



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di un modello nazionale di
efficacia luminosa mediante la misura dei
valori di illuminamento naturale e di
radiazione solare in tre località italiane

F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro, P. Signoretti

DEFINIZIONE DI UN MODELLO NAZIONALE DI EFFICACIA LUMINOSA MEDIANTE LA MISURA DEI VALORI DI ILLUMINAMENTO NATURALE E DI RADIAZIONE SOLARE IN TRE LOCALITÀ ITALIANE

F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro, P. Signoretti (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Edifici a energia quasi zero (nZEB), Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici

Obiettivo: Acquisizione e monitoraggio congiunto di dati d'illuminamento e di radiazione solare in tre località italiane per la definizione di un modello nazionale di efficienza luminosa

Responsabile del Progetto: Luciano Terrinoni

Responsabile scientifico: Francesco Spinelli

Si ringraziano l'Ing. Riccardo Paolini (Politecnico di Milano) e il Dott. Alcide Giorgio Di Sarra (ENEA) per la preziosa collaborazione prestata all'installazione e successiva gestione delle centraline di (rispettivamente) Milano e Lampedusa per la misurazione dell'illuminamento.

Indice

SOMMARIO / ABSTRACT	4
1 INTRODUZIONE	5
2 MONITORAGGI DI ILLUMINAMENTO ORIZZONTALE ESTERNO IN SITI ITALIANI	7
3 CENSIMENTO DEI DATI DISPONIBILI	9
4 VERIFICHE E CONFRONTI	13
5 NUOVO MODELLO PER L'EFFICACIA LUMINOSA	20
5.1 CORREZIONE DEI PARAMETRI EMPIRICI DELL'EFFICACIA LUMINOSA DIFFUSA	20
5.2 NUOVA FORMULAZIONE PER L'EFFICACIA LUMINOSA GLOBALE	22
6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	25
APPENDICE 1 — MASSA D'ARIA OTTICA RELATIVA	29
APPENDICE 2 — PARAMETRI O INDICI STATISTICI	30
APPENDICE 3 — SULLE GHI MISURATE E/O STIMATE	34
SIGLE, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA	37
BIBLIOGRAFIA / REFERENCES	40

Sommario / Abstract

Il fabbisogno finale di energia per l'illuminazione artificiale degli ambienti di edifici rappresenta una percentuale significativa degli usi elettrici e globali negli edifici, specialmente per quelli del settore non residenziale.

La norma EN 15193:2007 “*Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting*” introduce procedure di calcolo e misura per edifici non residenziali. Alcuni studi condotti negli anni precedenti hanno evidenziato i limiti di entrambi i metodi di calcolo, semplificato e dettagliato, implementati nella norma, soprattutto per quanto riguarda l'assenza dei dati climatici riguardanti la potenzialità e la disponibilità di luce naturale nelle località in cui si trova l'edificio da valutare.

ENEA propone un metodo di calcolo alternativo, ancora in fase di sviluppo, che utilizza l'illuminamento diffuso esterno sul piano orizzontale quale parametro climatico per stimare la disponibilità di luce diurna negli edifici e, conseguentemente, determinare i fabbisogni finali di energia elettrica per l'illuminazione artificiale.

Il presente rapporto presenta l'avanzamento di un progetto avente come obiettivo la realizzazione di mappe georeferenziate dei valori d'illuminamento, in maniera del tutto analoga a quanto già disponibile per la radiazione solare. I Dataset d'illuminamento naturale (AMTIN) orizzontale globale e diffuso per tre località (Milano, Roma, Palermo), ottenuti a partire dai dati di radiazione solare elaborati da ENEA durante la precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, sono confrontati con dati misurati a terra nelle medesime località nel periodo novembre 2015 ÷ agosto 2016. L'analisi intende verificare l'affidabilità degli anni tipo precedentemente costruiti ovvero la necessità di introdurre opportune correzioni nei modelli di efficacia luminosa adottati per lo sviluppo dei data set di illuminamento esterno. I dati d'illuminamento globale e diffuso saranno in seguito elaborati in modo da ottenere curve di disponibilità di luce naturale, da utilizzare per la stima del contributo dell'illuminazione naturale e calcolare i requisiti energetici per l'illuminazione artificiale negli edifici.

Abstract

Energy requirement for lighting represent a relevant share of the electricity and total energy uses in buildings, especially in the non residential sector.

The standard EN 15193:2007 “ Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting” defines operational and asset methods to be applied in not residential buildings. Several studies carried out during the past years stressed the limits of the simplified and comprehensive calculation methods implemented in the standard, in particular for assessing the energy uses without taking into account the climatic data of the locality the building is located in.

An alternative method, proposed by ENEA and still under development, makes use the external horizontal diffuse illuminance as climatic parameter to estimate the daylight availability in buildings and, as a consequence, to derive the electricity uses for artificial lighting.

This report presents the first result of a project aimed at developing illuminance maps, as done for solar radiation. Test Reference Years (TRYs) for the horizontal global and diffuse illuminance for three Italian localities (Milan, Rome, Palermo) are built using solar radiation data, elaborated by ENEA, to calculate the illuminance data, applying the most relevant models available in literature. Used models allow to calculate the illuminance values starting from irradiation data and other parameters, depending on the specific model. Global and diffuse illuminance data are then used to build global and diffuse daylight availability curves, necessary to estimate daylighting and the energy requirements for artificial lighting in buildings.

“ There is a crack in everything. That's how the light gets in”

L. COHEN, ANTHEM, 1992

1 Introduzione

L'efficienza energetica negli edifici pubblici, e nel settore edilizio più in generale, è uno degli strumenti principali per il conseguimento degli obiettivi ambientali nazionali ed europei, come definiti nei principali documenti di indirizzo [1,2,3].

La direttiva europea dedicata all'efficienza e alle prestazioni energetiche degli edifici [4] evidenzia la necessità di intervenire su tutti i servizi energetici del manufatto edilizio e non solo sul servizio di climatizzazione invernale, come avvenuto nei decenni precedenti.

In questo contesto, assume rilevanza l'uso di energia elettrica dedicato al servizio d'illuminazione artificiale, soprattutto nel settore non residenziale. Diversi studi evidenziano l'impatto dell'illuminazione artificiale sul totale degli usi finali di energia nel settore terziario: 14% in EU, 26% negli USA [5,6]. Analisi costi-benefici dimostrano, inoltre, che il servizio è tra quelli con maggiori potenzialità, con riguardo all'efficienza, per applicazioni in nuovi edifici o nel caso di riqualificazioni energetiche [7].

È interessante notare che il tema del risparmio energetico conseguibile attraverso misure e interventi sul sistema d'illuminazione artificiale, pur ritenuto rilevante, è ancora ancorato alla riduzione della potenza elettrica installata, piuttosto che a un processo di prestazione energetica complessivo che coinvolga tutto il sistema edificio-impianto in termini d'illuminazione naturale e artificiale [8].

Ad oggi un approccio del secondo tipo può essere seguito attraverso l'applicazione della norma tecnica europea EN 15193:2007 “*Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting*” [9], recepita come norma tecnica nazionale (UNI) l'anno successivo e, attualmente, in fase di sostanziale revisione. La norma definisce le procedure per determinare la prestazione energetica del servizio d'illuminazione artificiale per misura o per calcolo, introducendo nel secondo caso un metodo semplificato e uno dettagliato.

La revisione della sopra citata norma si è resa necessaria per superare i limiti intrinseci al metodo di calcolo proposto, dimostrati anche da ENEA in studi svolti negli anni passati [10].

Appare evidente che le potenzialità di risparmio energetico possano essere efficacemente conseguite solo in presenza di strumenti in grado di prevedere con sufficiente accuratezza le prestazioni del sistema edificio-impianto, soprattutto nella declinazione *nZEB* dei requisiti energetici degli edifici (edifici a consumo energetico quasi nullo) adottata in Europa e nei singoli Stati Membri.

Per rispondere a questa esigenza è stata inserita, nell'Area “*Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici*” della Ricerca di Sistema Elettrico 2015-2017, la Linea “*Metodi per la verifica delle disponibilità di luce naturale e per la stima dei requisiti energetici per illuminazione naturale in edifici nZEB*” e, all'interno di tale linea, l'**Obiettivo** perseguito in questo lavoro: “*Acquisizione e monitoraggio congiunto di dati di illuminamento e di radiazione solare in tre località italiane per la definizione di un modello nazionale di efficienza luminosa.*”

Lo scopo finale dell'attività è l'elaborazione di una proposta di revisione della norma EN 15193:2007 con l'introduzione di un metodo di calcolo del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale alternativo più accurato, utilizzabile dal Ministero dello Sviluppo Economico per individuare limiti e requisiti per il servizio energetico in questione.

Uno dei limiti più evidenti della norma EN 15193:2007 riguarda, infatti, la valutazione della disponibilità di luce naturale per una data località utilizzando la latitudine quale *unico* parametro caratteristico delle condizioni geografiche e climatiche.

ENEA intende sviluppare un metodo alternativo (una preliminare versione del metodo può essere consultata in [10,11]), basato su una più accurata caratterizzazione climatica del sito, utilizzando quale parametro di riferimento l'illuminamento diffuso esterno sul piano orizzontale. Il metodo alternativo è ancora in fase di sviluppo e prevede la conoscenza dei dati d'illuminamento (globale e/o diffuso) per valutare se e quando la luce naturale è sufficiente a garantire il compito visivo assegnato in un ambiente in funzione delle caratteristiche dello stesso o, in caso contrario, è necessario attivare l'impianto d'illuminazione artificiale con un conseguente fabbisogno di energia elettrica.

A differenza di quanto succede per i dati di radiazione solare, non esistono database significativi di illuminamento misurati a terra, mentre un solo database con dati rilevati da osservazioni satellitari è ad oggi disponibile [12]. Il database in questione è stato sviluppato nell'ambito di un progetto internazionale ed è basato su un periodo temporale di osservazione limitato.

Nella precedente annualità della *Ricerca di Sistema Elettrico (RdSE)* sono stati sviluppati, in fase ovviamente provvisoria, database illuminotecnici, grazie a modelli di *efficacia luminosa* che prevedono la conversione dei dati d'irradiazione solare in dati d'illuminamento [13]. I modelli utilizzati sono stati reperiti in letteratura, scegliendoli fra i più autorevoli. Applicando tali modelli ai dati estratti dalle mappe georeferenziate d'irradiazione solare, derivate da fonte satellitare, è stato possibile costruire database d'illuminamento per tre città di riferimento. Ulteriori analisi hanno poi consentito di determinare l'impatto che i singoli modelli di efficacia luminosa, generando database illuminotecnici differenti, hanno sulle prestazioni energetiche di edifici per uffici relativamente al servizio di illuminazione, per tre località di riferimento [14].

Ad oggi tutti i modelli di efficacia luminosa disponibili in letteratura sono stati messi a punto da autori stranieri che hanno utilizzato dati di misura raccolti presso località non italiane. Obiettivo principale dell'attività programmata nella corrente annualità è quello di verificare l'accuratezza e l'attendibilità dei modelli di efficacia luminosa — e di conseguenza dei database di illuminamento sviluppati — attraverso il confronto con dati di illuminamento orizzontale globale e diffuso **misurati a terra presso siti nazionali**. La verifica positiva del confronto consentirebbe di sviluppare l'atlante italiano applicando uno dei modelli investigati, il viceversa richiederebbe la correzione di uno dei modelli o, caso estremo, lo sviluppo di un modello ex-novo.

2 Monitoraggi di illuminamento orizzontale esterno in siti italiani

Come già accennato nell'introduzione, si vuole individuare un modello di efficacia luminosa, fra quelli esistenti o messo a punto ex-novo con dati di illuminamento orizzontale globale e diffuso misurati a terra presso siti nazionali. Per conseguire tale obiettivo sono state selezionate tre località del territorio Italiano dove installare la strumentazione necessaria per la misurazione dei dati climatici rilevanti: Lampedusa, Roma e Milano. Le specifiche relative ai siti di installazione sono riportate in tabella 1. I monitoraggi, *tuttora in corso*, sono condotti con modalità e strumentazioni descritte nelle sezioni successive. Le analisi di confronto sono state condotte utilizzando dati di illuminamento misurato e calcolato (con modello) su base oraria.

Tabella 1. Luogo di installazione della strumentazione di misura.

Località	Luogo di installazione	Coordinate geografiche
Lampedusa	ENEA Stazione di Osservazioni Climatiche "R. Sarao"	35° 30.0' N 12° 36.5' E
Roma	ENEA Centro Ricerca Casaccia	42° 02.5' N 12° 18.4' E
Milano	Politecnico di Milano	45° 27.9' N 9° 11.3' E

Le misure di illuminamento orizzontale globale (E_{gh}) e diffuso (E_{dh}) sono eseguite utilizzando sensori di illuminamento collegati a data-logger già esistenti sul luogo di misura ed atti al monitoraggio di altre grandezze climatiche. Unica eccezione riguarda la stazione del Politecnico di Milano, espressamente installata per la campagna in esame. La tabella 2 presenta le grandezze misurate e le caratteristiche temporali di acquisizione delle grandezze in esame. Si noti che per la stazione di Lampedusa è possibile il monitoraggio del solo illuminamento globale.

Tabella 2. Grandezze monitorate.

Località	E_{gh} (lux)	E_{dh} (lux)	Tempo di campionamento (s)	Tempo di registrazione misura (s)
Lampedusa	SI	NO	10	30
Roma	SI	SI	10	60
Milano	SI	SI	10	300

Per il monitoraggio sono utilizzati dei sensori preamplificati a canale singolo prodotti da Skye Instruments Limited. Secondo quanto specificato nella scheda tecnica di prodotto, si tratta di fotodiodi di elevata qualità con filtri spettrali, ciascuno fornito di Certificato di Calibrazione National Standard. I sensori utilizzati hanno l'elemento sensibile con correzione del coseno e filtro spettrale per misure d'illuminamento. In figura 1 si riporta l'andamento spettrale del filtro (curva rossa) e la curva di visibilità di riferimento CIE. Il sensore ha

una linearità inferiore a 0.2% e un errore assoluto di calibrazione inferiore a 5% (tipicamente 3.5%); inoltre possiede un errore di azimuth inferiore a 1% e un errore di coseno del 3%. Il prodotto ha un campo di funzionamento compreso tra -20 e 70°C per la temperatura e tra 0 e 100% per l'umidità relativa.

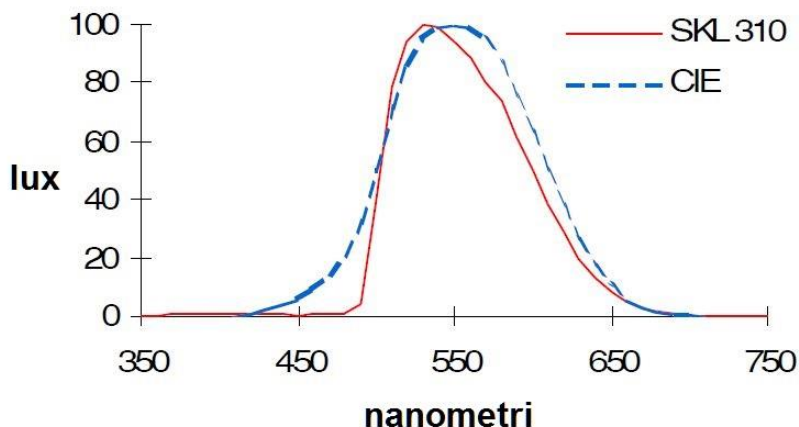


Figura 1. Filtro spettrale dei luximetri utilizzati per i monitoraggi.

