (HOD) per gli anni 2021 e 2023 per la postazione di Cagliari.

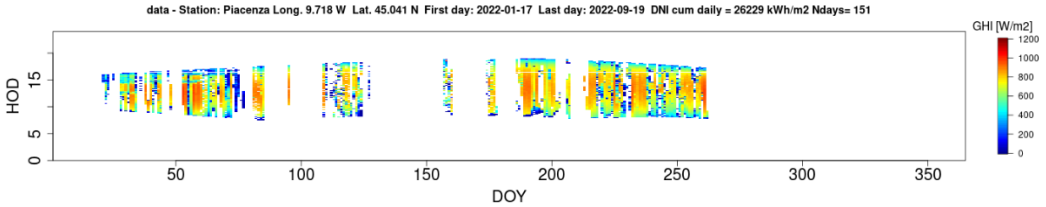
Postazione di RSE-Piacenza – anno 2020



Postazione di RSE-Piacenza – anno 2021



Postazione di RSE-Piacenza – anno 2022



Postazione di RSE-Piacenza – anno 2023

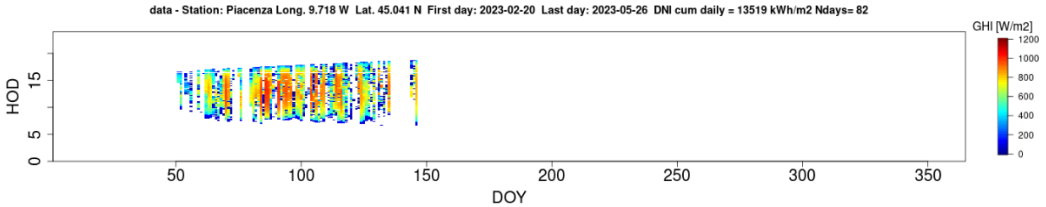
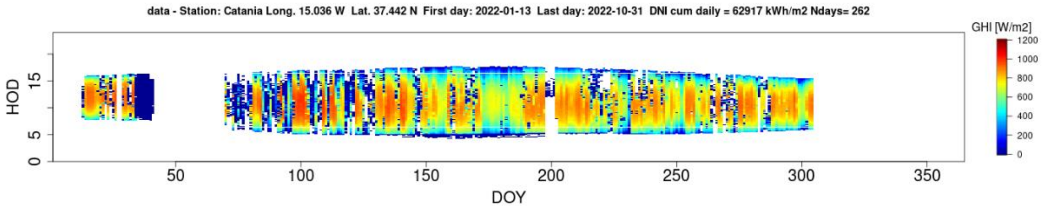


Figura 2.10 – Isosuperfici della radiazione diretta normale DNI in funzione del giorno dell'anno (DOY) e dell'ora giornaliera (HOD) per il periodo 2020÷2023 per la postazione di Piacenza.

Postazione di EGP-Catania – anno 2022



Postazione di EGP-Catania – anno 2023

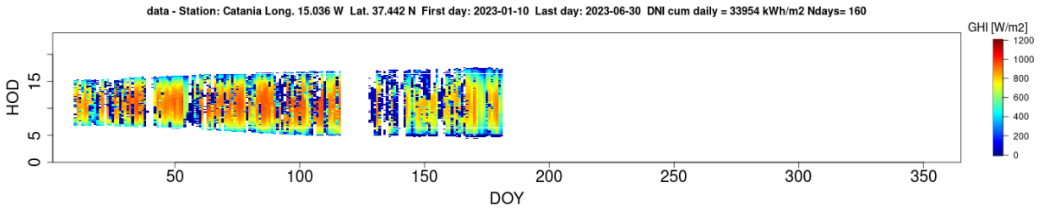


Figura 2.11 – Isosuperfici della radiazione diretta normale DNI in funzione del giorno dell'anno (DOY) e dell'ora giornaliera (HOD) per gli anni 2022 e 2023 per la postazione di Catania.

In Tabella 2.5 è riassunta la statistica della disponibilità e della percentuale di dati che hanno superato il processo di validazione sopra desrcitto:

Tabella 2.5 – Numerosità degli spettri che hanno e che non hanno superato il test di validazione a fine giugno 2023.

Sito	*Numerosità degli spettri archiviati*	*Dati validi*	*Dati non validi*
Piacenza	464426	54.6%	45.4%
Catania	286309	73.9%	26.1%
Milano	488895	87.1%	12.9%
Cagliari	151484	35.2%	64.8%

3 - INSTALLAZIONE DEL NEFOIPSOMETRO PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA NUVOLOSITÀ

3.1 Presentazione dello strumento

Il nefoipsometro (*celiometer* in inglese), è uno strumento scientifico ampiamente utilizzato per la misurazione dell'altezza della base delle nubi e per valutare la visibilità verticale atmosferica. La necessità di installare un simile strumento è dovuta alla richiesta di meglio caratterizzare gli aerosol atmosferici e anche la struttura verticale delle nubi.
Come sarà illustrato più avanti, il fascio laser del nefoipsometro è in grado di arrivare fino a quote di circa 15000 m, riuscendo in questo modo a caratterizzare l'estensione verticale delle nubi, distinguendo fino a 5 diversi strati di nubi e anche la fase – liquida o solida – presente nelle stesse. Unitamente ad informazioni satellitari, quali la tipologia della nube (*Cloud Type* , CT), l'altezza della sua sommità e la sua fase predominante – informazioni ottenute analizzando i dati radiometrici acquisiti dal *Meteosat Second Generation* (MSG) – sarà possibile costruire una statistica dello spessore fisico ed ottico delle nubi sulla base della loro tipologia CT. Per quanto riguarda invece gli aerosol atmosferici, lo strumento è in grado di fornire preziosissime informazioni sulla presenza di alcune tipologie di aerosol, ad es. sabbia, fumo dovuto ad incendi, cenere vulcanica, aerosol di grana fine e grossa. Soprattutto, è possibile anche individuare l'altezza a cui questi inquinanti si dispongono in generale, ma anche in corrispondenza di determinate condizioni meteorologiche. Queste informazioni, oltre ad esser utilizzate in questo progetto, saranno estremamente utili al metodo ARTEMIS [1] sviluppato nel progetto RdS 2.5, in cui un ruolo determinante è svolto dagli aerosol nei momenti di assenza di copertura nuvolosa, e delle caratteristiche della copertura nuvolosa altrimenti.
Il funzionamento del nefoipsometro si basa sull'emissione di un fascio luminoso verso l'alto, utilizzando una sorgente laser, generalmente nel vicino ultravioletto o nell'infrarosso. Il fascio luminoso viene quindi riflesso verso lo strumento da parte dei costituenti atmosferici poichè lungo il suo tragitto interagisce con particelle atmosferiche, come ad esempio gocce d'acqua, cristalli di ghiaccio o aerosol. Calcolando il tempo intercorso tra l'emissione e la successiva rilevazione a terra dei fotoni, lo strumento è in grado di calcolare l'altezza dal suolo alla quale è avvenuta la riflessione. Analizzando tali dati, è possibile ottenere un profilo verticale di assorbimento nella banda usata dallo strumento. Ciò permette di estrarre informazioni riguardanti, ad esempio, l'altezza dei diversi strati di nubi, la visibilità verticale, la presenza di nebbia, o l'altezza dello strato turbolento della bassa atmosfera (*boundary layer*).

RSE ha acquisito un nefoipsometro modello CL61 di marca Vaisala. Questo strumento presenta un diodo laser InGaAs che emette un fascio laser in direzione quasi verticale alla lunghezza d'onda di 910.55 nm. Questo tipo di nefoipsometro è particolarmente adatto all'analisi della componente aerosolica atmosferica. Il CL61 presenta una risoluzione spaziale di circa 4.8 m, con un limite di altezza di circa 15400 metri, ed è in grado di analizzare fino a 5 strati di nuvolosità. Possiede inoltre due sensori in grado non solo di analizzare l'attenuazione della luce emessa, ma anche di ricavare informazioni sulla geometria delle particelle grazie ad una misura di depolarizzazione. Il fascio laser che viene emesso, infatti, presenta una polarizzazione lineare che, a contatto con particelle non sferiche, viene persa. La capacità di analizzare la componente polare e quella *cross-polare* della luce riflessa permette di stimare la forma e il tipo di particella con la quale i fotoni hanno interagito, in particolare analizzando il rapporto tra le componenti, chiamato *linear depolarization ratio* (LDR). In Figura 3.1 viene riportata la scala dei possibili valori di LDR con gli intervalli di valori attribuibili alla presenza di un determinato tipo di particelle. Si nota come valori bassi di LDR sono associati a particelle sferiche, mentre valori elevati sono associati a strutture più complesse, come i cristalli di ghiaccio o la cenere vulcanica. Sempre dalla Figura 3.1 si nota come la misura di LDR non sia in grado di associare in modo univoco un valore ad una particella atmosferica, ma più tipi

di particelle ricadano nello stesso *range* di misura. È quindi necessario utilizzare ulteriori informazioni meteorologiche per poter discriminare in maniera accurata diversi tipi di aerosol o idrometeore.
La risoluzione temporale è di circa 0.2" per ogni misura di polarizzazione, anche se le misure vengono in seguito mediate ad almeno 5" per aumentare il rapporto segnale/rumore. Avendo inoltre un unico fotodiodo sia per il filtro polare che per quello *cross*-polare, lo strumento non necessita di calibrazione. Oltre alle misure di attenuazione e di depolarizzazione, il CL61 effettua anche delle operazioni interne per stimare il valore di alcune variabili descritte nel paragrafo §3.3.