I sensori di illuminamento sono montati in posizione orizzontale a campo aperto, in modo da minimizzare effetti di mascheramento della radiazione diretta e diffusa da parte di ostruzioni fisse o mobili. I sensori per la misura d'illuminamento diffuso sono equipaggiati con banda o anello schermante, avente la funzione di proteggere il sensore dalla componente diretta della radiazione solare. L'elemento schermante è mobile ed è azionato manualmente ad intervalli stabiliti, in modo da garantire la presenza in ombra della testa del sensore. In funzione delle caratteristiche geometriche del sistema sensore-schermo, è possibile calcolare l'effettivo illuminamento diffuso a partire dal dato misurato e di un coefficiente correttivo che tiene conto della porzione di volta celeste oscurata dalla banda per intercettare la radiazione solare diretta. Immagini dei sensori installati a Roma e Milano sono riportati in figura 2.

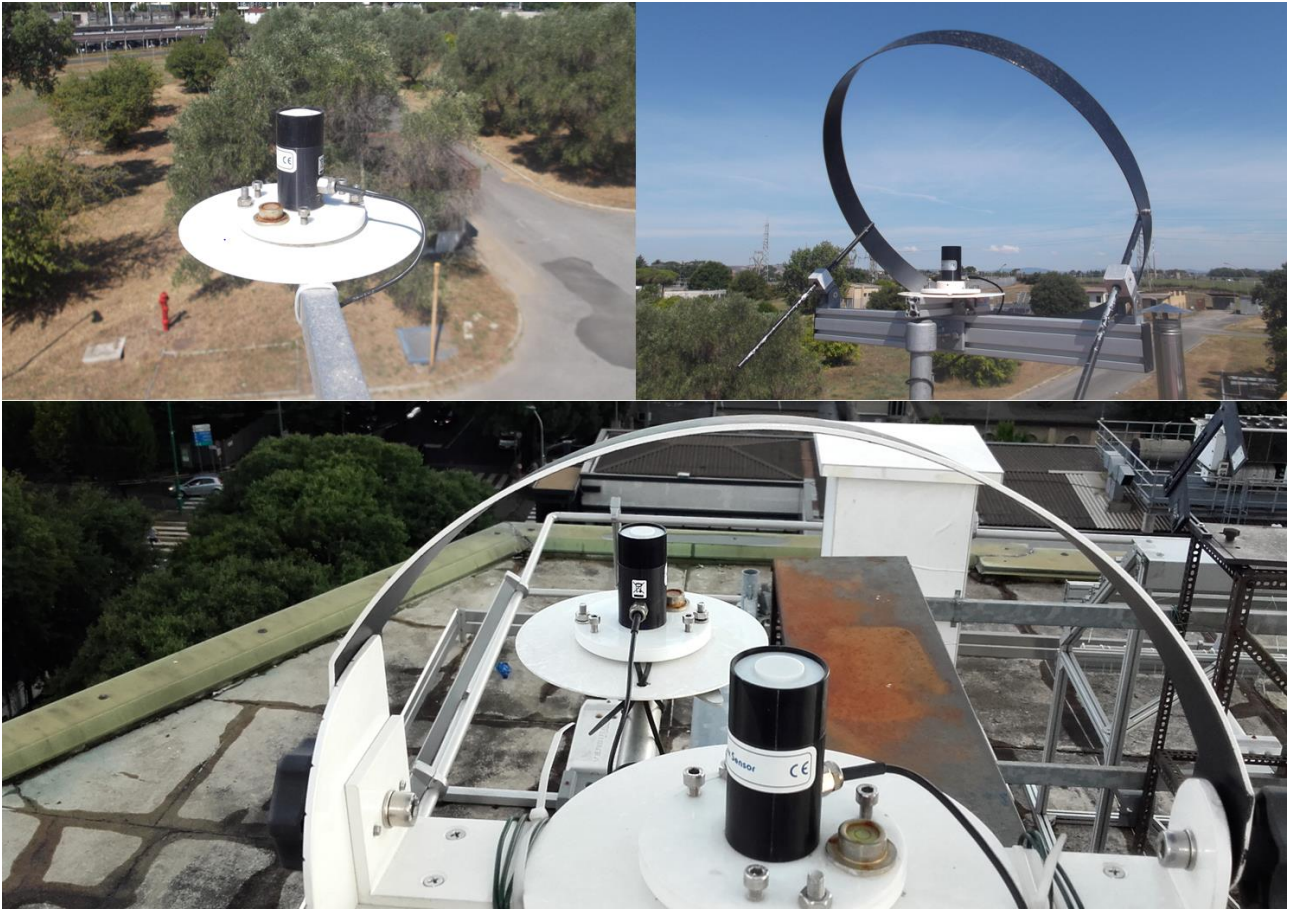


Figura 2. Luxmetri installati a Roma (in alto) e Milano.

3 Censimento dei dati disponibili

Lo studio qui effettuato prevede la disponibilità dei seguenti data-base di dati climatici:

1. misure dell'illuminamento (naturale) orizzontale, globale e diffuso;
2. misure dell'irradianza solare¹ orizzontale, sia globale² che diffusa³;
3. stime da fonte satellitare dell'irradianza solare, globale e diffusa.

Lo scopo, come si è detto, è validare e/o mettere a punto i *modelli di illuminamento vs irradianza*, con riferimento alla situazione meteo-climatica del territorio italiano. Per quanto riguarda l'*illuminamento*, la

¹ Il termine *irradianza solare* fa riferimento alla potenza (istantanea) trasportata dai raggi solari e incidente sull'unità di area; si esprime in $W m^{-2}$. Invece l'*irradiazione solare* è un'energia per unità di area e si associa a un intervallo di tempo: orario, giornaliero, mensile, annuo; si misura ovviamente in $J m^{-2}$ o altra unità dimensionalmente uguale ($MJ m^{-2}$, $kWh m^{-2}$). Infine, *radiazione solare* è locuzione generica usata per indicare indifferentemente l'una o l'altra quantità.

² *Global Horizontal Irradiance* (GHI).

³ *Diffuse Horizontal Irradiance* (Diff.HI).

realizzazione e la messa in opera della strumentazione di misura sono state descritte in precedenza. La campagna di misurazione è stata preparata a ottobre 2015 e i primi dati validi, per la centralina di Milano, sono disponibili a partire dal 1° novembre 2015. Per confrontare i dati provenienti dalle diverse fonti e riferirli agli stessi intervalli temporali, è stato necessario uniformarne la frequenza. Qui è stata stabilita la frequenza *oraria*, che è la più utilizzata in letteratura quando si vogliono cogliere gli aspetti della variabilità *imprevedibile* e *irregolare* del tempo meteorologico. Così, per quanto riguarda Milano, ogni dato orario è ottenuto come media delle 12 registrazioni effettuate nell'ora corrispondente, essendo la frequenza di registrazione di una ogni cinque minuti (vedi tabella 2); mentre per Casaccia le registrazioni utilizzate per comporre il dato orario sono 60 (qui la frequenza è pari a una registrazione al minuto) e per Lampedusa 120 (frequenza di registrazione pari a una ogni trenta secondi).

In questo studio sono utilizzati i dati orari acquisiti fino al 31 agosto 2016. Ciò vale per le stazioni di Milano e Lampedusa, mentre per Casaccia la serie dei dati presi in considerazione si ferma al 30 giugno. Il motivo di questa differenza dipende dal fatto che a partire dal 1° luglio è stato modificato l'apparato di misurazione dell'illuminamento *diffuso* (solo) in Casaccia, modifica che ha riguardato essenzialmente la forma e il funzionamento della banda oscura che scherma l'illuminamento *diretto*, il quale non va computato nella componente diffusa. Ovviamente, il funzionamento delle centraline sarà protratto nel tempo e le analisi sui dati che verranno ulteriormente acquisiti⁴, unitamente a quelli già acquisiti ma non utilizzati subito in questo studio, contribuiranno a estendere la base statistica delle conclusioni sin qui stabilite.

Va osservato che i dati di misura dell'illuminamento diffuso non possono essere usati *sic et simpliciter*. Per definizione, l'illuminamento diffuso è quello proveniente dall'intera (emi)sfera celeste eccetto lo stretto angolo solido entro cui la corona solare è vista da terra (angolo solido che, tra l'altro, cambia direzione nel corso della giornata, dovendo "inseguire" la posizione dell'astro). Pertanto, per schermare i raggi luminosi provenienti *direttamente* dal Sole, il sensore di misura viene opportunamente schermato da una banda (anello) mobile la cui foggia dipende dalle modalità costruttive adottate per ancorarla alla struttura fissa. Come conseguenza, inevitabilmente, la porzione di cielo oscurata dalla banda sarà maggiore dello stretto angolo solido corrispondente alla vista del Sole, e il valore d'illuminamento diffuso misurato dal sensore sarà inferiore a quello effettivo. Il fattore di correzione, maggiore di uno, dipende dalle dimensioni della banda (spessore e raggio di curvatura) e dagli angoli solari del momento (zenit e azimut). In formula:

$$E_{dh,eff} = \frac{1}{1-X} E_{dh,mis} \quad (1)$$

dove:

$E_{dh,mis}$ è l'illuminamento orizzontale diffuso, misurato dal sensore (in lx);

$E_{dh,eff}$ è l'illuminamento orizzontale diffuso, quello effettivo dell'intera (emi)sfera celeste, escluso l'angolo solido del disco solare (in lx);

X fattore corrispondente alla frazione diffusa bloccata dalla banda (adimensionale). Per condizioni di cielo isotropo, Drummond [15] ha ricavato l'espressione qui utilizzata:

⁴ È previsto che la campagna di misurazione possa proseguire almeno per la durata del PAR 2015/2017.

$$X = \frac{2b}{\pi r} \cos^3 \delta (\psi_{sr} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \psi_{sr}) \quad (2)$$

dove

b è la larghezza della banda (nei nostri dispositivi, 5 cm);

r è il raggio di curvatura della banda, se il suo centro coincide con la posizione del sensore, altrimenti è uguale alla distanza variabile sensore-banda, nella direzione del Sole al momento. Nel nostro caso, tale valore varia fra 13.5 cm , nei due momenti dell'alba e del tramonto, e 6 cm , a mezzogiorno solare;

ψ_{sr} è l'angolo azimutale solare al momento dell'alba ($sr = sunrise$). Nella formula va messo il suo valore numerico espresso in radianti;

ϕ è la latitudine della località; infine

δ è la declinazione solare.

Prima di essere utilizzati per il confronto, i dataset sono stati adeguatamente depurati da dati inconsistenti. Inoltre, non sono conteggiati i dati notturni e mancano pure i dati relativi ai periodi (brevi e poco numerosi) in cui l'acquisizione è stata interrotta per manutenzione o sostituzione di componenti. La tabella 3 riporta per ciascuna stazione i periodi utili e la numerosità dei dati.

Tabella 3. Misure d'illuminamento naturale. Periodo di acquisizione e numerosità dei dati.

		Casaccia	Milano	Lampedusa
Periodo		10 dic 2015 / 30 giu 2016	1 nov 2015 / 31 ago 2016	2 dic 2015 / 31 ago 2016
Dati orari disponibili	per l'illuminamento globale	3051	3321	3032
	per l'illuminamento diffuso	1877	2312	

Dalla tabella si nota che per una stessa località il numero dei dati per il 'globale' è maggiore rispetto al 'diffuso'. Ecco la spiegazione. Poiché l'altezza giornaliera massima del Sole varia nel corso dell'anno⁵, è necessario che la posizione della banda oscurante sia modificata da un giorno all'altro e la frequenza con cui la posizione dev'essere corretta è stabilita in modo da garantire la schermatura del sensore in tutto il periodo di acquisizione. D'altra parte, la banda è mantenuta sempre fissa durante un singolo giorno, con il risultato che nelle ore periferiche dell'arco diurno, ossia a ridosso dell'alba e del tramonto, il Sole è troppo

⁵ A mezzogiorno solare e alle nostre latitudini, il Sole arriva ad alzarsi d'estate fin oltre 70° al di sopra dell'orizzonte; a dicembre, al contrario, non supera i 30° di elevazione.

basso e i raggi potrebbero non essere intercettati dalla banda stessa. Per questo motivo, nell'elaborazione dei dati, vanno esclusi i valori delle ore vicine ai crepuscoli, ovvero quelli corrispondenti ad angoli azimutali inferiori a -75° o superiori $+75^\circ$ (vedi nota⁶).

Sin qui è detto per le misure di illuminamento. In merito invece alla radiazione solare, va ricordato che l'ENEA ha realizzato nel corso degli anni, per finalità legate alle proprie attività nel campo dell'energia solare, consistenti archivi di dati di radiazione solare. Per quanto riguarda le **misure di radiazione solare**, l'ENEA ha installato una rete di centraline di acquisizione dati situate presso propri centri di ricerca o località individuate di volta in volta per l'insediamento di impianti di ricerca. Fra le sedi d'installazione è compreso il centro della Casaccia – una delle tre località oggetto del presente studio – dove opera una centralina a partire da novembre 2001 ed è tutt'ora in funzione. Ogni centralina misura sia l'irradianza globale orizzontale (GHI), sia le sue componenti diffusa (Diff.HI) e diretta normale (DNI), mentre la frequenza temporale è di una registrazione ogni cinque minuti e, per Casaccia, a partire da gennaio 2015, anche una registrazione al minuto. Come già visto per gli illuminamenti, anche le misure delle irradianze GHI, Diff.HI e DNI sono state uniformate alla frequenza oraria per permettere l'effettuazione dei confronti.

Come terza fonte di dati, in questo studio sono state utilizzate le **stime della radiazione solare** derivate da immagini satellitari. Di solito si tratta di immagini della superficie terrestre registrate dai satelliti meteorologici; lo strato informativo delle immagini può essere uno dei parametri atmosferici (copertura nuvolosa, contenuto di vapore acqueo, ecc.) oppure una grandezza calcolata a partire da questi (irradianza solare nei diversi intervalli dello spettro elettromagnetico ecc.). Trasformate le immagini in modo da produrre lo strato informativo che interessa, ad esempio la GHI, si procede all'estrazione dei dati per singole località geografiche: infatti, essendo le immagini georeferenziate, dalla conoscenza delle coordinate geografiche si risale alle posizioni (*pixel*) delle località all'interno dell'immagine. Le serie storiche delle immagini si differenziano: **a)** per la porzione di superficie terrestre rappresentata, che dipende dalla posizione e dal movimento del satellite (satelliti geostazionari, polari ecc.); **b)** dalla frequenza delle acquisizioni (ogni quarto d'ora, orarie, giornaliere ecc.); infine **c)** dalla risoluzione spaziale, ovvero dall'area del terreno di cui ogni pixel è rappresentativo. In ENEA l'attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione solare dedotti da fonte satellitare è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso e prosegue tuttora: fonte, metodi, modelli e dati sono stati descritti in [16,17,18] e riassunti brevemente nel rapporto RdSE [13] già richiamato. In merito alla fonte originaria, si tratta delle immagini del satellite METEOSAT acquisite dall'*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) [19], nell'intervallo $500 \div 900$ nm dello spettro elettromagnetico, intervallo che cade quasi per intero nella banda *visibile*. Dal 2006 le immagini sono ottenute con frequenza pari a una ogni 15 minuti e presentano un dettaglio spaziale che alle nostre latitudini è pari a circa 1×1.5 km² per pixel (HRV, *High Resolution Visible*) [20]. Per i propri scopi l'ENEA utilizza un ritaglio che copre la sola regione italiana; il dato di copertura nuvolosa è espresso in una scala numerica che si estende sull'intervallo $0 \div 255$. E' intuibile il vantaggio della disponibilità di mappe rispetto alle misurazioni a terra: per motivi pratici queste ultime possono effettuarsi in un numero necessariamente limitato di stazioni mentre le prime – se correttamente georeferenziate – permettono di

⁶ Per definizione, l'*azimut solare* è l'angolo che la proiezione del raggio solare sul piano orizzontale, forma con la direzione nord-sud. Si computa a partire da sud (azimut = 0°) e preso positivo verso est (però alcuni autori usano una convenzione differente). Nel corso della giornata, il Sole si trova lontano dalla direzione sud (azimut grandi in valore assoluto) nelle ore vicine all'alba e al tramonto, quando è anche basso sull'orizzonte, mentre attraverserà il meridiano sud (azimut nullo) a mezzogiorno solare, nel momento di massima elevazione.

estranne i dati virtualmente per qualunque località della superficie terrestre rappresentata. La disponibilità combinata delle mappe di radiazione solare e dei modelli per l'efficacia luminosa estende immediatamente l'enorme disponibilità dei dati anche per gli illuminamenti naturali. Per permettere l'effettuazione delle analisi previste per questo lavoro, sono stati estratti dalle mappe digitali già pronte i valori delle irradianze solari globale, diffusa e diretta in corrispondenza delle tre località di Milano, Casaccia e Lampedusa, le cui coordinate sono state mostrate in tabella 1. Con la stessa tecnica già adoperata per le misure illuminamento e per quelle d'irradianza, si è provveduto a uniformare alla frequenza oraria anche le stime d'irradianza estratte dalle mappe.