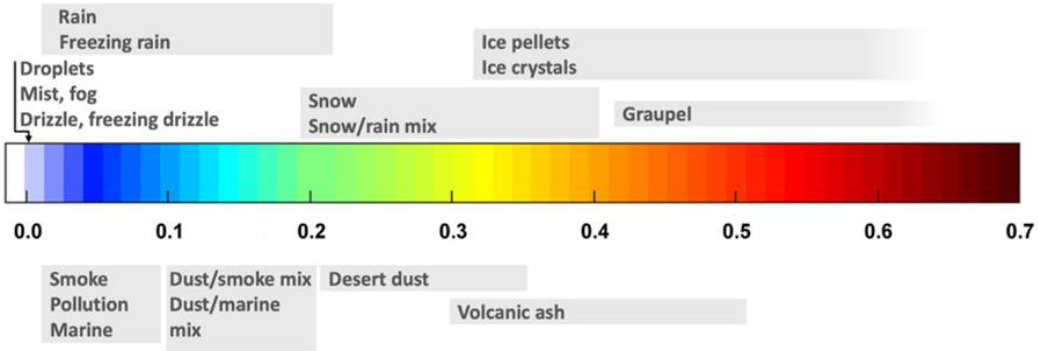


Figura 3.1 – Scala dei possibili valori di *linear depolarization ratio (LDR)* con le relative le particelle atmosferiche. Si nota che i valori più bassi di LDR sono associati a particelle dalla forma sferica, mentre i valori più alti a particelle con strutture più complesse, come i cristalli di ghiaccio e la cenere vulcanica. Si nota anche che non è possibile con il solo valore di LDR distinguere univocamente la particella che lo ha generato.

3.2 Installazione dello strumento e catena di trasmissione dei dati

Il nefoipsometro (Figura 3.2) è stato installato [11] presso la sede di RSE di Milano. Le coordinate sono riportate in Tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Coordinate di installazione del nefoipsometro

Latitudine	*Longitudine*	*Altezza terreno (s.l.m.)*
45.477222 N	9.261389 E	110 m

Figura 3.2 – Nefoipsometro CL61 installato presso la sede di Milano di RSE.

Il nefoipsometro CL61 utilizza un client SSH per la configurazione iniziale. Lo strumento viene collegato alla rete locale di RSE tramite cavo LAN e attualmente è stato configurato per l'assegnazione di un indirizzo IP dinamico tramite DHCP, ma in futuro sarà modificato in uno statico. In questo modo è possibile accedere da remoto allo strumento per verificare o modificare il suo stato ed il corretto funzionamento.
L'acquisizione dei dati è effettuata con un tempo di campionamento di 1'. I dati sono scritti in un file binario, di formato NETCDF, che viene poi trasferito ogni 5' su un server gestito da CLM.
Ogni 15' i tre files più recenti sono trasferiti su un server FTP di RSE in una cartella a cui si potrà avere accesso, tramite apposite credenziali, anche dall'esterno. Questa operazione è stata implementata in vista di una condivisione dei dati con la rete italiana ALICEnet che gestisce altri nefoipsometri distribuiti sul territorio nazionale (si veda §0).

L'installazione è stata completata il giorno 30/05/2023 e lo strumento è in attività dal giorno successivo.

3.3 Descrizione dell'*output*

Come discusso nel paragrafo §3.1, il nefoipsometro CL61 misura direttamente tre variabili: l'*attenuated backscatter* (ABS) e le componenti parallela e perpendicolare della polarizzazione, che danno origine al LDR. A partire da esse è possibile ottenere un profilo verticale completo dell'atmosfera sovrastante lo strumento.

Il software proprietario installato nel CL61 esegue una prima analisi dei dati di ABS e LDR misurati al fine di calcolare alcune grandezze derivate di interesse, elencate in Tabella 3.2, che sono incluse nel file NetCDF di output. L'LDR è fondamentale per caratterizzare le nubi ed il tipo di precipitazione eventuale. I file di output comprendono inoltre un numero di variabili statiche che indicano lo stato dello strumento al momento della registrazione del dato.

Tabella 3.2 – Variabili presenti nei file di output netCDF del nefoipsometro CL61.

	Quantità	***Descrizione***
Misura diretta	Parametri meteorologici interni allo strumento	Temperatura, umidità e pressione interne allo strumento
	Attenuated backscattered (ABS)	Coefficiente di attenuazione della luce in *backscattered*
	Polarizzazione parallela	Componente parallela della polarizzazione della luce *backscattered*
	Polarizzazione perpendicolare	Componente perpendicolare della polarizzazione della luce *backscattered*
Misura indiretta	*Linear depolarization ratio (LDR)*	Rapporto tra componente perpendicolare e parallela della polarizzazione della luce *backscattered*
	Altezza della base delle nubi	Altezza stimata del primo strato di nuvole rilevato
	Visibilità verticale	Stima della visibilità verticale atmosferica.
	Copertura nuvolosa	Stima della copertura nuvolosa del cielo, in ottavi.
	Copertura nuvolosa negli strati	Copertura nuvolosa aggregata attraverso tutti gli strati di nubi rilevati, fino ad un massimo di 5
	Altezza degli strati di nubi	Altezza stimata di tutti gli strati di nubi rilevati
Parametri statici	Stato dello strumento	Comprende vari dettagli sul corretto funzionamento delle componenti

3.3.1 Esempi di *output* e alcuni casi studio

Come mostrato in Tabella 3.2, il nefoipsometro CL61 restituisce un numero considerevole di variabili, alcune derivate utilizzando codici proprietari. L'analisi svolta da RSE si è concentrata sulle due variabili direttamente collegate ai dati grezzi e maggiormente significative per la caratterizzazione della situazione meteorologica: l'*attenuated backscatter* (ABS) ed il *linear depolarization ratio* (LDR).

L'ABS (riportato in alto in Figura 3.3 e Figura 3.6) rappresenta una misura dell'opacità dell'atmosfera e/o delle nubi se presenti , rispetto alla lunghezza d'onda utilizzata dal lidar, mentre l'LDR (riportato in basso in Figura 3.3 e Figura 3.6) assume diversi valori dipendentemente dalla geometria delle componenti dell'atmosfera e/o delle nubi, se presenti, come riassunto in Figura 3.1.

Nel breve periodo di attività dello strumento sono stati registrati alcuni eventi degni di nota, due dei quali sono stati commentati di seguito, confrontando quanto registrato dal nefoipsometro con alcune mappe meteorologiche disponibili.

3.3.2 Caso 1: 14/06/2023

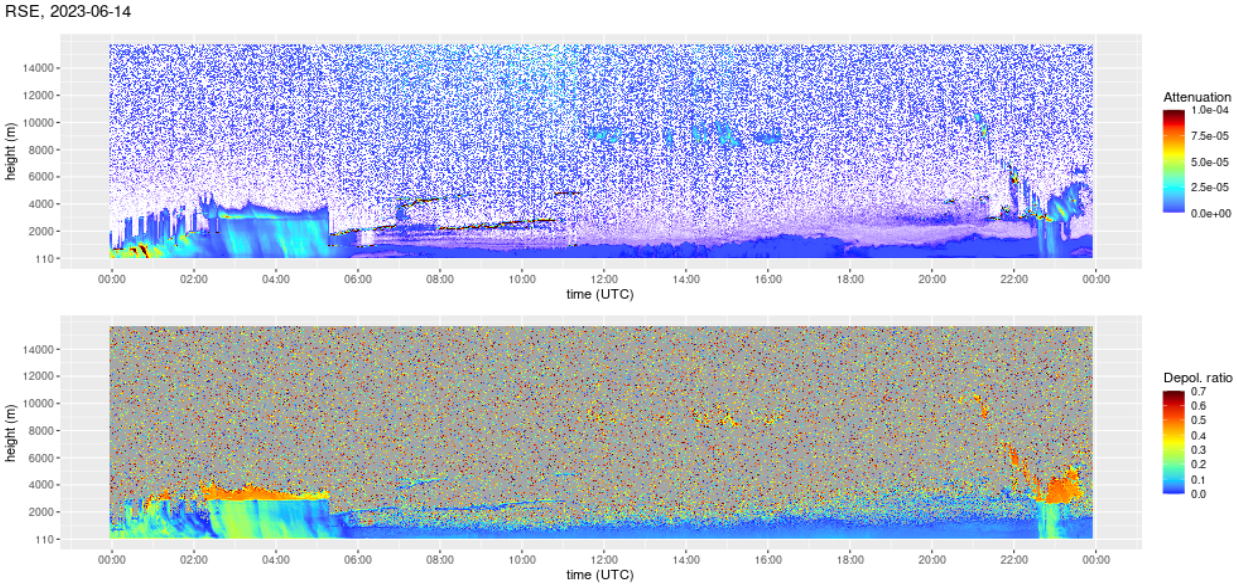


Figura 3.3 – Grafico delle misure verticali di ABS (sopra) e LDR (sotto) al variare del tempo, dalle ore 00 alle ore 24. Le misure sono state effettuate il giorno 14/06/2023 presso la sede RSE di Milano.

In Figura 3.3 sono riportate le misure di ABS e LDR registrate nella giornata del 14/06/2023, in cui è possibile identificare alcuni tra i più comuni fenomeni osservabili con lo strumento. In particolare, si può osservare:

- **Dalle 00:00 alle 06:00:** l'area è stata interessata da precipitazioni, in quanto si osserva una forte attenuazione della luce fino al suolo, con corrispondenti valori di LDR superiori a 0.1, fatto che trova riscontro nel grafico (Figura 3.4) della precipitazione cumulata registrata presso la stazione meteo di Milano. In questa fase si nota come la precipitazione sia caratterizzata da valori di LDR tra 0.1 e 03, leggermente più elevati rispetto a quelli attribuiti dalla legenda in Figura 3.1 alle precipitazioni in fase liquida. La nube che genera la precipitazione non è chiaramente visibile, ma è probabilmente di origine convettiva, con precipitazioni inizialmente ghiacciate che fondono una volta

raggiunto il *melting layer*, chiaramente individuabile in Figura 3.3 (grafico dei valori di LDR) intorno ai 3000 m.

- **Dalle 06:00 alle 11:00** sono presenti a tratti nubi su due strati, a circa 2000 m e 4000 m. Il *boundary layer* (strato turbolento della bassa atmosfera), indicativamente rappresentato dalla fascia con valori di LDR compresi tra 0.0 e 0.1, tipici di fumi ed inquinanti (cfr. Figura 3.1), torna ben visibile.
- **Dalle 11:00 alle 16:00** sono visibili dai valori di ABS delle nubi a circa 8000 m, probabilmente dei cirri, sia data la quota a cui sono rilevati, sia per la loro caratteristica di avere ridotta estensione verticale. I valori di LDR superiori a 0.3 confermano di essere in presenza di nubi formate da cristalli di ghiaccio.
- **Dalle 21:00 alle 23:59** si osserva nuovamente la presenza di idrometeore in fase solida oltre i 3000 m, dati valori di LDR superiori a 0.4. In particolare, alle 23 circa, si ha precipitazione al suolo.

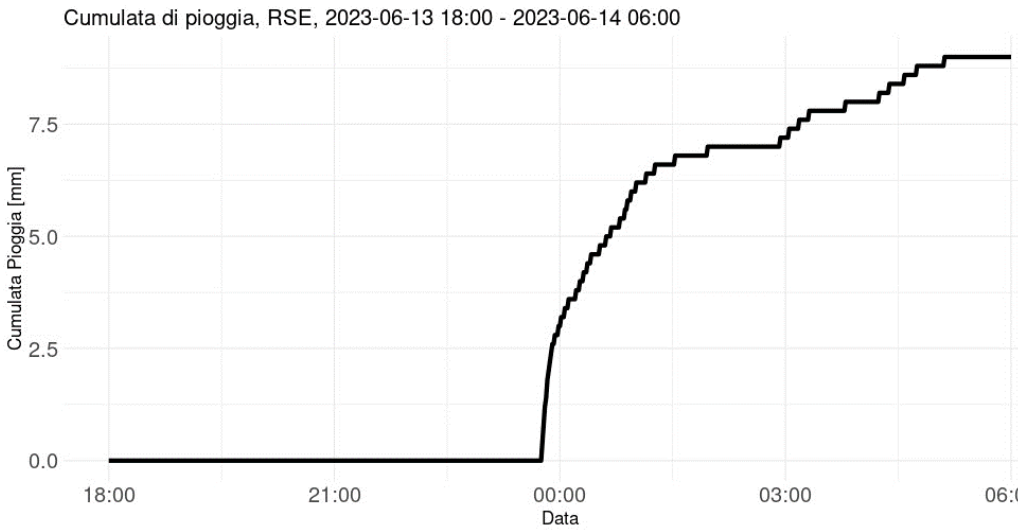


Figura 3.4 – Quantitativo della pioggia cumulata, tra le 18 del 13 Giugno 2023 e le 06 del 14 Giugno, misurata da un pluviometro posto nella sede di RSE, collocato nei pressi del nefoipsometro CL61.

3.3.3 Caso 2: 20/06/2023

La giornata del 20/06/2023 è stata caratterizzata dall'avvezione di grandi quantità di sabbia sahariana, come mostrato nel ritaglio di immagine satellitare riportato in Figura 3.5.

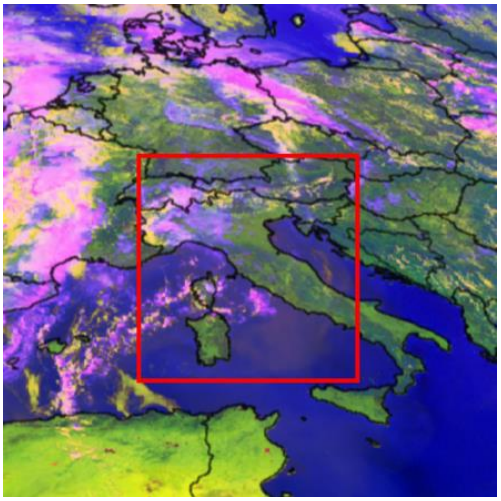


Figura 3.5 – Ripresa satellitare della penisola italiana per le 12:00 UTC del 20/06/2023. Immagine trispettrale ottenuta combinando i canali eur_v06 (centrato su 0.6 µm), eur_o16 (centrato su 1.6 µm) e eur_o39 (infrarosso centrato su 3.9 µm) di MSG. Il rettangolo rosso evidenzia la presenza di sabbia.

La combinazione dei canali MSG utilizzata in Figura 3.5, evidenzia, con la colorazione rosata, la presenza di sabbia, sia sul mare, sia sulla pianura padana, dove è presente anche della nuvolosità interessata da sabbia nella sua composizione.
In Figura 3.6 sono riportate le misure di ABS e LDR registrate nella medesima giornata, mostrando le strutture tipiche della presenza di sabbia fino a 5000 m di quota, proprio come illustrato anche nella documentazione del nefoipsometro [12]. La presenza di ingenti quantità di sabbia a latitudini così elevate è dovuta ad un'avvezione con flusso meridionale di provenienza nordafricana.

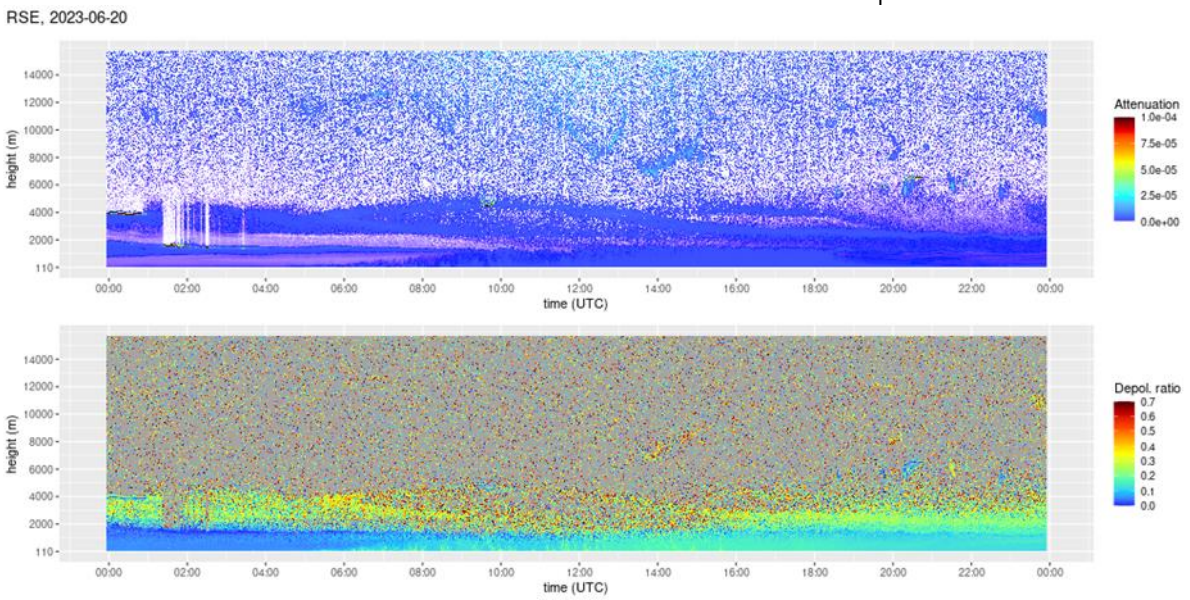


Figura 3.6 – Grafico delle misure verticali di ABS (sopra) e LDR (sotto) al variare del tempo. Le misure sono state effettuate il giorno 20/06/2023.

Sul Tirreno è presente una struttura anticiclonica, come evidenziato dalle mappe di geopotenziale a 700 hPa e a 850 hPa riportate in Figura 3.7 e come si evince anche dal senso di rotazione del vento (orario) illustrato in Figura 3.8 alle medesime quote di riferimento. Analizzando le mappe di geopotenziale, dai valori e dalla struttura delle isolinee si evidenzia un'area di alta pressione centrata sulla Tunisia e caratterizzata da elevate temperature. La circolazione, attorno all'area anticiclonica, è ben rappresentata dalle mappe di intensità e direzione del vento, che evidenziano un forte flusso Sudoccidentale nella parte centro settentrionale dell'Italia, che favorisce lo spostamento di masse sabbiose dal Nord Africa.

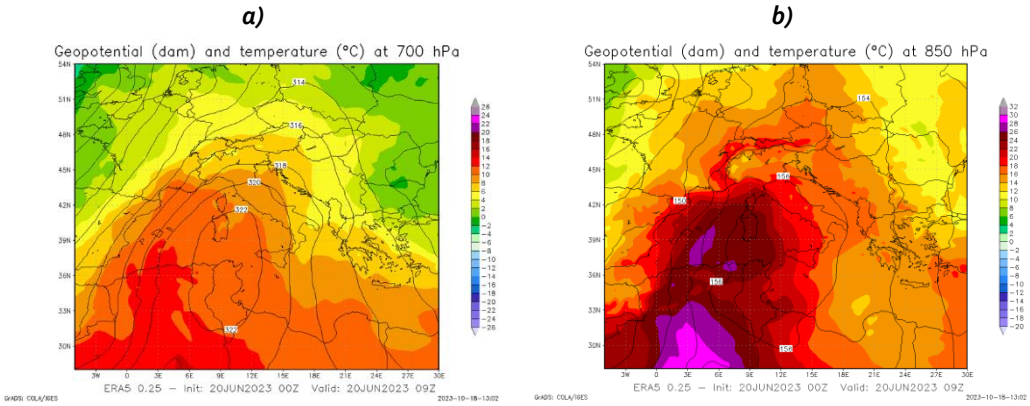


Figura 3.7 – Mappe di geopotenziale (isolinee nere) e di temperatura (colorazione) ottenute a partire dai dati di rianalisi di ERA5 distribuite dal ECMWF e relative alle ore 09 UTC del 20/06/2023. In a) i dati a 700 hPa (circa 3000 m=300 dam di quota), in b) i dati a 850 hPa (circa 1500 m=150 dam).