4 Verifiche e confronti

Nel lavoro dello scorso anno [13] (di cui questo è il seguito), la correlazione fra illuminamento naturale e irradianza solare messa a punto da Robledo e Soler nel 2001, sulla base di misure effettuate presso un sito spagnolo, fu individuata, fra le numerose attestate in letteratura, come la più promettente per applicarsi alla situazione italiana. Lo scopo del presente lavoro è dunque consistito nel controllare se questa "intuizione" fosse confermata utilizzando misure ricavate presso siti italiani, ovvero Casaccia, Milano e Lampedusa, prescelti in base alla loro rappresentatività della situazione geografica della penisola alle differenti latitudini. Giova qui richiamare schematicamente la formulazione dei due Autori:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{gh} = \eta_{gh} I_{gh} \quad E_{dh} = \eta_{dh} I_{dh} \quad E_{bn} = \eta_{bn} I_{bn} \\ \eta_{dh} = \alpha \Delta^{-\beta} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\ \eta_{bn} = \gamma \cos^{\delta} \vartheta_z e^{-\varepsilon(90^{\circ} - \vartheta_z)} (\mu - \rho \Delta) \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\ \eta_{gh} = \eta_{bn} (1 - k) + \eta_{dh} k \\ k = I_{dh} / I_{gh} \\ \Delta = m I_{dh} / I_{0n} \end{array} \right. \quad (3)$$

in cui:

I_{gh} I_{dh} I_{bn} sono rispettivamente le irradianze (solari) globale orizzontale, diffusa orizzontale e diretta normale (*Direct Normal Irradiance*, DNI). Sono i dati di input al modello; non sono tutte indipendenti in quanto sussiste la relazione:

$$I_{gh} = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_{dh} \quad (4)$$

I_{0n} è l'irradianza extraatmosferica normale (ENI);

E_{gh} E_{dh} E_{bn} sono rispettivamente gli illuminamenti (naturali) globale orizzontale, diffuso orizzontale e diretto normale, da calcolarsi grazie al modello stesso;

- η_{gh} η_{dh} η_{bn} sono rispettivamente le efficacie luminose globale, diffusa e diretta;
- k è la frazione della radiazione diffusa (sul piano orizzontale);
- ϑ_z è l'angolo zenitale, ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale. Nel termine esponenziale della formula per η_{bn} di (3), il valore numerico da riportare è quello espresso in gradi sessagesimali;
- Δ è l'indice di brillantezza di Perez (*sky's brightness index*). Tale indice è una misura del grado di nuvolosità;
- m è la massa d'aria ottica relativa (*Relative optical air mass*) ed è una misura relativa del percorso dei raggi in atmosfera (vedi l'appendice 1); vale $m = 1$ per quello più corto, ossia quando il Sole è a perpendicolo (in realtà, impossibile alle nostre latitudini), e tende a valori molto grandi quando il Sole è invece basso sull'orizzonte.
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \mu, \rho$ sono parametri numerici (adimensionali) determinati per regressione statistica sui dati. Robledo e Soler hanno trovato con i loro dati di Madrid:

$$\begin{cases} \alpha = 91.07 & \beta = 0.254 \\ \gamma = 134.27 & \delta = 0.269 & \varepsilon = 0.0045 \\ \mu = 1.045 & \rho = 0.427 \end{cases} \quad (5)$$

Il primo test sull'adattabilità del modello di Robledo & Soler alla realtà italiana, è stato effettuato confrontando:

- le **misure** orarie diurne dell'illuminamento globale effettuate in Casaccia; con
- le corrispondenti **stime** dell'illuminamento globale ricavate grazie al modello, con i parametri (5), a partire dalle **misure** GHI orarie, effettuate agli stessi istanti, sempre in Casaccia.

La figura 3 mostra gli andamenti per cinque giorni consecutivi, a partire dal 19 maggio 2016. In ascissa sono omessi gli intervalli orari notturni fra un giorno e l'altro. I due andamenti sono accettabilmente sovrapposti, benché nei giorni nuvolosi (valori più bassi, andamenti irregolari) le stime del modello "inseguano" le misure con (leggera) minore accuratezza.

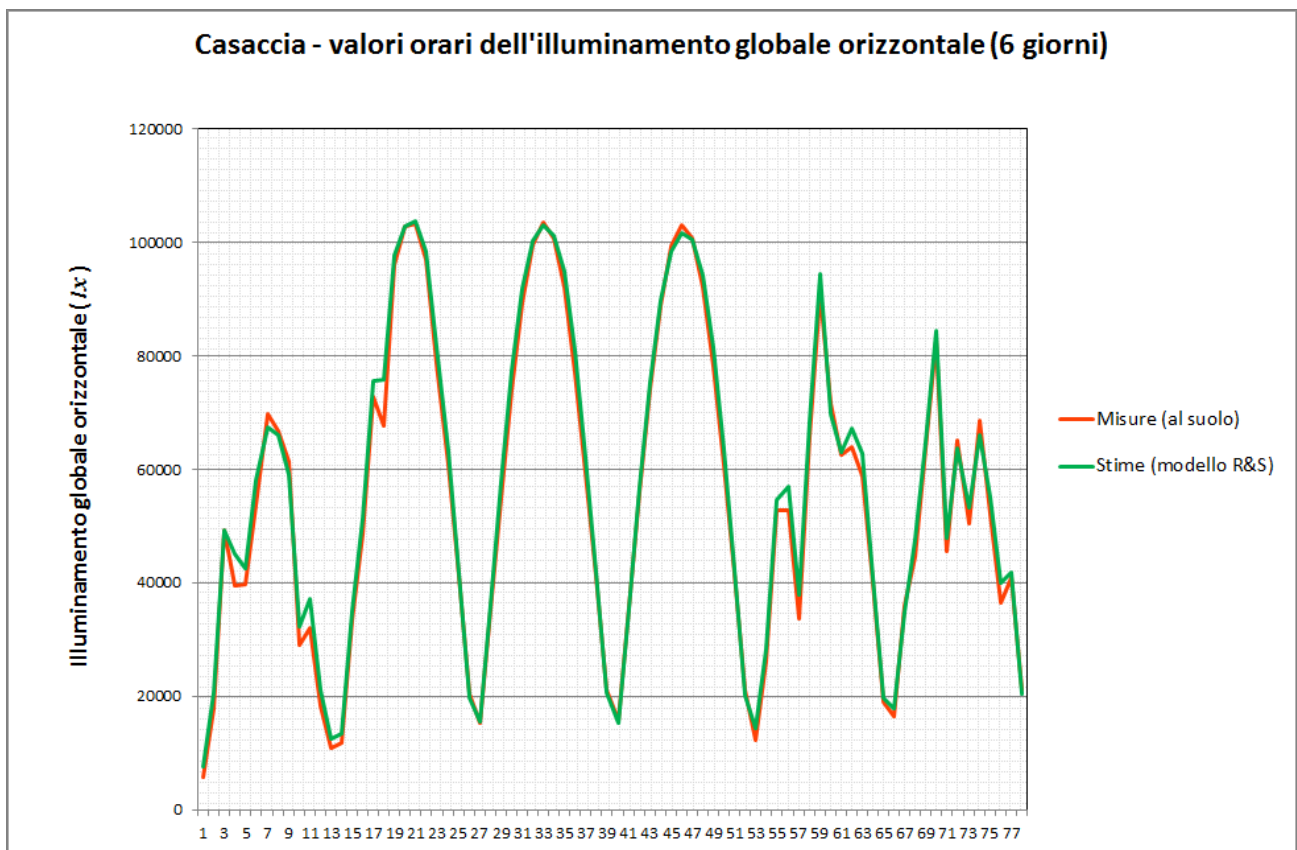


Figura 3. Casaccia — Andamento dell'illuminamento globale orizzontale per sei giorni consecutivi. Stime degli illuminamenti ottenuti con il modello R&S a partire da [misure GHI](#).

Ad ogni buon conto, la bontà della modellizzazione è confermata anche dal diagramma di dispersione mostrato in figura 4 e dal calcolo dei corrispondenti indici statistici di scostamento. Per interpretare i diagrammi a dispersione presentati in questo lavoro e gli *indici di accostamento* utilizzati, va notato che punti situati sulla bisettrice del diagramma cartesiano (in rosso nelle figure) corrispondono a coppie di valori (*misura, stima*) uguali, mentre punti distanti corrispondono a valori differenti. La statistica definisce moltissimi parametri e indici di accostamento che forniscono una valutazione quantitativa delle differenze fra due serie di valori corrispondenti, e nella presentazione dei dati si ricorre normalmente a più di uno giacché nessun parametro o indice, singolarmente, coglie in toto tutti gli aspetti delle differenze stesse⁷. In questo contesto si forniranno per ogni confronto i valori di tre indici, ossia: l'*errore medio* (o meglio: la *media delle differenze*; in inglese: *mean bias error*, MBE), l'*errore medio percentuale* (in inglese: *mean bias error percent*, MBE%) e la radice della media dei quadrati degli errori, espressa in percento rispetto al valor medio (in inglese: *Root Mean Squared Error Percent*, RMSE%).

⁷ In appendice 2 è un elenco ragionato dei diversi indici di accostamento, con definizioni e descrizione della loro adeguatezza nel cogliere i due diversi aspetti delle differenze fra serie di dati corrispondenti, ossia la *precisione* e l'*esattezza* (o *accuratezza*).

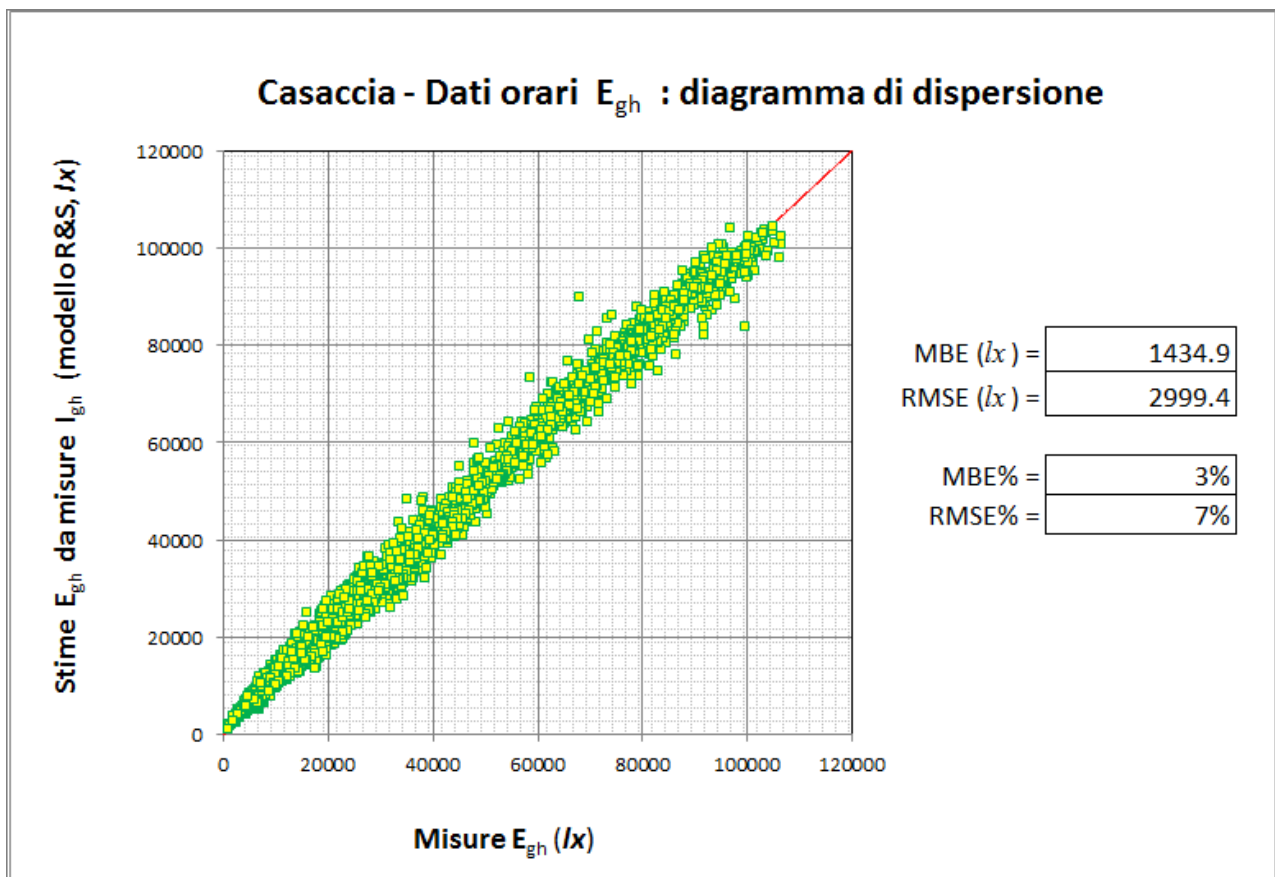


Figura 4. Casaccia – diagramma di dispersione fra misure e stime degli illuminamenti globali orizzontali, con i relativi indici di accostamento. Stime degli illuminamenti ottenuti con il modello R&S a partire da misure GHI.

Gli indici mostrano che le stime risultino in media più grandi delle corrispondenti misure, ma l'entità dello scarto è piccolo, compatibile con le incertezze insite nelle misure e nelle approssimazioni del modello di calcolo. Infatti la media delle differenze *stima-misura* è positiva, ammontando a poco più di 1400 lx , che corrisponde a un errore del 3% circa se comparato con la media delle misure, quest'ultima pari a 43785 lx (considerando i soli valori orari diurni, dall'alba al tramonto, da dicembre 2015 a giugno 2016). Anche la dispersione espressa dal RMSE è contenuta (circa il 7%, ossia 2999.4 lx rispetto alla media delle misure, che è sempre 43785 lx).

La situazione appena descritta è quella ottima, però va ricordato che lo scopo finale dello studio mira a controllare se nel calcolo degli illuminamenti sia lecito utilizzare come dato di partenza non l'irradianza **misurata** (in singoli siti: tre nel presente caso) ma l'irradianza **stimata** a partire dalle immagini satellitari di copertura nuvolosa, secondo il metodo messo a punto dall'ENEA. Con lo strumento ENEA, l'irradianza può essere estratta dalle mappe in corrispondenza di qualunque località italiana, una volta note le coordinate geografiche; e di conseguenza, disponendo già (l'ENEA) dell'atlante italiano della radiazione solare, a partire da questo sarà agevole allestire anche l'atlante degli illuminamenti naturali globale e diffuso. Il grande vantaggio conseguito grazie al ricorso alle stime satellitari è però controbilanciato dalla introduzione, nel calcolo finale, di una nuova fonte di incertezza, legata ora agli scostamenti fra stime e misure della

stessa irradianza, le prime di fonte satellitare, le seconde misurate con strumentazione al suolo⁸. Non sempre più fonti di incertezza peggiorino la precisione dei risultati, ma l'entità di quest'ultima va sempre controllata. In quest'ottica il confronto fra gli illuminamenti è stato ripetuto fra:

- le **misure** orarie diurne dell'illuminamento globale effettuate in Casaccia (ossia le stesse del primo confronto); con
- le corrispondenti **stime** dell'illuminamento globale ricavate grazie al modello di Robledo e Soler, con i parametri (5), a partire dalle **stime** GHI orarie, ricavate per gli stessi istanti, con il modello della radiazione solare messo a punto dall'ENEA⁹, estraendole dalle mappe in corrispondenza delle coordinate geografiche di Casaccia.