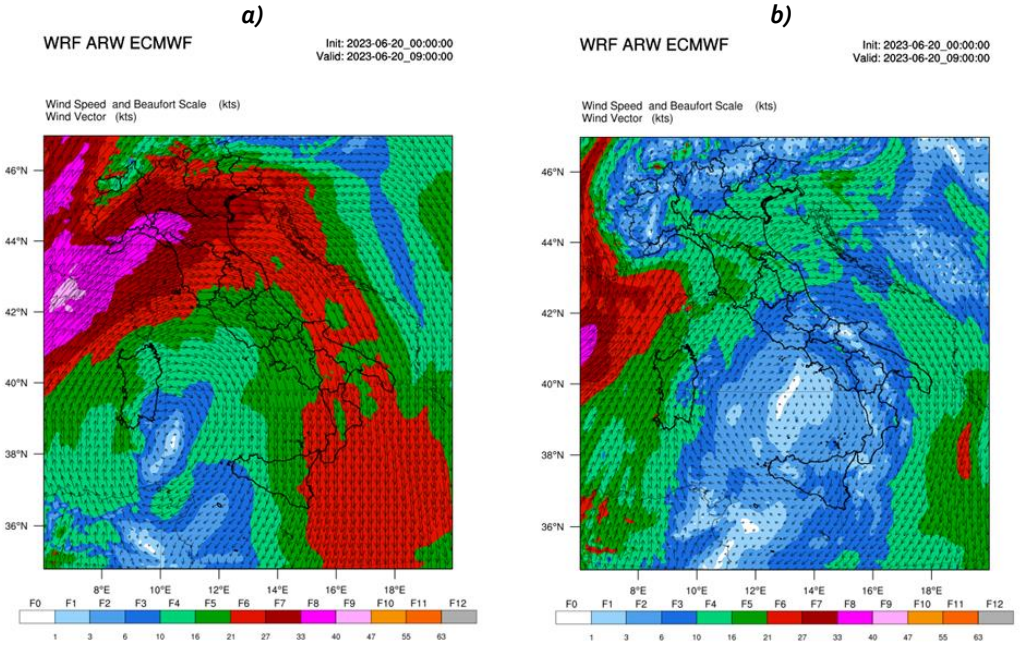


Figura 3.8 – Mappe di velocità (espressa in nodi) e direzione del vento fornite dal modello numerico meteorologico WRF relative alle ore 09 UTC del 20/06/2023. In a) i dati si riferiscono al 700 hPa, mentre in b) a 850 hPa.

Durante l'intero arco della giornata il nefoipsometro registra correttamente la presenza di sabbia tra i 2000 m e i 4000 m.
Si nota come questo strato tenda a disturbare le misure di LDR sopra i 4000 m: le nubi visibili nel grafico di ABS sono quasi indistinguibili dal rumore di fondo in quello di LDR.

3.4 Pulizia dei dati e implementazione di filtri per la riduzione del rumore

Per ottenere i grafici mostrati in Figura 3.3 e Figura 3.6, sono state eseguite alcune operazioni preliminari. In primo luogo, è stato necessario rimuovere tutte le osservazioni che presentavano valori non fisici, al fine di garantire l'integrità dei dati. In particolare, sono stati eliminati tutti i valori negativi sia per ABS che per LDR, seguendo le indicazioni fornite in [12]. Inoltre, sono stati imposti dei limiti specifici per LDR (0.7), definita nella documentazione dello strumento, e ABS ($5 \cdot 10^{-4}$), derivata arbitrariamente dall'osservazione dei grafici riportati nella documentazione, al fine di stabilire una soglia di accettabilità.
Nonostante l'esclusione dei valori non fisici, i dati rimanenti, soprattutto quelli relativi a LDR, presentano ancora un certo livello di rumore. Tale rumore si manifesta in modi diversi tra i due parametri:

- Nel grafico di ABS si può osservare la presenza di *pixel* con valori tendenti allo zero. Tuttavia, tali *pixel* non formano strutture chiaramente definite o raggruppate.
- Nel grafico di LDR si evidenzia la presenza di rumore distribuito lungo l'intero spettro dei valori accettabili, senza una specifica concentrazione in determinate aree.

La presenza di questo rumore può compromettere il riconoscimento automatico delle strutture registrate. In vista anche di eventuali future applicazioni di *machine learning* per il riconoscimento automatico di strutture nelle immagini prodotte dallo strumento, si è pertanto cominciato a ricercare metodi per la riduzione del rumore.

I metodi illustrati in seguito sono i primi risultati ottenuti da questo studio e nel corso della LA3.2 verranno sviluppati e ulteriormente testati per valutarne l'efficacia. La caratteristica principale dei filtri da utilizzare è la capacità di riconoscere automaticamente il segnale senza alterarlo.
Usando come riferimento i dati raccolti il giorno 22/06/2023 e rappresentati in Figura 3.9, sono stati implementati due filtri, descritti brevemente nei paragrafi successivi.

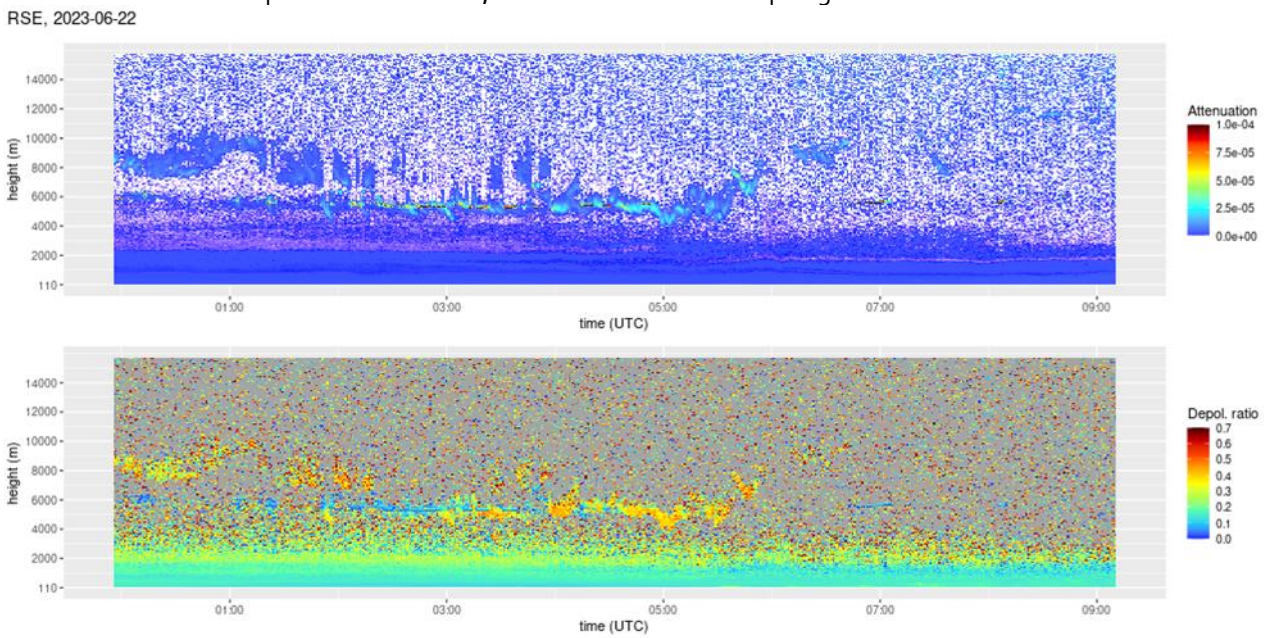


Figura 3.9 – Grafico delle misure verticali di ABS (sopra) e LDR (sotto) al variare del tempo. Le misure sono state effettuate nelle prime ore del giorno 22/06/2023. Si nota la presenza di rumore in entrambe le immagini.

3.4.1 Metodo 1

Data la matrice dei dati raccolti dal nefoipsometro e rappresentata in Figura 3.9, il primo filtro del rumore consiste in:

1. Considerare ogni sottomatrice quadrata $N \times N$ con N dispari (in Figura 3.10, $N = 5$) e considerare la quantità q di NA presenti.
2. Se più della metà della sottomatrice è composta da NA, ossia se $q > N^2/2$, l'intera sottomatrice viene impostata a NA.

Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 3.10, nella quale il segnale, specialmente quello di LDR, risulta nettamente più pulito.
Questo filtro è piuttosto semplice e veloce, ma presenta il difetto di alterare i dati lungo il bordo del segnale, dove la densità di valori NA è superiore a quella dei valori non-NA.