Nelle figure 5 e 6 sono mostrati gli esiti del nuovo confronto. Si può constatare che entrambi gli indici relativi MBE% e RMSE% si sono ampliati pur restando entro valori accettabili; il primo in maniera davvero contenuta: 4% invece di 3%. Le stime sono in media più grandi delle rispettive misure – il MBE% è positivo – e ciò è dovuto sostanzialmente al contributo dei valori intermedi di illuminamento. Per i valori estremi, oltre 100 *klux*, al contrario, il diagramma a dispersione mostra che le stime sono di poco inferiori alle corrispondenti misure.

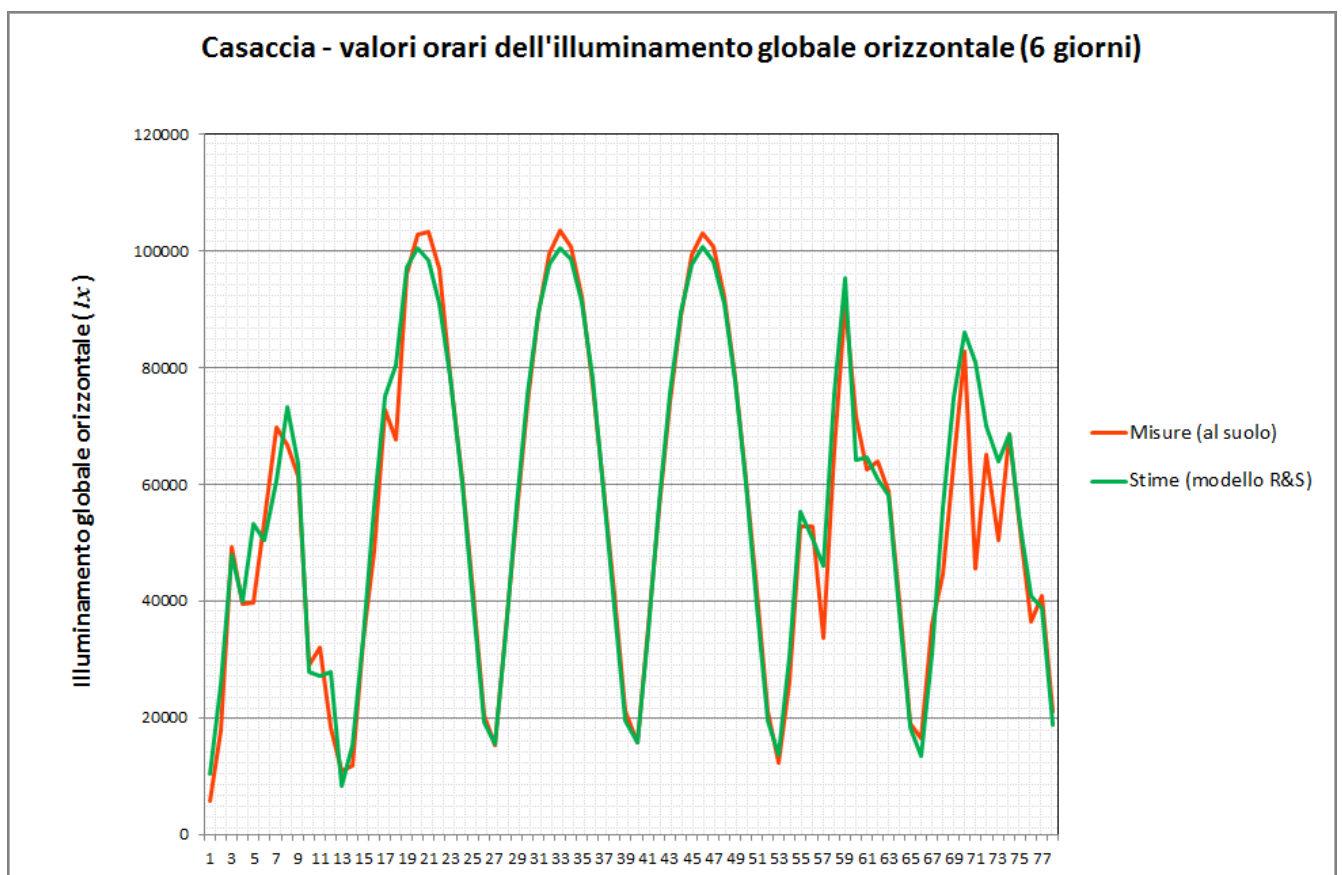


Figura 5. Casaccia — Andamento dell'illuminamento globale orizzontale per sei giorni consecutivi. Stime degli illuminamenti ottenuti con il modello R&S a partire da stime GHI (fonte satellitare).

⁸ Per quanto riguarda il problema della intercambiabilità dell'uso delle GHI misurate o stimate, si veda l'appendice 3.

⁹ Il quale, ripetiamo, permette di stimare l'irradianza solare (globale, diffusa e diretta) a partire dal dato di copertura nuvolosa memorizzato pixel per pixel nelle immagini satellitari METEOSAT.

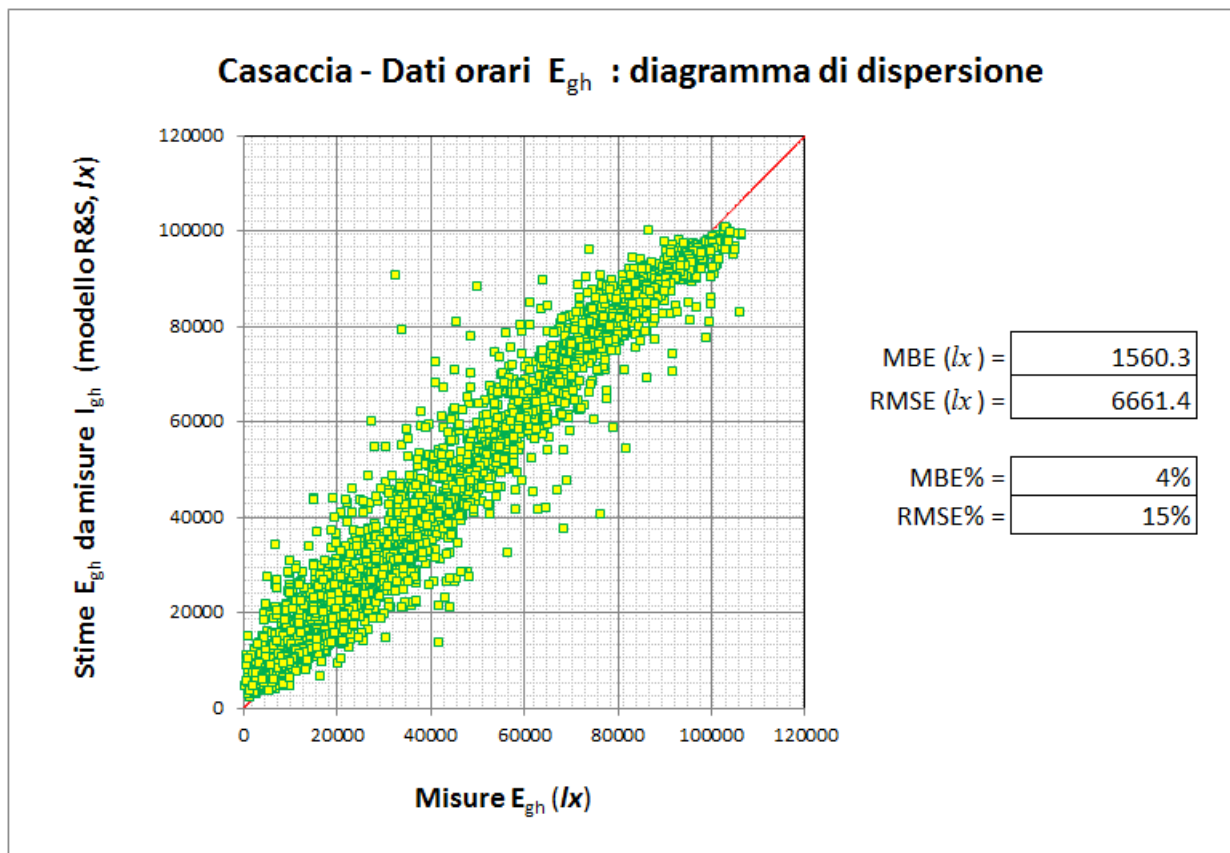


Figura 6. Casaccia – diagramma di dispersione fra misure e stime degli illuminamenti globali orizzontali, con i relativi indici di accostamento. Stime degli illuminamenti ottenuti con il modello R&S a partire da stime GHI (fonte satellitare).

Per quanto riguarda il confronto per l’illuminamento diffuso, la situazione è più complessa, in quanto ai valori di misura occorre apportare due correzioni, già richiamate sopra. In primo luogo, bisogna tener conto della presenza della banda oscurante che viene interposta per arrestare l’arrivo dei raggi solari “diretti” e che inevitabilmente sottrae al sensore una frazione di radiazione diffusa, la quale dipende dalla forma e posizione della banda stessa (equazioni (1) e (2)). A tutto ciò si aggiunge la circostanza che il Sole si sposta nel corso della giornata e l’anello non riesce a schermarlo a tutte le ore: se dunque viene posizionato per essere efficace nelle ore centrali della giornata — quando i valori d’illuminamento sono più significativi ai fini del calcolo — può accadere invece che nelle ore vicine al crepuscolo (alba e tramonto) possano non essere schermati e dunque falsare la misura stessa. Per quest’ultimo motivo, le misure “periferiche” del giorno vanno escluse. Con queste accortezze, i risultati dei confronti hanno forma e valori mostrati nella figura 7.

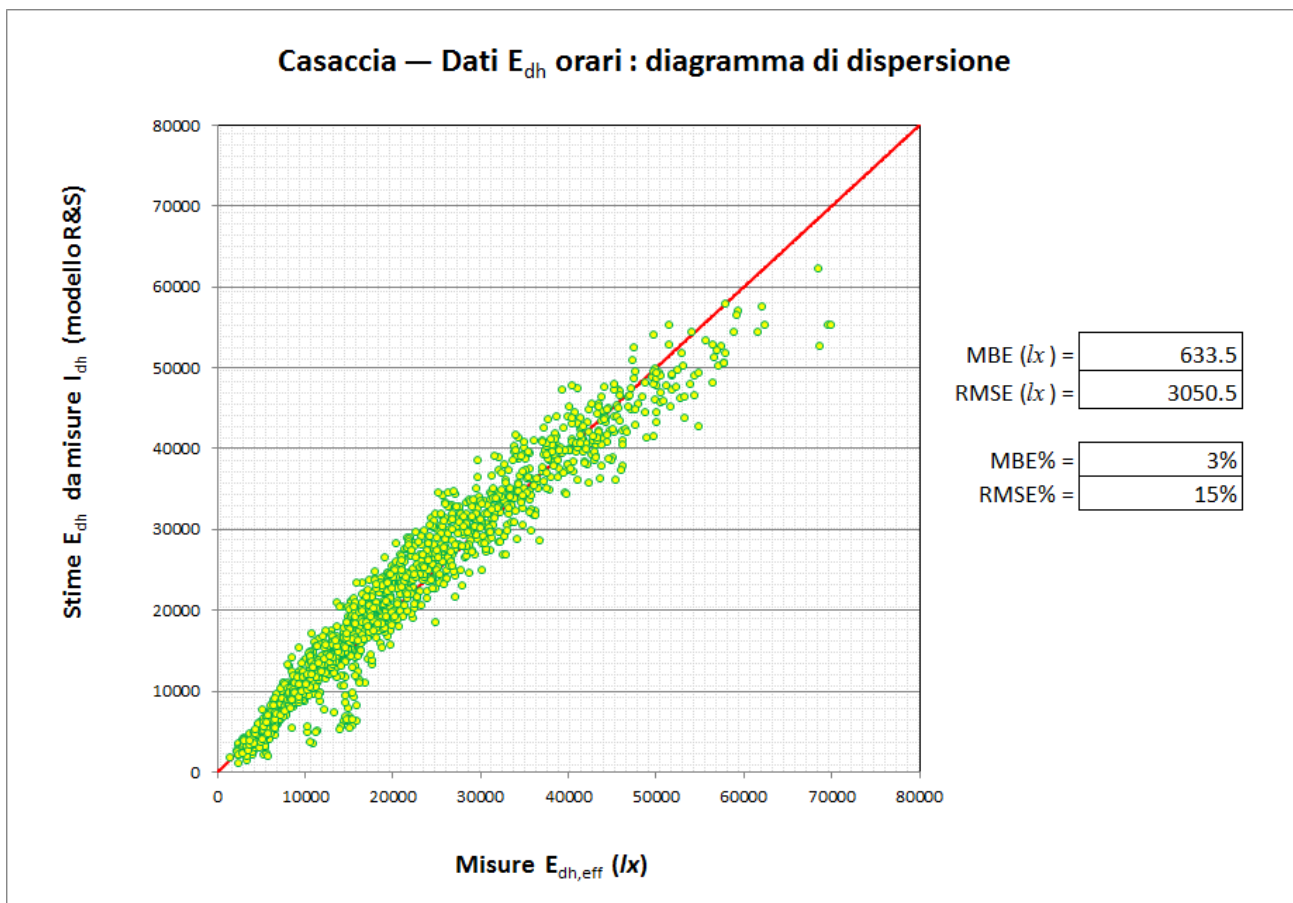


Figura 7. Casaccia – diagramma di dispersione fra misure e stime degli illuminamenti diffusi orizzontali, con i relativi indici di accostamento. Stime degli illuminamenti ottenuti con il modello R&S a partire da misure Diff.HI (fonte satellitare).

Gli indici di accostamento fra stime e misure sono ancora buoni, tali da confermare l’adeguatezza del modello di Robledo e Soler anche per gli illuminamenti diffusi. Ovviamente, la (relativamente) piccola differenza fra i valori medi — precisamente: $MBE\% = 3\%$ — tende a mascherare situazioni “locali” in cui le stime possono risultare significativamente più grandi delle corrispondenti misure, e viceversa. Ciò può essere controllato con un esame qualitativo del diagramma a dispersione; nel nostro caso, effettivamente, si può notare che per valori d’illuminamento intermedi le stime tendono ad essere tendenzialmente più grandi delle corrispondenti misure, mentre per valori d’illuminamento elevati — da 50 klux in su — si verifica la situazione opposta. In termini quantitativi, questi scostamenti rispetto alla bisettrice $stima=misura$, fanno sì che, rispetto al caso “globale”, si riscontra per l’illuminamento diffuso una maggiore dispersione ($RMSE\% = 15\%$ rispetto a 7% della figura 4): risultato comunque prevedibile, data la maggiore difficoltà nel modellare la componente diffusa, sia sul fronte dell’irraggiamento e sia su quello dell’illuminamento. Questi indizi saranno utili in seguito, insieme ai dati di acquisizione che nel frattempo si aggiungeranno ai database, per raffinare la modellistica.

Dall’esame sin qui condotto sono stati esclusi per ragioni di tempo i dati acquisiti presso le stazioni di Milano e Lampedusa. Tali dati, sebbene già disponibili, saranno esaminati nel proseguo di questa linea di attività. Un primo controllo di essi confermano le indicazioni sin qui emerse per il sito della Casaccia.