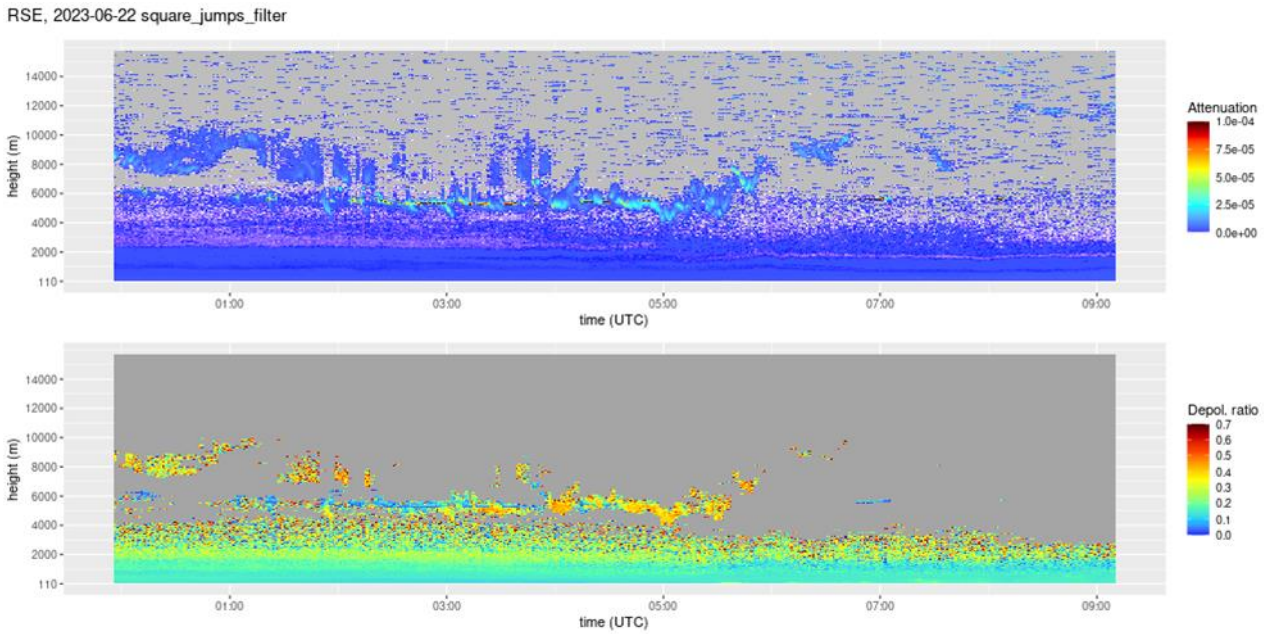


Figura 3.10 – Grafico delle misure verticali di ABS (sopra) e LDR (sotto) al variare del tempo. Le misure sono state effettuate nelle prime ore del giorno 22/06/2023. Il rumore è stato parzialmente rimosso utilizzando il metodo 1.

3.4.2 Metodo 2

Questo secondo metodo consiste in:

1. Per ciascun NA presente, si considerano i valori non nulli ad esso adiacenti a_{ij}.
2. Per ciascun valore adiacente a_{ij} si considera la sottomatrice $N \times N$ con N dispari (in Figura 3.11, $N = 5$) avente a_{ij} come centro e si contano la quantità q di NA presenti.
3. Se più della metà della sottomatrice è composta da NA, ossia se $q > N^2/2$, a_{ij}, viene impostato come NA.

Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 3.11 da cui emerge che questo secondo filtro consegue risultati simili al precedente filtro per quanto riguarda l'ABS, mentre risulta essere meno performante per quanto riguarda l'LDR, anche se modifica solo leggermente i bordi del segnale. L'applicazione del filtro è significativamente più lenta rispetto al precedente.

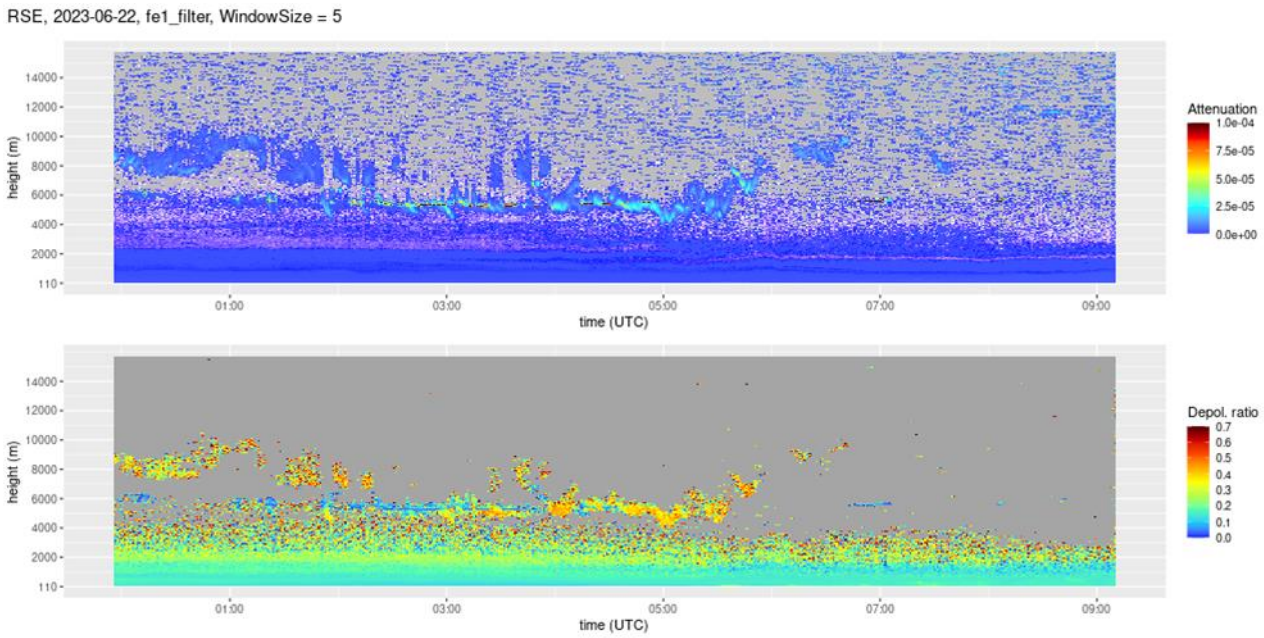


Figura 3.11 – Grafico delle misure verticali di ABS (sopra) e LDR (sotto) al variare del tempo. Le misure sono state effettuate nelle prime ore del giorno 22/06/2023. Il rumore è stato parzialmente rimosso utilizzando il metodo 2.

3.4.3 Rete AliceNET

Come è stato osservato precedentemente, le informazioni derivate dalle misure del nefoipsometro di Milano potranno essere utilizzate per dedurre informazioni sugli aerosol e sulla tipologia della copertura nuvolosa utilizzando anche altre misure, quali immagini della *skycam* e immagini del satellite MSG. La metodologia per la riduzione del rumore che verrà così implementata sarà poi estesa ad altri insiemi di dati provenienti da nefoipsometri dislocati sul territorio italiano con lo scopo di creare una statistica robusta che potrà permettere di definire le caratteristiche della nuvolosità solo a partire poi dalle informazioni satellitari. In questo modo sarà possibile estendere questo tipo di dati sull'intero territorio nazionale con una risoluzione temporale di 15' e spaziale di circa 4 km.

In Italia da diversi anni sono attivi una serie di lidar ceilometri, automatici (*automated lidar-ceilometers*, ALC), cioè strumenti che funzionano con lo stesso principio del nefoipsometro installato da RSE. L'insieme di questi strumenti è stato organizzato in una rete comune, la rete ALICEnet (*Automated Lidar-Ceilometer network* [13]) coordinata e gestita da CNR-ISAC, e a cui partecipano vari istituti di ricerca italiani e agenzie ambientali con l'obiettivo di migliorare e promuovere l'uso multidisciplinare dei dati ambientali.
Attualmente a questa rete afferiscono i dati di circa una decina di nefoipsometri e sono resi disponibili in tempo reale profili di aerosol e di nuvole. I profili ALC consentono di ottenere le seguenti informazioni:

- altezza di dispersione degli inquinanti;
- distribuzione in funzione della quota della materia particolata;
- presenza e concentrazione di pennacchi di natura sahariana, oppure dovuti ad incendi o ad emissioni vulcaniche;
- altezza delle nuvole;
- livello di nebbia.

Queste informazioni sono utili nei settori della meteorologia, della qualità dell'aria, del monitoraggio ambientale e della sicurezza dei voli, nonché per gli studi radiativi e climatici. I dati sono pubblicati su un portale (https://www.alice-net.eu/) e il *copyright* appartiene ai responsabili delle stazioni.

Proprio con il fine di poter condividere i dati di Milano con quelli misurati in differenti località italiane (Capo Granitola, Monte Cimone, Etna Nicolosi, Genova, Messina, Milano, Roma, Torino, Aosta), RSE ha in atto l'attivazione di una collaborazione non onerosa con CNR-ISAC al fine di condividere i dati misurati dal CL61, che saranno resi disponibili anche sul portale web di ALICEnet.

4 - CONCLUSIONI

Il presente rapporto descrive lo stato attuale dei sistemi di acquisizione, di validazione e interpretazione delle misure meteorologiche e d'irraggiamento nelle sue diverse componenti eseguite da RSE nella propria sede di Milano. In questa prima parte del progetto RdS 1.1, oltre a queste misure, è continuata l'attività di acquisizione, validazione e caricamento in database delle misure degli spettrofotometri (SSIM) installati a Piacenza (presso l'altra sede di RSE), Cagliari (presso i laboratori di Sardegna Ricerche) e Catania (presso l'*innovation hub* di Enel Green Power). Grazie alla metodologia adottata in questo lavoro, i dati meteorologici e d'irraggiamento sono validati in tempo reale, in modo tale da poter individuare eventuali malfunzionamenti e permettere così interventi risolutivi rapidi. Inoltre, in questa attività di ricerca l'effettuazione di misure continuative di radiazione solare (non solo nelle sue componenti globale, diretta e diffusa, ma anche nella distribuzione spettrale) permette di colmare la lacuna di questo tipo di misure nel nostro Paese e di creare delle serie sufficientemente lunghe per poterne ottenere delle analisi statistiche robuste.

Inoltre, è stata portata a termine l'operazione di installazione di un nefoipsometro Vaisala CL61 presso la sede di Milano e di acquisirne i dati in tempo reale. Con questo strumento è possibile estrarre informazioni sugli aerosol e sulla copertura nuvolosa con un'elevata risoluzione temporale. È in fase di attivazione una collaborazione con il CNR-ISAC per poter partecipare attivamente alla rete italiana ALICEnet che gestisce una decina di nefoipsometri distribuiti sul territorio nazionale: ad Aosta, Milano, Genova, Roma e Messina, solo per citare alcune postazioni di misura.

Le informazioni acquisite dal nefoipsometro di Milano permetteranno di creare, nel prosieguo di questa attività del progetto, un sistema per caratterizzare le nubi utilizzando diverse fonti, quali le immagini di una sky-cam situata in Milano e le informazioni dedotte a partire da immagini del satellite Meteosat Second Generation. La metodologia sarà poi estesa ad altre località in cui sono disponibili i dati di nefoipsometri (ALICEnet) e le informazioni satellitari. In questo modo si riuscirà a costruire una statistica sufficientemente robusta e tale da permettere di ottenere le caratteristiche della nuvolosità solo a partire dai dati satellitari, potendo così caratterizzarla su tutto il territorio nazionale. I dati relativi alla presenza di particolato atmosferico, alla sua distribuzione verticale e alla tipologia di alcuni tipi di aerosol, potranno essere messi a confronto con quelli del modello globale *Copernicus Atmosphere Monitoring Service;* questi ultimi, sono utilizzati nel sistema ARTEMIS (*Automatic Radiative TransfEr Model for Irradiance with Satellite data* [1], sviluppato nel progetto RdS 2.5) per definire la tipologia e le caratteristiche degli aerosol atmosferici. In particolare, in parametri di estinzione e l'esponente di Ångström, che caratterizzano gli aerosol, sono anche forniti dai SSIM e sono usati per costruire l'addestramento di un metodo di *machine learning* utilizzato da ARTEMIS proprio per meglio stimare gli aerosol presenti in tempo reale. Avere a disposizione le medesime informazioni ma provenienti da sorgenti molto differenti tra loro permetterà una più robusta determinazione della componente aerosolica.

Complessivamente, i risultati ottenuti in questa LA e l'utilizzo della metodologia sviluppata nel progetto 2.5 costituiscono una base necessaria alla pianificazione della ubicazione di impianti fotovoltaici con nuove tecnologie (basate su celle al Si tipo IBC e HJT, celle tandem, moduli bifacciali, sistemi ad inseguimento monoassiale, ...) e successivamente alla loro gestione e valutazione in fase di esercizio.

5 - BIBLIOGRAFIA

[1] D. Ronzio, E. Collino e G. Decimi, «Sviluppo del metodo ARTEMIS per la stima della radiazione solare spettrale sul territorio italiano a cielo sereno e aggiornamento del portale webgis SunRiSE,» RSE, Ricerca di Sistema, nr. 22014066, Milano, 2022.

[2] E. Collino, P. Marcacci e A. Toppetti, «Classificazione delle proprietà ottiche delle nubi da satellite Meteosat e completamento della stazione solare di Milano,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 12001018, Milano, 2012.

[3] G. Decimi, E. Collino, P. Marcacci e S. Sperati, «Aggiornamento del portale SunRiSE per la diffusione di previsioni di energia prodotta da FRNP,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 18007643, Milano, 2018.

[4] E. Collino, D. Ronzio, P. Marcacci e V. Rotella, «Caratterizzazione della radiazione diretta sul territorio italiano,» RSE, Ricerca di Sistema, n. 21010652, Milano, 2021.

[5] E. Collino, D. Ronzio e P. Marcacci, «Dati georeferenziati di radiazione solare, incluse distribuzioni spettrali: aggiornamenti al 2020,» RSE, Ricerca di Sistema, nr. 20010708, Milano, 2020.

[6] A. Forstinger, S. Wilbert, A. r. Jensen, B. Kraas, C. F. Peruchena, C. Gueymard, D. Ronzio, D. Yang, E. Collino, J. P. Martinez, J. a. Ruiz-Arias, N. Hanrieder, P. Blanc e Y.-M. Saint-Drenan, «Worldwide Benchmark of Modeled Solar irradiance Data,» Anne Forstinger, 2023.

[7] IEA PVPS Task 16, «Solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications,» [Online]. Available: https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications/.

[8] R. Bonanno, M. Lacavalla, S. Sperati, V. Rotella, G. Quinteri, P. Marcacci, E. Golinelli, D. Bartalesi e G. Ogliari, «Sistemi di previsione, allertamento e monitoraggio di minacce meteorologiche per la rete di trasmissione e distribuzione di energia elettrica,» RSE, Ricerca di Sistema, nr. 22014049, Milano, 2021.

[9] G. Masson, M. De l'Epine e K. Izumi, «TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS 2023,» Gaëtan Masson, IEA PVPS Task 1, 2023.

[10] M. Lefèvre, A. Oumbe, P. Blanc, B. G. Espinar, Q. B., W. Z., L., M. Schroedter-Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, A. Benedetti, J. W. Kaiser e J.-J. Morcrette, «McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions,» *Atmos. Meas. Tech.,* vol. 6, pp. 2403-2418, 2013.

[11] Vaisala, «CL61 User Guide,» Vaisala Oyj, Helsinki, 2022.

[12] Vaisala, «Applications for Vaisala Lidar Ceilometer CL61 with depolarization,» Vaisala Oyj, Helsinki, 2022.

[13] «ALICEnet: Autmated LIdar-CEilometer network,» CNR ISAC, [Online]. Available: https://www.alice-net.eu/. [Consultato il giorno 26 06 2023].

[14] N. Geuder, F. Wolfertstetterb, S. Wilbertb, D. Schülerb, R. Affoltera, B. Kraasa, E. Lüpferta e B. Espinar, «Screening and flagging of solar irradiation and ancillary meteorological data,» *Energy Procedia,* vol. 69, pp. 1989-1998, 2015.

[15] C. A. Gueymard, «Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance,» *Solar Energy,* vol. 153, pp. 755-765, 2017.

[16] Vaisala, «Vaisala Lidar Ceilometer CL61: Depolarization measurement with ceilometer.,» 2021.

[17] D. Ronzio, E. Collino e G. Decimi, «Sviluppo del metodo ARTEMIS per la stima della radiazione solare spettrale sul territorio italiano a cielo sereno e aggiornamento del portale webgis SunRiSE,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 22014066, Milano, 2022.

6 - APPENDICE: CONTROLLO DI QUALITÀ DEI DATI DI RADIAZIONE

6.1 Formulazione numerica

Per effettuare la validazione automatica delle misure di irraggiamento nelle diverse componenti, ad ogni time step sono acquisite o calcolate le seguenti quantità:

- ALT: altezza della stazione di misura rispetto al livello del mare
- SZA: angolo di zenit solare in corrispondenza della stazione di misura. È l'angolo complementare dell'altezza solare, calcolabile con precisione.
- AZI: angolo di azimut solare in corrispondenza della stazione di misura.
- ETN: irraggiamento solare extra-atmosferico normale
- ETH: irraggiamento solare extra-atmosferico rispetto ad un piano orizzontale
- GHI: irraggiamento globale solare rispetto ad un piano orizzontale
- DIF: irraggiamento diffuso solare rispetto ad un piano orizzontale
- DNI: irraggiamento diretto normale

I *test* per escludere valori non plausibili sono denominati *test* ERL e PPL, e sono riportati in Tabella 6.1:

Tabella 6.1 – Test sulle componenti per l'esclusione di valori fisicamente non possibili.

Componente	*Test ERL*	*Test PPL*
GHI	$-2 \leq GHI \leq 1.2 \cdot ETN \cdot \cos^{1.2}(SZA) + 50$	$-4 \leq GHI \leq 1.5 \cdot ETN \cdot \cos^{1.2}(SZA) + 100$
DIF	$-2 \leq DIF \leq 0.75 \cdot ETN \cdot cos^{1.2}(SZA) + 30$	$-4 \leq DIF \leq 0.95 \cdot ETN \cdot cos^{1.2}(SZA) + 50$
DNI	$-2 \leq DNI \leq 0.95 \cdot ETN \cdot cos^{0.2}(SZA) + 10$	$-4 \leq DNI \leq ETN$

Le componenti GHI, DIF e DNI sono teoricamente legate dalla seguente identità:

$$GHI_{calc} = DIF + DNI * \cos(SZA) \quad 6.1$$

Poiché ci si aspetta un buon accordo tra GHI misurata e GHI_{calc} dalle altre componenti, possono essere considerate accettabili solo le misure che soddisfano i criteri riportati in Tabella 6.2, con soglie diversificate in funzione dell'angolo di zenith solare. Le soglie dipendono dall'altezza solare in quanto i sensori mostrano un livello di accuratezza inferiore per basse altezze solari.
Si deve osservare che questi test non sono applicati per intensità dell'irraggiamento globale inferiore ai 50 W/m².

Tabella 6.2 – Test BSRN di coerenza delle componenti.

Condizione	*Dominio*	*flag*
$\left\lvert \frac{\mathrm{GHI}}{\mathrm{DNI} \cdot \cos(\mathrm{SZA}) + \mathrm{DIF}} - 1 \right\rvert \leq 0.08$	$(\mathrm{SZA} \leq 75° \text{ e } \mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2})$	*3lowSZA*
$\left\lvert \frac{\mathrm{GHI}}{\mathrm{DNI} \cdot \cos(\mathrm{SZA}) + \mathrm{DIF}} - 1 \right\rvert \leq 0.15$	$(\mathrm{SZA} > 75° \text{ e } \mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2})$	*3highSZA*

Si sono poi ideati dei *test* relativi al rapporto tra i dati misurati e i corrispondenti valori di radiazione alla sommità dell'atmosfera terrestre, indicati come K-*tests*. Per l'effettuazione dei *test* è necessario calcolare i seguenti parametri:

$$K_n = DNI/ETN \quad 6.2$$

$$K = DIF/GHI \quad 6.3$$

$$K_t = GHI/(ETN * \cos(SZA)) = GHI/ETH \quad 6.4$$

I *test* sono riportati nella Tabella 6.3. Le soglie sono state scelte sulla base di precedenti studi [14] [15]. Sono considerati attendibili i dati che rispettano le condizioni riportate in Tabella 6.3, ciascuna riferita ad uno specifico dominio di applicazione.

Tabella 6.3 – K-Tests.