5 Nuovo modello per l'efficacia luminosa

I risultati dell'applicazione del modello di Robledo e Soler ai siti di Casaccia, Milano e Lampedusa — con dati di illuminamento acquisiti all'uopo presso tali località, abbinati a valori di irradianza solare, provenienti a loro volta da misurazioni al suolo, o anche stimate da fonte satellitare — autorizzano il ricorso al modello stesso, senza che vi si apporti alcuna modifica, per allestire l'atlante italiano degli illuminamenti globale e diffuso. Nondimeno, l'esame precedente degli indici statistici utilizzati per quantificare lo scostamento fra le misure e le previsioni del modello — scostamenti che si sono rivelati piccoli ma non nulli — non esclude la possibilità che il modello possa essere "rifinito" per meglio adattarsi alla situazione geografica dell'Italia. Le modifiche possono coinvolgere essenzialmente due aspetti:

- a) correggere per regressione statistica sui dati italiani i parametri empirici introdotti da Robledo e Soler nelle correlazioni. Ciò può essere senz'altro utile, ad esempio, per l'espressione dell'efficacia luminosa della componente diffusa, in modo da ridurre ulteriormente lo scostamento MBE%: in altri termini, si tratta di ricalcolare dei parametri α e β che compaiono in (3) ;
- b) in secondo luogo, modificare del tutto l'aspetto formale della correlazione, ed è ciò che sarà fatto per l'efficacia globale.

5.1 Correzione dei parametri empirici dell'efficacia luminosa diffusa

La formula per l'efficacia luminosa diffusa secondo Robledo è la seguente:

$$\eta_{dh} = \alpha \Delta^{-\beta} lm \cdot W^{-1} \quad (6)$$

in cui α e β sono i parametri empirici da stimare mediante regressione. Gli Autori citati li hanno calcolati con i dati da loro reperiti per la località di Madrid (Spagna); dunque, si tratta di ricalcolarli per la situazione italiana. Consideriamo perciò i dati di Casaccia (gli stessi utilizzati sopra per validare il modello R&S) e applichiamo l'algoritmo di regressione statistica usando:

- a) per quanto riguarda la variabile indipendente Δ (indice di brillantezza di Perez), i valori calcolati con la formula definitoria già ricordata:

$$\Delta = m I_{dh} / I_{0n} \quad (7)$$

in cui m è sono le masse d'aria ottiche relative, I_{dh} sono le irradianze diffuse orizzontali misurate e I_{0n} sono le corrispondenti irradianze extraatmosferiche normali;

- b) per quanto riguarda la variabile dipendente η_{dh} (efficacia luminosa diffusa), i valori ottenuti con la formula:

$$\eta_{dh} = \frac{E_{dh,eff}}{I_{dh}} \quad (8)$$

in cui $E_{dh,eff}$ sono gli illuminamenti diffusi orizzontali effettivi, calcolati dalle misure mediante la (1) per tener conto della presenza dell'anello oscurante; e I_{dh} sono le irradianze diffuse orizzontali misurate. Nuovamente, il confronto poteva essere effettuato con riferimento alle I_{dh} stimate dai dati satellitari, ma si è già affermato che in questo contesto l'interscambiabilità delle due fonti (misure; stime satellitari) per l'irradianza diffusa è lecita.

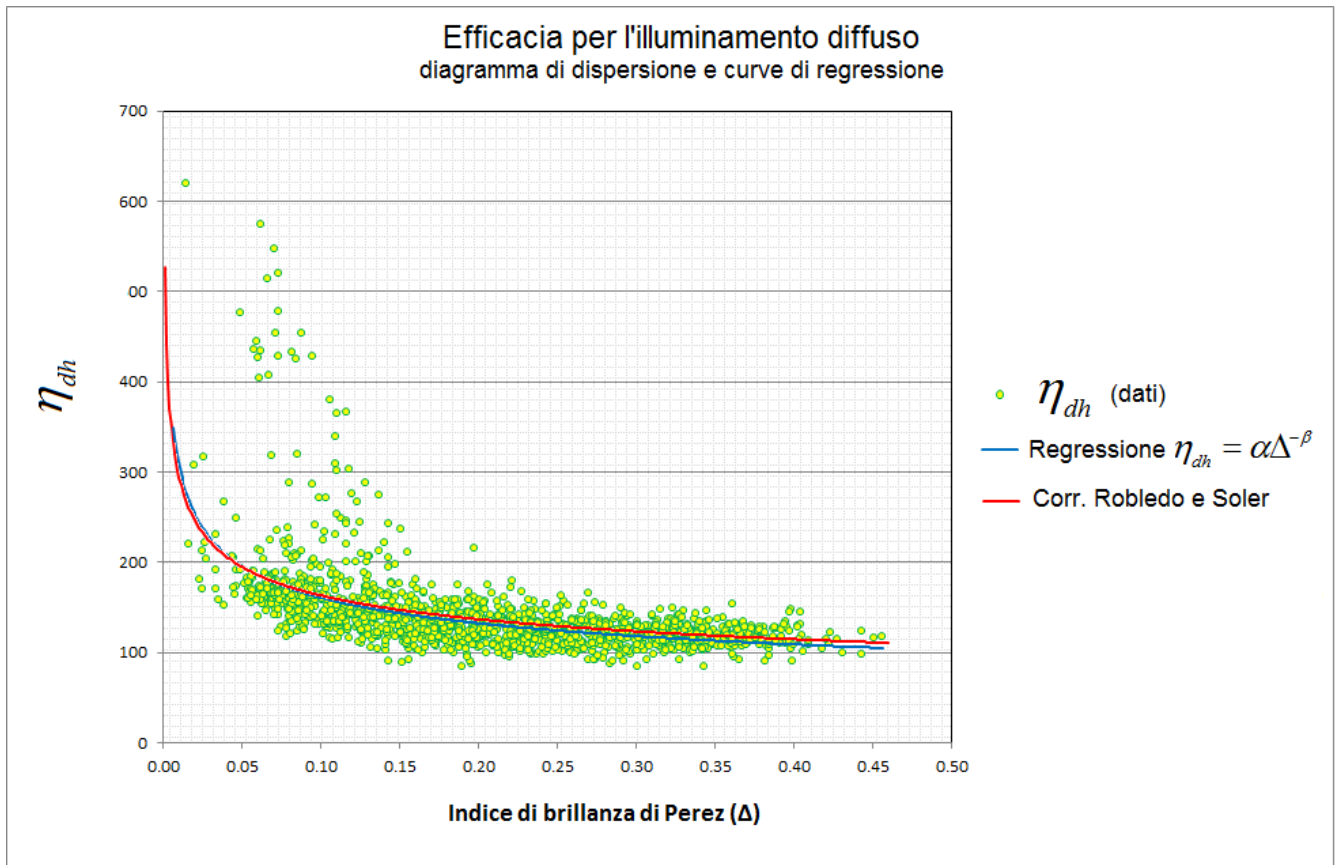


Figura 8. Casaccia – diagramma di dispersione per l'efficacia luminosa diffusa, curva di regressione e confronto con la correlazione di Robledo e Soler.

Osserviamo che il legame fra η_{dh} e Δ ipotizzato nella (6) ha l'aspetto di una potenza; di conseguenza, sembrerebbe che il procedimento canonico della regressione statistica (il metodo dei minimi quadrati) si complichino oltre misura. È però agevole linearizzare (6) trasformandola in:

$$\ln \eta_{dh} = \alpha - \beta \Delta \quad (9)$$

in modo da potervi applicare i calcoli già pronti per la regressione lineare. Nella nuova formulazione le due variabili (indipendente e dipendente) da correlare diventano: Δ e $(\ln \eta_{dh})$; mentre i nuovi parametri empirici che occorre stimare per regressione lineare sono: α e $(-\beta)$. In definitiva, si ottiene:

$$\begin{array}{l}
 \text{Modello per l'efficacia luminosa **diffusa**} \\
 \text{Dati: ENEA-Casaccia}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \eta_{dh} = \alpha \Delta^{-\beta} \\
 \alpha = 85 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\
 \beta = 0.28
 \end{array} \right. \quad (10)$$

5.2 Nuova formulazione per l'efficacia luminosa globale

Osserviamo che nella formulazione (3) del modello di Robledo e Soler l'efficacia globale è ottenuta come combinazione lineare delle due efficacie diffusa e diretta secondo pesi che dipendono dalla frazione dell'irradianza diffusa. Ciò costringe a mettere a punto un modello accurato anche per l'efficacia diretta e a stimare in maniera altrettanto accurata l'irradianza diretta normale (DNI) da utilizzare come input. Questo modo di procedere comporta diversi inconvenienti. Innanzitutto, di solito la DNI non è ottenuta in maniera diretta per misurazione o stima da fonte satellitare, ma è derivata a sua volta per modellazione dall'irradianza globale. In secondo luogo, nelle applicazioni dell'illuminamento naturale ipotizzate in questo studio, sono preponderantemente importanti gli illuminamenti globale e diffuso, mentre quello diretto riveste un ruolo marginale. Ne consegue che la maniera più conveniente per completare un modello di illuminamento dipendente dall'irradianza solare, è quella di aggiungere alla formulazione (10) scritta per la frazione diffusa, un nuova formula che leghi direttamente illuminamento e irradianza globali:

$$\eta_{gh} = \frac{E_{gh}}{I_{gh}} = f(\Delta, \dots)$$

ed eventualmente facendo derivare l'efficacia diretta – se interessa – da quelle globale e diffusa:

$$\eta_{bn} = \frac{\eta_{gh} - \eta_{dh}k}{1 - k} \quad (11)$$

Per procedere nell'intento, notiamo anche che gli stessi Robledo e Soler hanno proposto una correlazione per l'efficacia globale, però valevole solo per condizioni di cielo sereno. Si tratta della seguente:

$$\eta_{gh,clear} = 129.46 \cos^{0.122} \vartheta_z e^{-0.0029(90^\circ - \vartheta_z)} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (12)$$

Si può allora modificare la (12) introducendovi un termine che formalizzi la dipendenza dal grado di copertura nuvolosa. Un indice che costituisce una misura di nuvolosità è, fra gli altri, l'indice di brillantezza di Perez Δ e, infatti, applicandosi alla sola situazione serena, la (12) non contiene esplicitamente la dipendenza dall'indice di Perez. La modifica qui proposta prende la forma:

$$\frac{\eta_{gh}}{\eta_{gh,clear}} = f_c(\Delta)$$

Quale aspetto funzionale dovrà assumere l'espressione per f_c ? Per deciderlo, costruiamo il diagramma di dispersione per la coppia delle **variabili**:

- a) **indipendente**: indice di brillantezza di Perez (Δ). I valori di Δ sono sempre calcolati con l'espressione (7), in cui m sono le masse d'aria ottiche relative, I_{dh} sono le irradianze diffuse orizzontali misurate e I_{0n} sono le corrispondenti irradianze extraatmosferiche normali;
- b) **dipendente**: il rapporto $\frac{\eta_{gh}}{\eta_{gh,clear}}$. I valori per $\eta_{gh,clear}$ sono calcolati per mezzo della (12), mentre i valori η_{gh} saranno forniti dai rapporti fra le misure dell'illuminamento globale (orizzontale) e quelle dell'irradianza globale (sempre orizzontale).

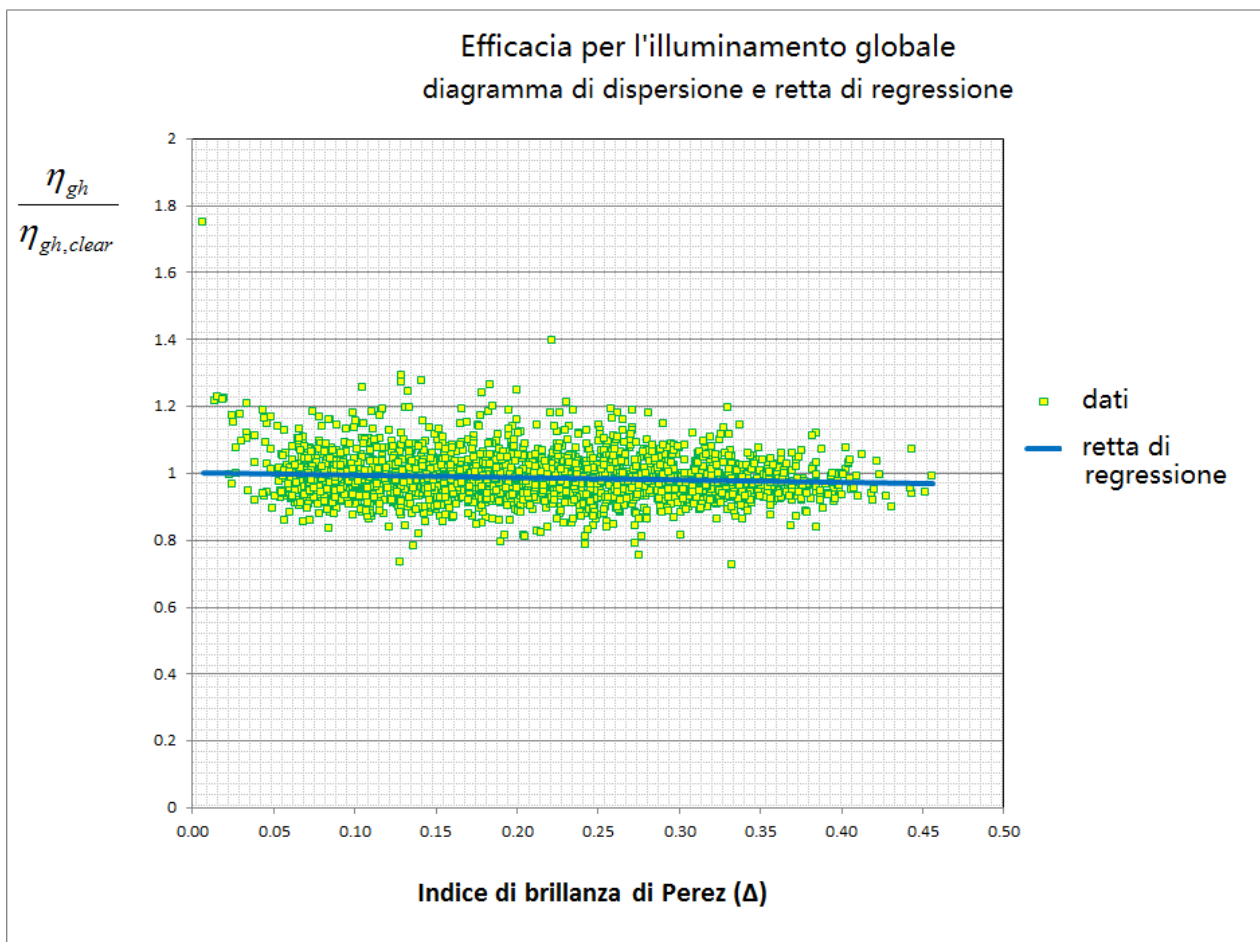


Figura 9. Casaccia – diagramma di dispersione per l'efficacia luminosa globale e retta di regressione.