Condizione	Dominio	flag
$K_n < K_t$	$(\mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{K_n} > 0\ \text{ e }\ \mathrm{K_t} > 0)$	*KnKt*
$K_n < (1100 + 0.03 * ALT)/ETN)$	$(\mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{K_n} > 0)$	*Kn*
$K_t < 1.35$	$(\mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{K_t} > 0)$	*Kt*
$K < 1.05$	$(\mathrm{SZA} < 75°\ \text{ e }\ \mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{K} > 0)$	*KlowSZA*
$K < 1.1$	$(\mathrm{SZA} \geq 75°\ \text{ e }\ \mathrm{GHI} > 50\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{K} > 0)$	*KhighSZA*
$K < 0.96$	$(\mathrm{K_t} > 0.6\ \text{ e }\ \mathrm{GHI} > 150\,\mathrm{W/m^2}\ \text{ e }\ \mathrm{SZA} < 85°\ \text{ e }\ \mathrm{K} > 0\,)$	*KKt*

Per quanto concerne invece l'individuazione di possibili problemi di puntamento, è stato deciso di effettuare un controllo tra i valori misurati di GHI e di DNI e i corrispondenti valori teorici in assenza di copertura nuvolosa. Questi ultimi dati possono essere o i valori importati da SODA (§2.2.2), oppure i termini di riferimento possono essere calcolati a partire dalla componente extra-atmosferica ETH mediante le seguenti relazioni:

$$GHI_{clear} = 0.8 * ETH \tag{6.5}$$

$$DIF_{clear} = 0.65 * GHI_{clear} \tag{6.6}$$

$$DNI_{clear} = \frac{GHI_{clear} - DIF_{clear}}{\cos(SZA)} \tag{6.7}$$

I disallineamenti del *tracker* e la conseguente invalidazione dei dati, si identificano quando si verificano le condizioni riportate in Tabella 6.4., dove la prima condizione sulla GHI serve ad individuare le condizioni di cielo sereno, mentre la condizione sulla DNI identifica i dati anomali di DNI.

Tabella 6.4 – *Tracker off*–Tests.

Condizione	Dominio	Flag
$\frac{GHI_{clear}-GHI}{GHI_{clear}+GHI} < 0.2 \quad e \quad \frac{DNI_{clear}-DNI}{DNI_{clear}+DNI} > 0.95$	$\mathrm{SZA} < 85°$	*Tracker*

I record sono invalidati nel momento in cui uno dei precedenti *test* non viene superato, solo però nel suo dominio di applicabilità.
Nella tabella Dat_SolMet_*yyyy* sono memorizzati, in corrispondenza di ogni record di misure, le seguenti *flags*:

1. kc, kt: *clearness index* (calcolato con i dati SODA);
2. *KnKt, Kn, Kt, KlowSZA, KhighSZA, KKt*, derivanti dai K-*test*;
3. *3lowSZA*, *3highSZA*, derivanti dai *test* BSRN;
4. *ERLGHI, ERLDIF, ERLDNI, PPLGHI, PPLDIF, PPLDNI*, derivanti dai *test* PPL e ERL;
5. *Manual*: eventuali segnalazioni dovute a attività di manutenzione.
6. *Tracker*: dall'omonimo test;

I *flag* possono assumere i valori 1 (test fallito) o 0 (test superato). In caso di non applicabilità viene assegnato il valore −9, mentre viene assegnato il valore −99 nel caso in cui vi sia un dato mancante. Al fine di avere un unico valore che riassume sinteticamente i differenti valori dei *flag*, viene costruito un numero binario associando ad ogni *flag* (ordinati come indicato sopra da punto 2 a punto 6) il valore 1 se il corrispondente valore è dato mandante (−99) o test non superato (1), altrimenti associando al flag il valore 0 (valori rielaborati). Convertendo poi da binario a decimale, viene memorizzato nella variabile *flag_sol* il valore risultante. Una procedura analoga viene effettuata anche per caratterizzare i dati meteorologici ed il corrispondente valore decimale è memorizzato come *flag_met*. In Tabella 6.5 sono riportati, a titolo di esempio, i valori delle 16 flag indicate precedentemente per due istanti diversi del giorno 23/06/2023 (prime due righe della tabella). La terza e la quarta riga riportano i valori rielaborati, in cui sono presenti solo i valori 0 o 1. Così si ha il valore binario 0 per il primo record e 1100100101 per il secondo. La conversione decimale è ottenuta applicando i pesi (potenze di 2 dal bit meno significativo, a destra, a quello più significativo, a sinistra). alla stringa binaria. In basso a destra sono riportate le conversioni decimali del numero binario.

Tabella 6.5 – Esempio di calcolo del *flag_sol* per due *record* (#1 e #2), relativi alle misure del 2023-06-23 12:00:00 e del 2023-06-23 13:30:08 rispettivamente).

	KnKt	*Kn*	*Kt*	*KlowSZA*	*highSZA*	*KKt*	*3lowSZA*	*3highSZA*	*ERLGHI*	*ERLDIF*	*ERLDNI*	*PPLGHI*	*PPLDIF*	*PPLDNI*	*Manual*	*Tracker*	*flag_sol*
#1	0	0	0	0	-9	0	0	-9	0	0	0	0	0	0	0	0	
#2	-9	-9	0	-9	-9	-9	-99	-99	0	0	1	0	0	1	0	-99	
#1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
#2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	
pesi	*32768*	*16384*	*8192*	*4096*	*2048*	*1024*	*512*	*256*	*128*	*64*	*32*	*16*	*8*	*4*	*2*	*1*	
#1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
#2	0	0	0	0	0	0	512	256	0	0	32	0	0	4	0	1	**805**

6.2 Grafici riepilogativi di validazione degli irraggiamenti solari

Grafici riepilogativi ottenuti durante la fase di validazione dei dati d'irraggiamento (*broadband*) delle componenti radiative misurate a Milano nel periodo giugno 2021÷giugno 2023. I grafici si riferiscono ai dati non validati.

Tabella 6.6 – Significato dei vari grafici presenti nelle composizioni di Figura 2.3÷Figura 2.5 e Figura 6.1÷Figura 6.3.

<table>
<tr><td rowspan="2">DNI_{meas}-DNI_{calc}</td><td colspan="2">Evoluzione temporale della GHI</td></tr>
<tr><td colspan="2">Evoluzione temporale della DNI</td></tr>
<tr><td rowspan="2">GHI_{meas}/GHI_{calc}</td><td colspan="2">Evoluzione temporale del clearness index</td></tr>
<tr><td>GH_{calc} vs. GHI_{meas}</td><td>K vs. K_t</td><td>Massimo valore della GHI in funzione di zenit e azimut</td></tr>
<tr><td>GHI_{am}/GHI_{pm} vs. azimut</td><td>K_n vs. K_t</td><td>Massimo valore della DNI in funzione di zenit e azimut</td></tr>
</table>

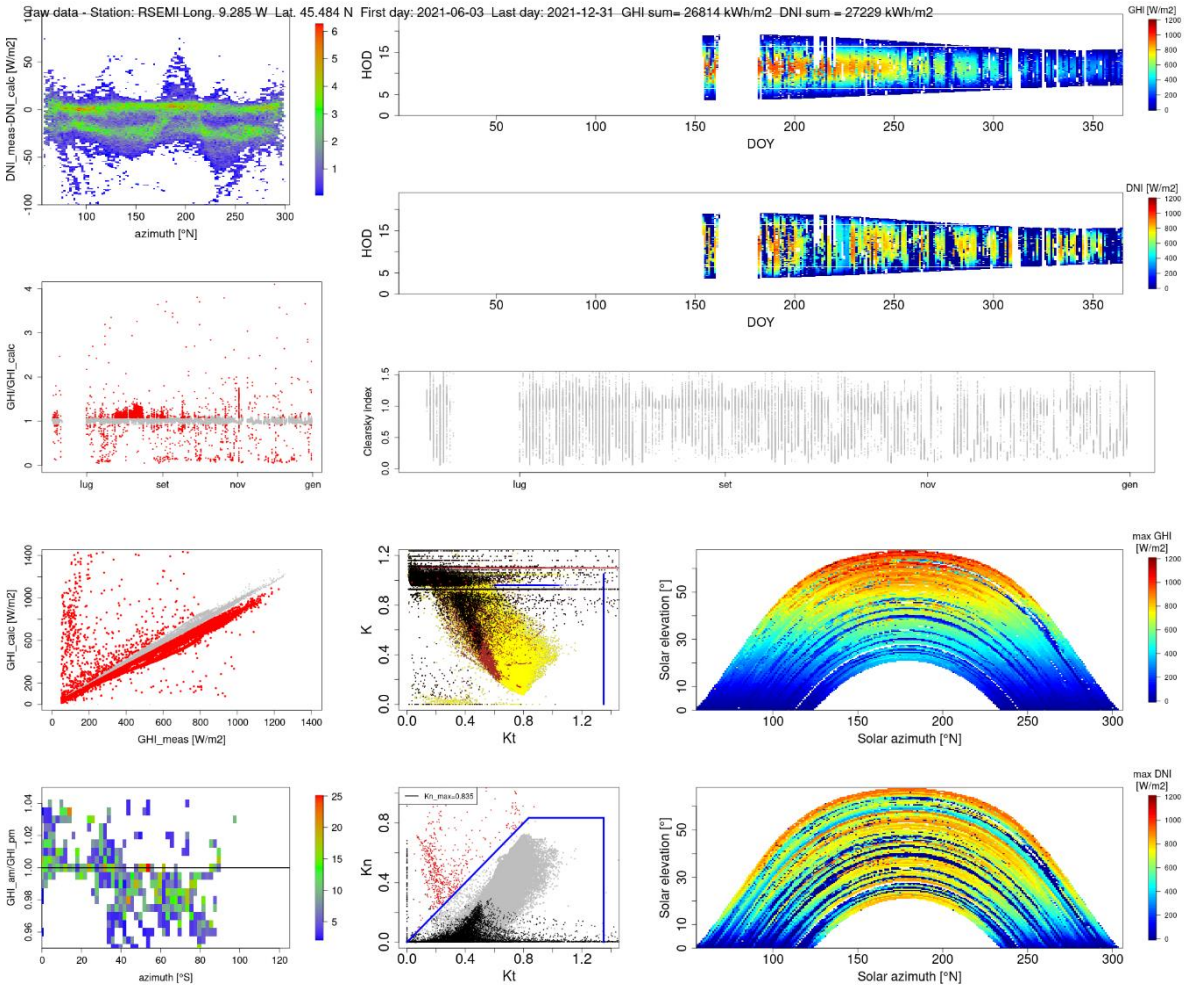


Figura 6.1 – Grafici riepilogativi dei dati grezzi a 2", ricampionati a 10" per esigenze grafiche, relativi al secondo semestre del 2021.