La figura 9 mostra il diagramma costruito con i dati di Casaccia. Osserviamo che nella formulazione di Robledo & Soler (3) per il caso generale, la dipendenza da Δ è in termini di potenza per l'efficacia diffusa e lineare per quella diretta. Poiché l'efficacia globale ingloba entrambi i contributi diretto e diffuso, la sua

dipendenza da Δ sarà ragionevolmente espressa mediante curva che assomigli a una curva intermedia fra quella di potenza e quella lineare. Il diagramma di dispersione mostra che la semplice retta di regressione:

$$\frac{\eta_{gh}}{\eta_{gh,clear}} = \theta - \phi' \Delta \quad (13)$$

può essere adeguata. Con tale assunzione, la stima dei parametri di regressione conduce ai seguenti valori:

$$\begin{cases} \theta = 1.002794 \\ \phi' = 0.076165 \end{cases} \quad (14)$$

In definitiva, raccogliendo le espressioni (12) e (13) e tenendo conto delle stime dei parametri di regressione (14), la nuova formulazione per l'efficacia luminosa globale, qui è proposta, assume il seguente aspetto compatto:

$$\begin{array}{l} \text{Modello per l'efficacia luminosa globale} \\ \text{Dati: ENEA-Casaccia} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \eta_{gh} = \lambda \cos^a \vartheta_z e^{-b(90^\circ - \vartheta_z)} (1 - \phi \Delta) \\ \lambda = 129.82 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\ a = 0.122 \\ b = 0.029 \\ \phi = 0.07595 \end{array} \right. \quad (15)$$

dove si è posto ovviamente: $\lambda = 129.46 \times 1.00794 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ e: $\theta = 0.076165 / 1.002794$. Con il nuovo modello è possibile ricalcolare le efficacie globali a partire dalle misure di GHI e confrontarle con le misure dell'illuminamento globale. Il nuovo diagramma di dispersione (*misure, stime*) degli illuminamenti globali (orizzontali) e gli indici di accostamento sono mostrati nella figura 10; come appena detto, le stime $E_{gh,st}$ sono calcolate a partire dalle misure d'irradianza $I_{gh,mis}$:

$$E_{gh,st} = \eta_{gh} I_{gh,mis}$$

usando i valori di efficacia η_{gh} derivato da (15). Per apprezzare il miglioramento conseguito rispetto al modello originario di Robledo e Soler, la nuova situazione va confrontata con quella di figura 4: è diminuito significativamente il MBE (assoluto e relativo: 483.2 lx e 1% rispetto a 1439.9 lx e 3%) mentre è rimasto sostanzialmente invariato il MRSE (2804.9 lx rispetto a 29994 lx), come d'altronde c'era da aspettarsi, in quanto la tecnica di regressione ha potuto sì "posizionare" meglio la curva di regressione sulla nuvola dei dati ma influisce poco sulla dispersione delle coppie di dati intorno alla curva stessa.

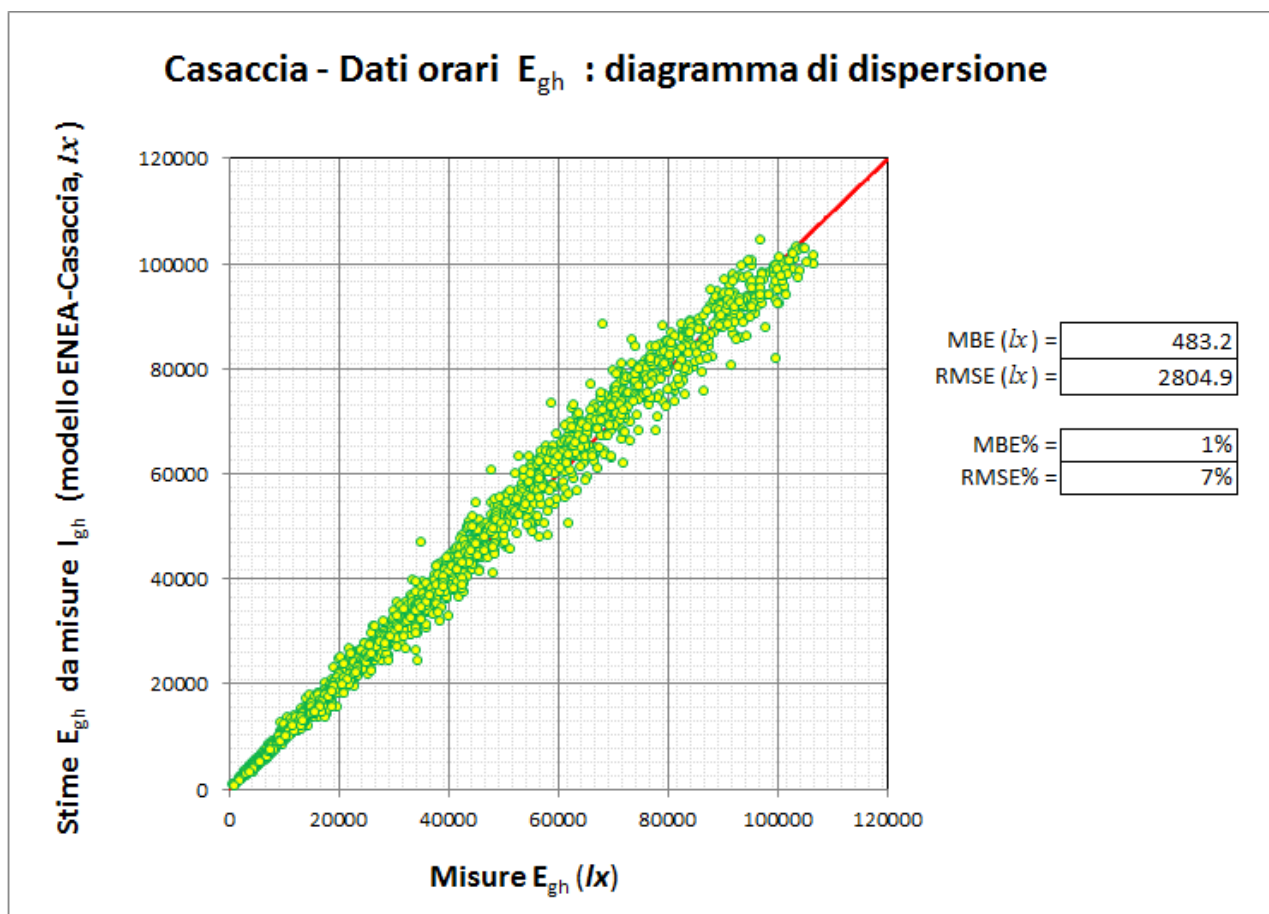


Figura 10. Casaccia – diagramma di dispersione fra misure e stime degli illuminamenti globali orizzontali, con i relativi indici di accostamento. Stime degli illuminamenti ottenuti con il a partire da misure GHI e utilizzando il modello ENEA-Casaccia.

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Gli scopi dichiarati di questo studio erano:

- a) verificare che il modello di Robledo e Soler per derivare gli illuminamenti naturali dalle irradianze solari, con il ricorso al concetto di *efficacia luminosa* — modello messo a punto da tali autori sulla base di dati acquisiti presso il sito di Madrid (Spagna) — possa essere utilmente esteso al calcolo degli illuminamenti di località italiane;
- b) verificare che nel calcolo possano essere usate le irradianze *stimate* dai dati satellitari al posto di quelle *misurate* al suolo;
- c) eventualmente, apportare modifiche al modello individuato dagli autori spagnoli, in modo che la nuova formulazione si adatti meglio alla realtà italiana.

Il modello di Robledo e Soler per l'efficacia luminosa è uno dei tanti che sono pubblicati in letteratura ed è stato prelezionato sulla base di un lavoro precedente svolto nell'ambito della stessa RdSE [13]. Riguardo al secondo punto, va osservato che la possibilità di usare le stime satellitari della radiazione solare rende immediatamente disponibili dataset di illuminamenti naturali per qualunque località italiana. L'ENEA infatti

già dispone di estesi database della radiazione solare sotto forma di mappe digitali che coprono l'intervallo temporale di dieci anni (2006 ÷ 2015, aggiornato con continuità) e sono derivate da fonte satellitare; inoltre, è varia anche la tipologia delle informazioni memorizzate in esse: dati orari, giornalieri, mensili e annui, medie pluriennali, profili di anni meteorologici tipici, dati riferiti a superfici orizzontali o comunque orientate, ecc. Essendo tali mappe georeferenziate, è possibile estrarre i valori della radiazione solare per qualunque località italiana: i modelli consentono allora di tradurli immediatamente nei corrispondenti valori d'illuminamento naturale.

Le misure di illuminamento naturale effettuate da novembre 2015 ad agosto 2016 presso tre siti italiani, ovvero Milano, Casaccia e Lampedusa, scelti in base alla loro rappresentatività della situazione geografica della penisola alle differenti latitudini, e la contemporanea disponibilità di dati d'irradianza solare, ottenuti sia con *misurazione* al suolo sia per calcolo (*stima*) a partire dalle immagini satellitari (digitali), ha permesso di rispondere affermativamente alle prime due esigenze sopra elencate.

Va ricordato che tutti i modelli qui considerati sono di natura empirico-statistica: stabiliscono un appropriato legame funzionale fra delle grandezze da correlare, il quale incorpora anche alcuni parametri (empirici) che vanno stimati con metodi di regressione (statistica). È ovvio allora che i valori dei parametri così ottenuti dipendano dai dati utilizzati per mettere a punto il modello e collezionati con riferimento ad una particolare realtà. Nel caso di grandezze meteorologiche, ad esempio, la validità del modello può essere ristretta ad una particolare regione geografica e/o ad un particolare intervallo temporale: stagionale, pluriennale o altro. Non è detto che l'applicabilità ad un diverso periodo temporale e/o un'altra realtà geografica sia automaticamente garantita, anzi dev'essere attentamente controllata volta per volta, o eventualmente occorre renderla applicabile previo il ricalcolo dei parametri empirici coinvolti, attingendo alle serie di dati pertinenti al nuovo periodo e/o realtà geografica. È quanto è stato effettuato qui, con profitto, almeno per una delle tre grandezze che caratterizzano il fenomeno dell'illuminamento luminoso: l'efficacia per l'illuminamento **diffuso**. Per l'efficacia luminosa **globale**, invece, in considerazione dell'importanza che riveste nelle applicazioni energetiche, si è voluto proporre una nuova formulazione, in parte derivata dal modello stesso di Robledo e Soler. Di conseguenza, la terza efficacia coinvolta nei fenomeni, quella per l'illuminamento **diretto**, è fatta derivare per definizione dalle altre due. In definitiva, il quadro completo della nuova formulazione è il seguente:

Modello per l'efficacia luminosa
Dati: ENEA-Casaccia

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{gh} = \eta_{gh} I_{gh} \\ \eta_{gh} = \lambda \cos^a \vartheta_z e^{-b(90^\circ - \vartheta_z)} (1 - \phi \Delta) \\ \\ E_{dh} = \eta_{dh} I_{dh} \\ \eta_{dh} = \alpha \Delta^{-\beta} \\ \\ E_{bn} = \eta_{bn} I_{bn} \\ \eta_{bn} = \frac{\eta_{gh} - \eta_{dh} k}{1 - k} \\ \\ k = I_{dh} / I_{gh} \\ \Delta = m I_{dh} / I_{0n} \end{array} \right. \quad (16)$$

con significato dei simboli (già noto):

I_{gh}	I_{dh}	I_{bn}	irradianze (solari) globale orizzontale (GHI), diffusa orizzontale e diretta normale (DNI);
E_{gh}	E_{dh}	E_{bn}	illuminamenti (naturali) globale orizzontale, diffuso orizzontale e diretto normale;
η_{gh}	η_{dh}	η_{bn}	efficacie luminose globale, diffusa e diretta;
I_{0n}			irradianza extraatmosferica normale (ENI);
k			frazione della radiazione diffusa (sul piano orizzontale);
ϑ_z			angolo zenitale;
Δ			indice di brillantezza di Perez (<i>sky's brightness index</i>);
m			massa d'aria ottica relativa (<i>Relative optical air mass</i>).

$\lambda, a, b, \phi, \alpha, \beta$ sono invece i parametri empirici stimati per regressione statistica sui dati; in accordo con i dati di ENEA-Casaccia i valori trovati sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 129.82 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\ a = 0.122 \\ b = 0.029 \\ \phi = 0.07595 \\ \alpha = 85 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \\ \beta = 0.28 \end{array} \right. \quad (17)$$

Sulla base dei risultati sin qui conseguiti, si possono delineare i seguenti sviluppi futuri:

- proseguire la campagna di acquisizione dei dati di illuminamento naturale presso le stazioni di Milano, Casaccia e Lampedusa per estendere la base dei dati disponibile e migliorare, se necessario, la stima

dei valori (17). È desiderabile che tale base si estenda per almeno un periodo che copra l'intero ciclo della variabilità stagionale, ovvero un anno, per tener conto di tutte le situazioni climatiche che si presentano nella località di acquisizione dei dati;

- b) procedere all'allestimento capillare degli **anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale** (AMTIN), secondo la procedura già delineata nello studio [13] che ha preceduto l'attuale, per tutte le località di interesse nel campo dell'efficientamento energetico degli edifici;
- c) mettere i risultati a disposizione della comunità tecnica nazionale, con la pubblicazione dei dati sul sito web *Solaritaly — Atlante italiano della radiazione solare*¹⁰, gestito dall'ENEA, che per questo motivo dovrà essere ingrandito e profondamente riprogettato sia sotto l'aspetto formale (*layout*) e sia per i contenuti ospitati. Non ultimo, andrà rivista anche la sua denominazione perché sia reso esplicito il riferimento *alla radiazione solare e all'illuminamento naturale*.

Le attività sopra elencate sono state previste e quindi diligentemente incluse nel documento di programmazione per il piano triennale 2015 ÷ 2017 della Ricerca di Sistema Elettrico.

¹⁰ Per una descrizione dell'Atlante vedasi ancora [13]. L'URL è indicato in [25].

Appendice 1 — Massa d'aria ottica relativa

La *massa d'aria ottica relativa* m (*Relative Optical Air Mass*) è data dal rapporto fra la lunghezza del percorso effettivo dei raggi solari in atmosfera e quella corrispondente al Sole a perpendicolo. Perciò vale $m = 1$ quando il Sole è a perpendicolo (in realtà, impossibile alle nostre latitudini) e tende a valori molto grandi quando il Sole è basso sull'orizzonte. Una formula di prima approssimazione, valida per gli intervalli in cui il Sole è abbastanza alto sull'orizzonte ($\vartheta_z < 60^\circ$), è la seguente:

$$m_0 = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \quad (18)$$

Nell'equazione precedente, il pedice '0' indica che l'espressione è riferita a livello del mare. La formula sarebbe esatta per qualsiasi angolo zenitale se l'orizzonte fosse piatto (si veda in figura 11 il rapporto fra i segmenti OP' e ON).

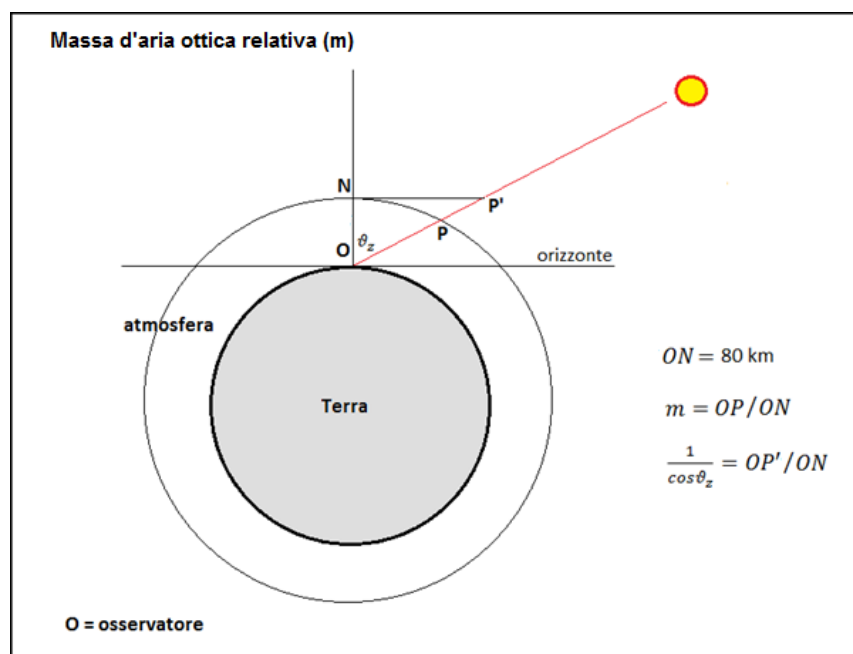


Figura 11. Massa d'aria ottica relativa

Quando si tiene conto della curvatura della superficie terrestre, la formula corretta, per qualunque angolo zenitale, è invece la seguente:

$$m_0 = \sqrt{1229 + (614 \cdot \cos \vartheta_z)^2} - 614 \cdot \cos \vartheta_z \quad (19)$$

(il rapporto fra i segmenti OP/ON di figura 11). Va detto che per angoli zenitali prossimi a 90° , ossia con il Sole basso sull'orizzonte, i raggi solari percorrono una traiettoria che si discosta lievemente da quella retti-

linea a causa delle proprietà ottiche dell'atmosfera; per tener conto di questa curvatura, Kasten e Young (1989, [21,22]), hanno trovato la seguente espressione:

$$m_0 = \frac{1}{\sin h_S + \frac{0.50572}{(h_S + 6.07995)^{1.6364}}} \quad (20)$$

in cui h_S è l'elevazione del Sole sull'orizzonte. Nella somma fra parentesi, l'elevazione va espressa in gradi sessadecimali. Elevazione e angolo zenitale sono complementari: $h_S = 90 - \mathcal{G}_z$. Pertanto è pure: $\sin h_S = \cos \mathcal{G}_z$.

Se la località non si trova a livello del mare, i raggi solari percorrono nell'atmosfera un tratto più breve; sebbene la correzione necessaria sia relativamente piccola per la maggior parte delle altitudini, è possibile tenerne conto ricorrendo all'espressione [23]:

$$m = m_0 \exp(-h/8446) \quad (21)$$

in cui h è l'altitudine della località e va espressa in metri.

Appendice 2 — Parametri o indici statistici

Consideriamo due serie di dati riferite a una stessa quantità fisica, ad esempio l'illuminamento naturale: la prima serie consista di *misure*, mentre la seconda di *stime* calcolate con il ricorso a un appropriato modello; inoltre, ogni stima sia riferita alle medesime condizioni fenomeniche della corrispondente misura (istante, situazione meteorologica ecc.). Più in generale, le considerazioni che seguono varranno per qualunque coppia di serie di dati corrispondenti, di cui la prima è presa a riferimento perché formata da valori ritenuti in qualche maniera "esatti" o "veri", mentre della seconda, costituita da valori ricavati con un metodo alternativo e per lo più indiretto, ad esempio un modello di calcolo, si vuole determinare il grado di scostamento dalla serie dei valori veri. In ossequio a questa impostazione, i valori della prima serie sono detti genericamente *osservazioni*, mentre quelli della seconda serie *previsioni* (o anche stime) del modello dato. Se ora denotiamo rispettivamente con O_i l' i -esima osservazione (di N in totale) e con P_i la previsione corrispondente, l'*errore* della previsione i -esima sarà dato dalla differenza:

$$e_i = P_i - O_i \quad (22)$$

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 12 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 (O_i, P_i) 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.

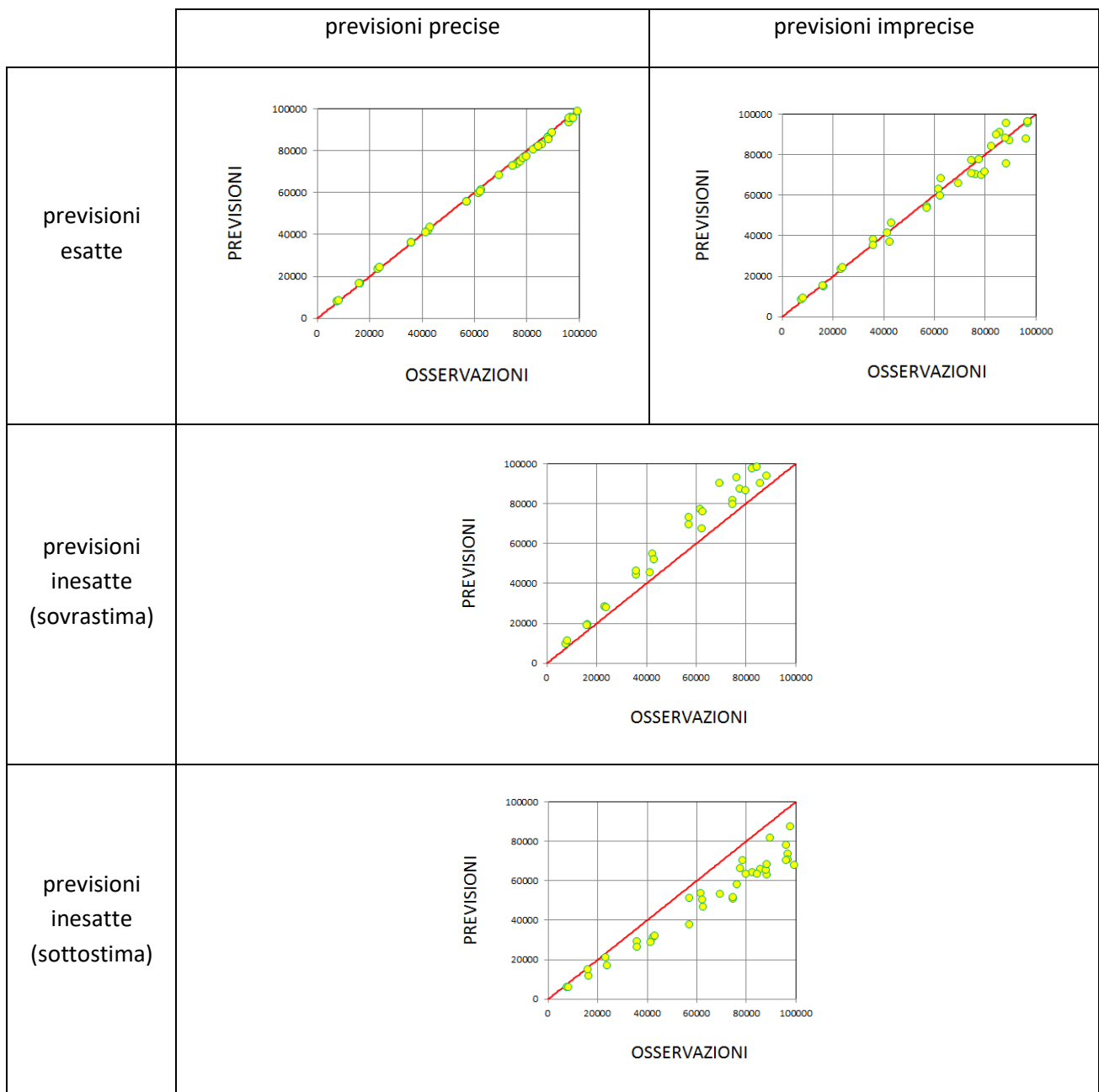


Figura 12. Previsioni vs osservazioni: esattezza (\equiv accuratezza) e precisione.

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.

Errore medio (inglese: *Mean Error*, o anche: *Mean Bias Error*, MBE). Si definisce come segue:

$$MBE = \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (23)$$

Errore assoluto medio (*Mean Absolute Error*, MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i|}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad (24)$$

Radice dell'errore quadratico medio (*Root Mean Squared Error*, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (25)$$

Il primo è un indice atto a valutare soprattutto l'esattezza (l'accuratezza) delle previsioni, mentre i restanti due permettono di stimarne meglio la precisione (tabella 4). Tutti e tre gli indici forniscono una misura "assoluta" degli errori, nel senso che questi sono espressi nella stessa unità della grandezza studiata (nel caso dell'illuminamento, il lux). Però gli indici "assoluti" non sempre consentono di stabilire agevolmente se le differenze fra osservazioni e previsioni siano accettabili giacché non fanno riferimento ad alcun termine di paragone. Di norma, come confronto è utilizzata la media delle osservazioni e gli errori "assoluti" sono tradotti in frazioni percentuali di questa. Ecco allora i tre indici "relativi" corrispondenti:

Errore medio percentuale (*Mean Bias Error Percent*):

$$MBE\% = \frac{\bar{e}}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N e_i / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i) / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (26)$$

Errore assoluto medio percentuale (*Mean Absolute Error Percent*, MAE%):

$$MAE\% = \frac{MAE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (27)$$

Radice dell'errore quadratico medio percentuale (Root Mean Squared Error Percent, RMSE%):

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} \times 100 = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} \times 100 \quad (28)$$

I tre nuovi indici sono adimensionali e si esprimono in percento; nella maggioranza delle situazioni, valori pari a pochi percento sono ritenuti accettabili.

Osserviamo qui che MAE e RMSE sono casi particolari dell'indice seguente:

$$MAE_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^N |e_i|^p}{N} \right)^{1/p} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|^p}{N} \right)^{1/p} \quad (29)$$

È immediato constatare che il nuovo indice coincide con il canonico MAE per $p = 1$ e con l'RMSE per $p = 2$. Come si è detto, MAE, RSME e più in generale MAE_p sono parametri che servono per valutare soprattutto la precisione delle previsioni e per questo fine possono essere usati in maniera interscambiabile; differiscono solo per il "peso" relativo che attribuiscono agli errori nella composizione dell'indice stesso: infatti, con l'aumentare dell'esponente p , gli errori più grandi hanno peso maggiore rispetto a quelli più piccoli.

Per completezza si può ricordare che esistono tre ulteriori parametri che possono essere utilmente usati al posto di MBE%, MAE% e RMSE%. Essi sono rispettivamente:

Mean Percentage Error (MPE)

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (30)$$

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|e_i|}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|P_i - O_i|}{O_i} \right) \times 100 \quad (31)$$

Root Mean Squared Percentage Error (RSMPE)

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{O_i} \right)^2} \times 100 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \right)^2} \quad (32)$$

	<i>Indici per valutare l'esattezza (accuratezza)</i>	<i>Indici per valutare la precisione</i>
<i>Indici "assoluti" (espressi nella stessa unità di misura della grandezza studiata)</i>	MBE	MAE, RMSE, MAE _p
<i>Indici "relativi" (espressi in percento, adimensionali)</i>	MBE%, MBPE	MAE%, RMSE%, MAPE, RMSPE

Tabella 4. Classificazione degli indici di accostamento

Un'ultima osservazione. Nella definizione dei tre indici "assoluti" MBE, MAE e RMSE non c'è alcuna limitazione per i valori assumibili dalla grandezza studiata: possono essere negativi, nulli o positivi. Ciò non è più vero per i corrispondenti indici "relativi" MBE%, MAE% e RMSE%: se la grandezza potesse assumere anche valori negativi, il loro significato non sarebbe più ovvio. Si pensi ad esempio alla temperatura: se il valore medio delle osservazioni risultasse nullo – eventualità che non può essere esclusa quando siano contemporaneamente presenti nella serie sia valori osservativi positivi, sia negativi – tali indici diverrebbero infiniti indipendentemente dall'entità degli errori, piccoli quanto si vogliono. Almeno nell'esempio qui riportato, il rimedio è comunque abbastanza immediato: poiché tutto nasce dalla posizione dello zero nella scala dei gradi Celsius, è sufficiente convertire le temperature in unità kelvin. Nella nuova (e naturale) scala delle temperature, tutti i valori risultano positivi per definizione. In definitiva, una volta ammesso più o meno esplicitamente che la grandezza studiata possa assumere solo valori positivi, o al più nulli – tutte le quantità meteo: velocità del vento, umidità, irradianze, illuminamenti e anche le temperature, pur con l'accortezza di usare per esse una scala opportuna, rispettano questa restrizione – anche gli indici "relativi" MBE%, MAE% e RMSE% possono essere usati in maniera generalizzata. Un'accortezza aggiuntiva richiede, invece, l'uso degli altri indici "relativi", ossia MBPE, MAPE e RMSPE: per come sono definiti, possono applicarsi solo quando tutti i valori della serie delle osservazioni sono positivi. Non sono applicabili, perciò, per studiare le irradianze e gli illuminamenti, i quali sono teoricamente nulli nelle ore notturne e potrebbero azzerarsi, in condizioni particolari, anche in brevi intervalli diurni.

Appendice 3 — Sulle GHI misurate e/o stimate

L'idea-guida che motiva questo lavoro è che esista una correlazione fra illuminamenti naturali e irradianze solari, e che pertanto quelli possano stimarsi agevolmente da queste; ciò al fine di stabilirne una – ovvero il suo aspetto formale e i parametri numerici coinvolti – che sia valida per la realtà geografica della regione italiana. Il prerequisito è che i dati d'irradianza (disponibili) siano davvero copiosi. Ovviamente, l'assunzione – sempre presupposta – è che la fonte stessa dei dati d'irradianza sia attendibile. L'attendibilità generale delle stime d'irradianza dell'ENEA derivate da fonte satellitare, che qui si vogliono utilizzare come input al modello, è esaminata in un altro lavoro dello stesso PAR2015 [24]; in questo contesto invece si vuole mostrare la liceità del ricorso alle stime satellitari per le località prescelte nello studio e per il solo periodo

esaminato. Per fare ciò, nella figura 13 sono mostrati gli andamenti dei valori orari dell'irradianza globale orizzontale (GHI) relativi a cinque giorni consecutivi, a partire dal 21 maggio 2016, per la località di Casaccia (come al solito, sono omessi gli intervalli notturni fra un giorno e l'altro, per i quali le irradianze sono nulle). Gli andamenti si riferiscono alle due serie di valori:

- delle **misure** orarie al suolo della GHI effettuate in Casaccia con la stazione solarimetrica, che definiscono i termini del confronto;
- delle **stime** orarie della GHI, ricavate agli stessi istanti, con il modello della radiazione solare messo a punto dall'ENEA il quale, ripetiamo, permette di stimare l'irradianza solare (globale, diffusa e diretta) a partire dal dato di copertura nuvolosa memorizzato pixel per pixel nelle immagini satellitari METEOSAT;

Come previsto, il grafico mostra che l'andamento delle GHI stimate riproduce abbastanza fedelmente quello delle GHI misurate; la sovrapposizione non è perfetta solo (ma non sempre) per i giorni nuvolosi¹¹, sebbene le differenze in questi casi rimangano trascurabili.

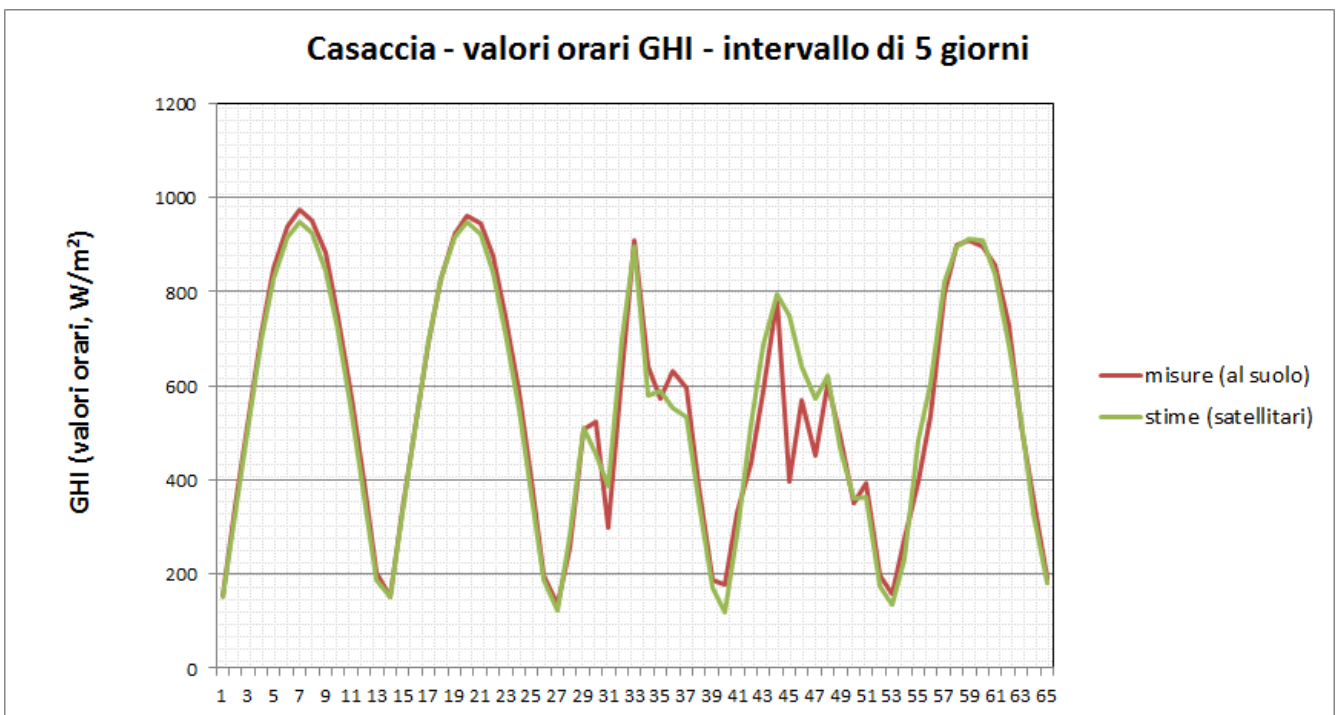


Figura 13. Casaccia — Andamento dell'irradianza globale orizzontale (GHI) per cinque giorni consecutivi.