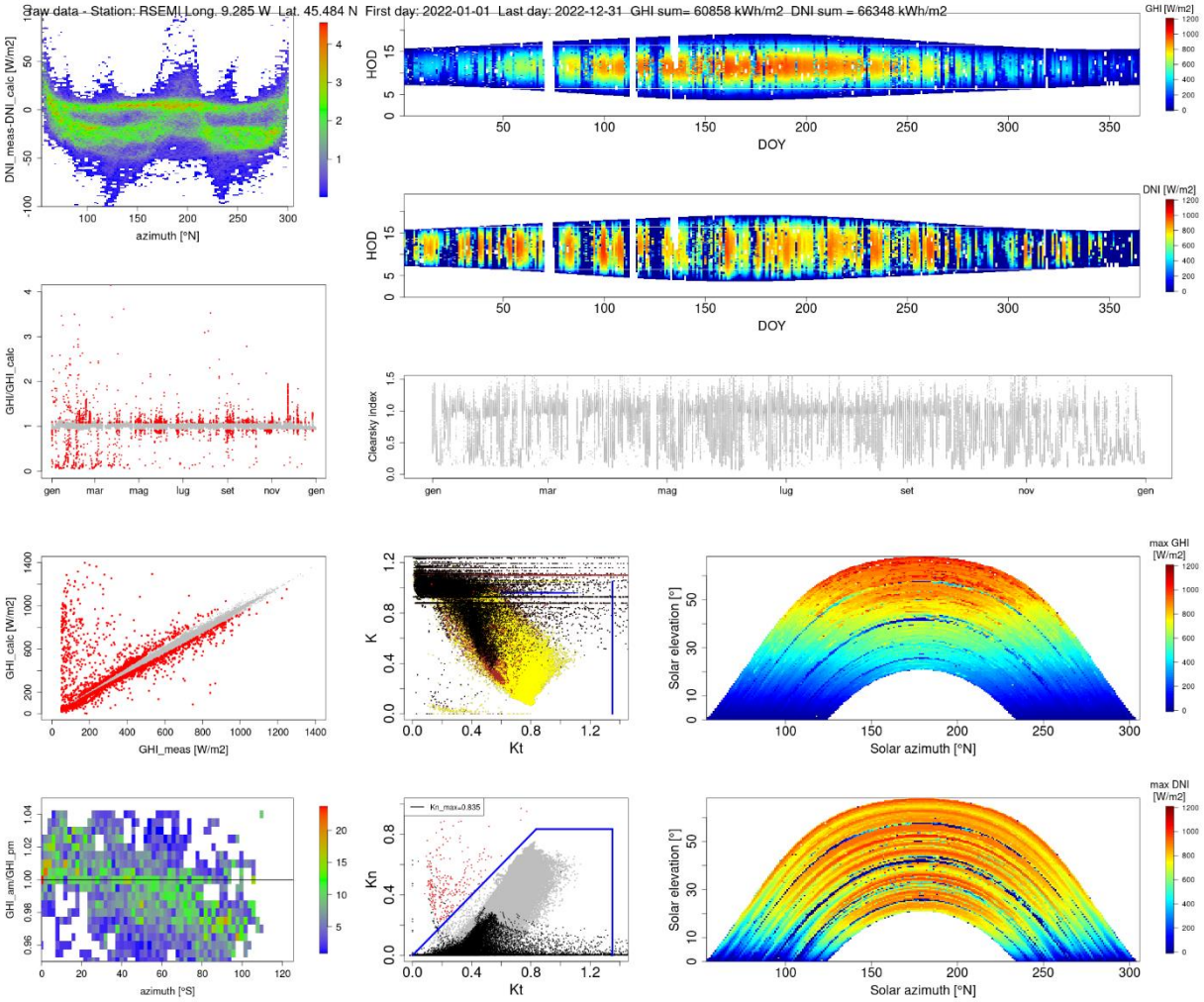


Figura 6.2 – Grafici riepilogativi dei dati grezzi a 2", ricampionati a 10", relativi al 2022.

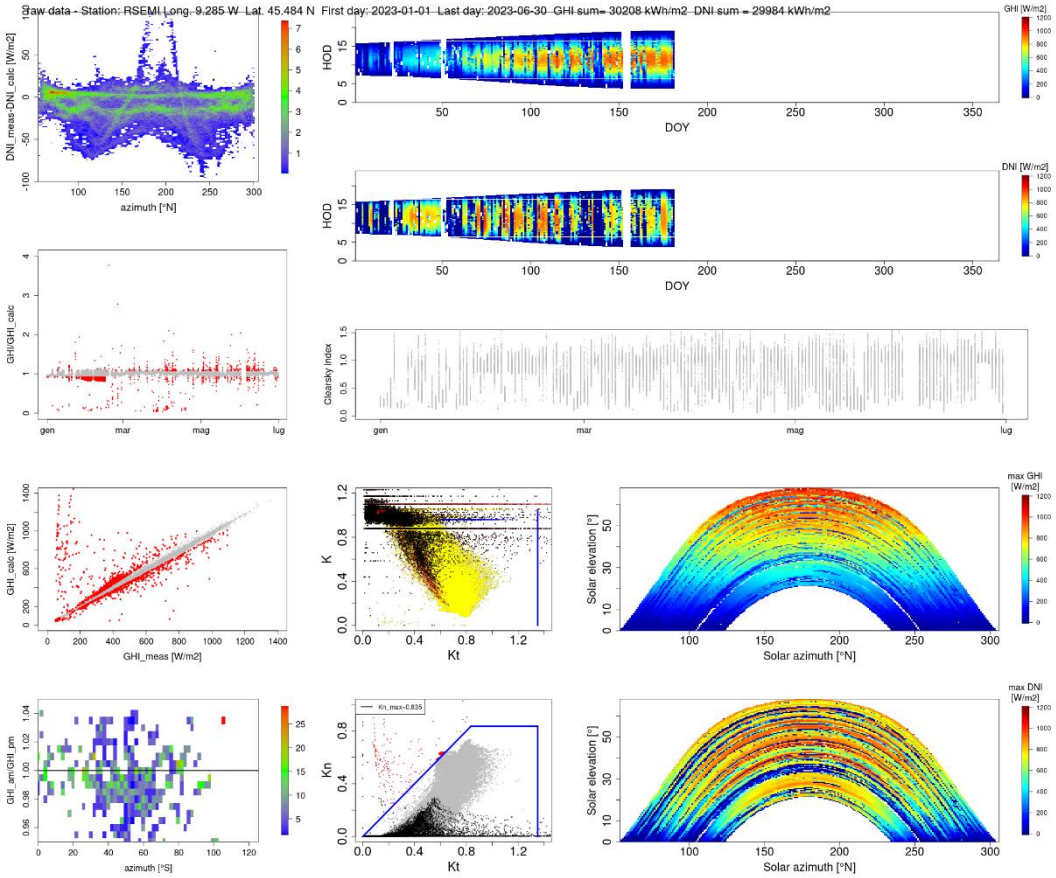


Figura 6.3 – Grafici riepilogativi dei dati grezzi a 2" relativi al primo semestre del 2023.

7 - ACRONIMI

Acronimo	Descrizione
ABS	*Attenuated BackScatter*
ALC	*Automated Lidar Ceilometer*
ALICEnet	*Automated Lidar- Ceilometer network*
CAMS	*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*
CLM	Gruppo di Clima e Meteorologia di RSE
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CNR – ISAC	*Consiglio Nazionale delle Ricerche – Institute of Atmospheric Sciences and Climate*
CPV	*Concentrated PhotoVoltaic (Fotovoltaico a concentrazione)*
CT	*Cloud Type*
DHCP	*Dynamic Host Configuration Protocol*
DHI	*Direct Horizontal Irradiance*
DIF	*Diffuse Horizontal Irradiance*
DNI	*Direct Normal Irradiance*
DOY	*Day of Year*
FTP	*File Transfer Protocol*
FV	*Fotovoltaico*
GHI	*Global Horizontal Irradiance*
GHI_{sec}	*Global Horizontal Irradiance secondario*
GTI	*Global Tilted Irradiance*
HJT	*Hetero Junction – Tecnologia di cella fotovoltaica*
HOD	*Hour of day*
IEA	*International Energy Agency*
IBC	*Interdigitated Back Contact – Tecnologia di cella fotovoltaica*
LA	*Linea di attività*
LDR	*Linear Depolarization Ratio*
MSG	*Meteosat Second Generation*
NetCDF	*Network Common Data Form*
PVPS	*Photovoltaic Power Systems Programme*
RdS	Ricerca di Sistema
RSE	Ricerca Sistema Energetico
SDNI	*Spectral DNI*

SFE	Dipartimento Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche di RSE
SM	*Sunshine meter: misuratore della lunghezza di ore di cielo sereno*
SSIM	*Solar Spectral Irradiance Meter*
SZA	*Solar Zenith Angle*
VIS	*Visibilimetro*
WRF	*Weather Research and Forecasting*