Il diagramma a dispersione e gli indici di dispersione mostrati in figura 14 confermano la bontà della conclusione appena stabilita. Nel diagramma sono stati inserite le coppie orarie diurne (*misura*, *stima*) relative al periodo da novembre 2015 a giugno 2016. La località è ancora Casaccia.

¹¹ Questo non falsa significativamente l'ammontare totale dell'irradiazione solare in quanto, riducendosi l'irradianza a causa delle nubi, il suo contributo nei giorni nuvolosi è significativamente inferiore rispetto alle giornate serene.

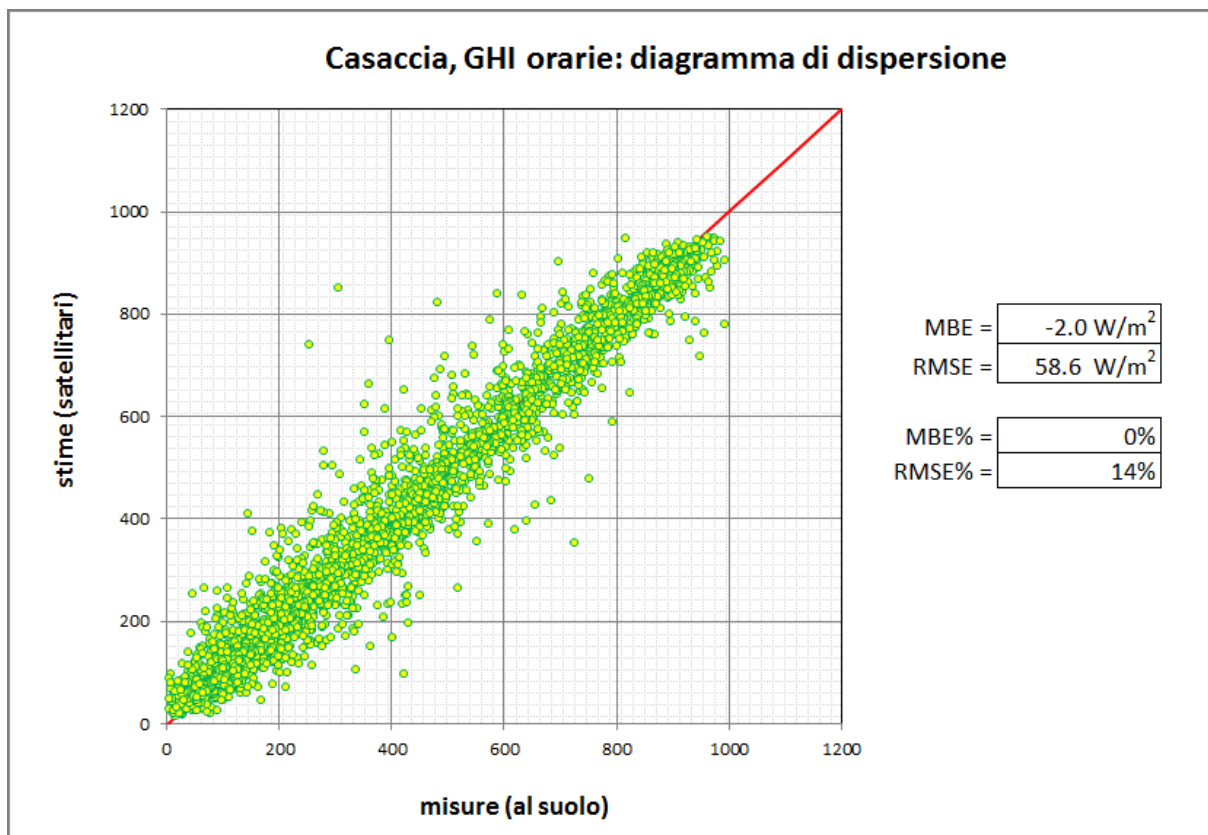


Figura 14. Casaccia – Diagramma a dispersione delle GHI misurate e stimate.

A conclusioni analoghe si giunge, infine, considerando l’irradianza diffusa invece di quella globale ed estendendo l’analisi alle altre due località oggetto dello studio (Milano, Lampedusa). A titolo d’esempio, nella tabella 5 sono riportati gli indici di accostamento per la coppia delle serie (misure, stime) rispettivamente: dell’irradianza diffusa (orizzontale) per Casaccia; e dell’irradianza globale (orizzontale) per Milano. I periodi sono: dicembre 2015 ÷ giugno 2016 per la prima località e: novembre 2015 ÷ agosto 2016 per la seconda. La maggiore dispersione riscontrata per l’irradianza diffusa rispetto a quella globale (in Casaccia: RMSE = 32% contro 14%) dipende dalla maggiore difficoltà di modellare la diffusa a partire dal (solo) dato di copertura nuvolosa.

Tabella5. Indici di accostamento per le serie delle misure vs stime dell’irradianza. A sinistra: località Casaccia, irradianza diffusa; a destra: località di Milano, irradianza globale.

<table border="1" style="margin: 0 auto;"> <tr> <td>MBE =</td> <td>-11.6 W/m²</td> </tr> <tr> <td>RMSE =</td> <td>66.4 W/m²</td> </tr> </table>	MBE =	-11.6 W/m ²	RMSE =	66.4 W/m ²	<table border="1" style="margin: 0 auto;"> <tr> <td>MBE =</td> <td>-5.1 W/m²</td> </tr> <tr> <td>RMSE =</td> <td>61.0 W/m²</td> </tr> </table>	MBE =	-5.1 W/m ²	RMSE =	61.0 W/m ²
MBE =	-11.6 W/m ²								
RMSE =	66.4 W/m ²								
MBE =	-5.1 W/m ²								
RMSE =	61.0 W/m ²								
<table border="1" style="margin: 0 auto;"> <tr> <td>MBE% =</td> <td>-5%</td> </tr> <tr> <td>RMSE% =</td> <td>32%</td> </tr> </table>	MBE% =	-5%	RMSE% =	32%	<table border="1" style="margin: 0 auto;"> <tr> <td>MBE% =</td> <td>-2.0%</td> </tr> <tr> <td>RMSE% =</td> <td>19.3%</td> </tr> </table>	MBE% =	-2.0%	RMSE% =	19.3%
MBE% =	-5%								
RMSE% =	32%								
MBE% =	-2.0%								
RMSE% =	19.3%								
Casaccia — diffusa	Milano — globale								

Sigle, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

AMT	Anno meteorologico tipico
AMTIN	Anno meteorologico tipico per l'illuminamento naturale
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage / <i>International Commission on Illumination</i>
Diff.HI	[irradianza zione] diffusa su piano orizzontale (Diffuse Horizontal Irradia[nce tion])
DNI	Irradia[nza zione] diretta normale (Direct Normal Irradia[nce tion])
ENI	Irradia[nza zione] extraatmosferica su piano normale
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GHI	[irradianza zione] globale su piano orizzontale (Global Horizontal Irradia[nce tion])
HRV	(immagini METEOSAT) High Resolution Visible
MAE	Mean Absolute Error (Errore assoluto medio)
MAE%	Mean Absolute Error Percent (Errore assoluto medio percentuale)
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MBE	Mean Bias Error (Errore medio)
MBE%	Mean Bias Error Percent (Errore medio percentuale)
MPE	Mean Percentage Error
RdSE	Ricerca di Sistema Elettrico
RMSE	Root Mean Squared Error (Radice dell'errore quadratico medio)
RMSE%	Root Mean Squared Error Percent (Radice dell'errore quadratico medio percentuale)
RMSPE	Root Mean Squared Percentage Error
s.q.m.	scarto quadratico medio
SI	Sistema internazionale delle unità di misura
TRY	Test Reference Year

Simbolo	Grandezza	Acronimo	Unità di misura
b	Larghezza della banda oscurante del sensore per l'illuminamento diffuso		cm
E, E_{gh}	Illuminamento naturale globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Illuminance</i>		lx
E_{bn}	Illuminamento naturale diretto (su piano) normale <i>Direct Normal Illuminance</i>		lx
E_d, E_{dh}	Illuminamento naturale diffuso (su piano) orizzontale		lx
$E_{dh,mis}$	Illuminamento naturale diffuso (su piano) orizzontale, misurato dal sensore		lx
$E_{dh,eff}$	Illuminamento naturale diffuso (su piano) orizzontale, effettivo della (emi)sfera celeste		lx
h	Altitudine		m

h_s	Altezza (o elevazione) del Sole		grado ($^{\circ}$), <i>rad</i>
I, I_{gh}	Irradianza solare globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Irradiance</i>	GHI	$W m^{-2}$
I_{bn}	Irradianza solare diretta (su piano) normale <i>Direct Normal Irradiance</i>	DNI	$W m^{-2}$
I_d, I_{dh}	Irradianza solare diffusa (su piano) orizzontale	Diff.HI	$W m^{-2}$
I_{0n}	Irradianza extraatmosferica (su piano) normale <i>Extraterrestrial Normal Irradiance</i>	ENI	$W m^{-2}$
k	Frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale (entrambe riferite al piano orizzontale)		adimensionale
m	Massa d'aria ottica relativa <i>Relative Optical Air Mass</i>		adimensionale
m_0	Massa d'aria ottica relativa (a livello del mare) <i>Relative Optical Air Mass (at sea level)</i>		adimensionale
r	Raggio di curvatura della banda oscurante del sensore per l'illuminamento diffuso		<i>cm</i>
X	Fattore correttivo dell'illuminamento orizzontale diffuso		adimensionale
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \mu, \rho$	Parametri numerici dei modelli di efficacia luminosa di Robledo e Soler		adimensionali
δ	Declinazione solare		grado ($^{\circ}$), <i>rad</i>
Δ	Indice di Perez per la brillantezza del cielo Sky's brightness index ¹²		adimensionale
η_{bn}	Efficacia luminosa diretta <i>Direct luminous efficacy</i>		<i>lm/W</i>
η_{dh}	Efficacia luminosa diffusa (su piano orizzontale) <i>Diffuse luminous efficacy</i>		<i>lm/W</i>
η_{gh}	Efficacia luminosa globale (su piano orizzontale) <i>Global luminous efficacy</i>		<i>lm/W</i>
$\eta_{gh,clear}$	Efficacia luminosa globale (su piano orizzontale) in condizioni di cielo sereno		<i>lm/W</i>
ϑ_z	Angolo zenitale		grado ($^{\circ}$), <i>rad</i>
ϕ	Latitudine (geografica)		grado ($^{\circ}$), <i>rad</i>
ψ_{sr}	Angolo di azimut solare dell'alba		grado ($^{\circ}$), <i>rad</i>

¹² Nell'articolo di Perez, 1990: *Atmospheric Brightness Parameter*.

Simboli per unità di misura:

Unità di misura	Simbolo	
metro	<i>m</i>	Lunghezza
metro quadro	<i>m²</i>	Area
ora *	<i>h</i>	Tempo
grado *	°	Angolo piano
radiante	<i>rad</i>	Angolo piano
watt	<i>W</i>	Potenza
lumen	<i>lm</i>	Flusso luminoso
lux	<i>lx</i>	Illuminamento

(*) Unità non SI

Altri simboli	Significato
÷	intervallo

Bibliografia / References

- 1 Communication from the Commission of 3 March 2010 - Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth [COM(2010) 2020 final – Not published in the Official Journal].
- 2 Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions of 8 March 2011 – Energy Efficiency Plan 2011 [COM(2011) 109 final – Not published in the Official Journal].
- 3 Piano d’Azione Italiano per l’Efficienza Energetica (2013).
- 4 Energy performance of buildings EU Directive (EPBD2) 2010/21/EU.
- 5 EC (European Commission), www.ec.europa.eu/comm/energy_transport/atlas/html/buildings.html, 2007.
- 6 DOE (U.S. Department of Energy). Building Energy Data Book available from: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/>, 2009.
- 7 P.A. Enkvist, T. Nauc ler e J. Rosander J, *A cost curve for greenhouse gas reduction: a global study of size and cost of measures to reduce greenhouse gas emissions yields important insights for businesses and policy makers*, McKinsey Quarterly: the online journal of McKinsey & Co 1, 2007.
- 8 M.C. Dubois e  . Blomsterberg, *Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review*, Energy and Buildings 43 (2011) 2572–2582.
- 9 EN 15193:2007. Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting.
- 10 D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni e M. Zinzi, *Artificial lighting energy consumption in buildings: a comparison between EN 15193 and an alternative method based on the Dresler diagrams*. International Workshop Visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow, Rome, Italy, 2008.
- 11 M. Zinzi e A. Mangione, *The daylighting contribution in the electric lighting energy uses: EN standard and alternative method comparison*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, Turin
- 12 www.satel-light.com
- 13 F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, D. Iatauro, P. Signoretti, *Costruzione degli anni meteorologici tipici per l’illuminamento naturale (AMNTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilit  di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l’illuminazione artificiale negli edifici*, ENEA, RdS/PAR2014/085

- 14 A. Mangione, F. Spinelli, D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni, M. Zinzi, Impact of Different Luminous Efficacy Models on a Climate Based Method for the Calculation of Lighting Energy Use in Not Residential Buildings, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies – CONECT 2016”, Riga, Lettonia, Ottobre 2016.
- 15 A.J. Drummond, On the measurement of sky radiation, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser.*, **B 7** (3/4), 1956.
- 16 S. Petrarca, E. Cogliani, F. Spinelli (2000), *La radiazione solare globale al suolo in Italia. Anni 1998 e 1999 e media 1994-1999*, ENEA, Roma.
- 17 F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari, 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>
- 18 F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari, M. Milone (2008), *La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare*, in *Energia, Ambiente e Innovazione*, bimestrale ENEA, Roma, gennaio-febbraio 2008.
- 19 European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT),
<http://www.eumetsat.int>.
- 20 *The Meteosat Archive 1978-2000*, EUMETSAT, Darmstadt (Germania), Febbraio 2000, EUM TD 06.
- 21 F. Kasten e A.T. Young (1989), *Revised optical air mass tables and approximation formula*, *Applied Optics* **28**:4735–4738. DOI: 10.1364/AO.28.004735.
- 22 F. Kasten (1993), *Discussion on the relative air mass*, *Light. Res. Tech.* **25**, 129.
- 23 P.J. Lunde (1980), *Solar Thermal Engineering*, Wiley, New York, 1980.
- 24 F. Spinelli, E. G. Cogliani, A. Benedetti e R. Siviero (2016), Definizione di una procedura per la caratterizzazione meteorologica di un sito per la localizzazione di un impianto solare a concentrazione. Applicazione della procedura al sito della Casaccia, ENEA, RdS/PER2015/114.
- 25 *SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare*, sito ENEA per il calcolo e la previsione della radiazione solare , <http://www.solaritaly.enea.it>.