



## Ricerca di Sistema elettrico

Costruzione degli *Anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale (AMTIN)* per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici

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

COSTRUZIONE DEGLI ANNI METEOROLOGICI TIPICI PER L'ILLUMINAMENTO NATURALE (AMTIN) PER IL TERRITORIO NAZIONALE E DELLE CURVE DI DISPONIBILITÀ DI LUCE NATURALE PER LA STIMA DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE NEGLI EDIFICI.

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

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: proposta di revisione della norma EN 15193:2007 "*Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting*" 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.

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano

# Indice

SOMMARIO .....	4
ABSTRACT .....	4
<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>2 RADIAZIONE SOLARE E ILLUMINAMENTO NATURALE. I DATI ENEA.....</b>	<b>7</b>
2.1 LE IMMAGINI SATELLITARI METEOSAT DI COPERTURA NUVOLOSA .....	8
2.2 MODELLI PER LA RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO .....	9
2.3 LE MAPPE DI RADIAZIONE DELL'ENEA .....	12
2.4 ANNO METEOROLOGICO TIPICO PER LA RADIAZIONE .....	15
2.5 SOLARITALY : L'ATLANTE ITALIANO DELLA RADIAZIONE SOLARE .....	16
2.6 ILLUMINAMENTO NATURALE .....	18
2.7 MODELLI PER L'EFFICACIA LUMINOSA (LETTERATURA) .....	20
2.8 MODELLI PER L'EFFICACIA LUMINOSA IMPLEMENTATI IN ENEA .....	25
2.9 ANNI TIPICI PER L'ILLUMINAMENTO NATURALE DELL'ENEA. CONTROLLI E VERIFICHE .....	27
<b>3 LA DISPONIBILITÀ DI LUCE NATURALE PER L'ILLUMINAZIONE DEGLI AMBIENTI .....</b>	<b>32</b>
3.1 IL FATTORE DI LUCE DIURNA ( <i>FLD</i> ) .....	33
3.2 L'IMPIEGO DEL FATTORE DI LUCE DIURNA ( <i>FLD</i> ) PER LA STIMA DELL'ILLUMINAMENTO INTERNO.....	36
3.3 LA DISPONIBILITÀ DI LUCE NATURALE E LE CURVE DI DISPONIBILITÀ ( <i>DRESLER</i> ) STANDARD .....	36
3.4 LA COSTRUZIONE DELLE CURVE DI DISPONIBILITÀ PER $E_{DH}$ E $E_{GH}$ ( <i>DRESLER</i> ) DELL'AMTIN .....	38
3.5 CURVE DI DISPONIBILITÀ ( <i>DRESLER</i> ) "ALBA – TRAMONTO" PER LE LOCALITÀ SELEZIONATE .....	40
3.7 CURVE DI DISPONIBILITÀ ( <i>DRESLER</i> ) "8 – 16" - EDIFICIO SCOLASTICO - PER LE LOCALITÀ SELEZIONATE .....	54
3.8 ISTOGRAMMI DELL'ILLUMINAMENTO DIFFUSO MEDIO MENSILE $E_{DH,OMM}$ "8 – 16" - EDIFICIO SCOLASTICO - PER LE LOCALITÀ SELEZIONATE .....	57
3.9 CONFRONTO DELLE CURVE DI DISPONIBILITÀ PER LE DUE FINESTRE TEMPORALI.....	58
<b>4 CONCLUSIONI .....</b>	<b>59</b>
<b>APPENDICE 1 IRRADIANZA EXTRAATMOSFERICA SU PIANO ORIZZONTALE .....</b>	<b>60</b>
<b>APPENDICE 2 MASSA D'ARIA OTTICA RELATIVA .....</b>	<b>61</b>
<b>APPENDICE 3 TABELLE DEL MODELLO DELL'EFFICACIA LUMINOSA DI PEREZ .....</b>	<b>63</b>
<b>APPENDICE 4 ANNO METEOROLOGICO TIPICO PER L'ILLUMINAMENTO NATURALE (ESEMPIO) .....</b>	<b>64</b>
<b>APPENDICE 5 PARAMETRI (O INDICI) STATISTICI .....</b>	<b>72</b>
<b>APPENDICE 6 ULTERIORI ELABORAZIONI DI DATI DI ILLUMINAMENTO NATURALE .....</b>	<b>77</b>
<b>SIGLE, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>86</b>

## Sommario

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, in questo lavoro, 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 i primi risultati 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. *Anni meteorologici tipici d'illuminamento naturale* (AMTIN) orizzontale globale e diffuso sono stati costruiti per tre località (Milano, Roma, Palermo) a partire dai dati di radiazione solare, elaborati da ENEA, per calcolare i valori d'illuminamento, utilizzando i modelli più rilevanti disponibili in letteratura. I modelli consentono di calcolare i dati d'illuminamento dai dati d'irradianza solare e da altri parametri, dipendenti dal particolare modello adottato. I dati d'illuminamento globale e diffuso sono 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.

“Felix qui potuit rerum cognoscere causas”

VIRGILIO, GEORGICHE, II, 489

## 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 d'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 norma sopra citata 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) che sarà adottata in Europa e nei singoli Stati Membri nei prossimi anni.

In questo quadro s'inserisce la Linea C della Ricerca di Sistema Elettrico “*Implementazione di una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale*” all'interno dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE RSE - Area: *Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica*; Tema di ricerca: *Studio e progettazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico*; Progetto C.2: *Sviluppo di modelli per la realizzazione di*

*interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico.* Obiettivo finale è lo sviluppo di una metodologia che possa superare i limiti del quadro della normativa tecnica ora vigente.

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 dei dati 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 è stato sviluppato nell'ambito di un progetto internazionale ed è basato su un periodo temporale di osservazione limitato.

Il presente rapporto propone e illustra un approccio alternativo allo sviluppo di database illuminotecnici e si basa sull'applicazione di modelli di *efficacia luminosa* che prevedono la conversione dei dati d'irradiazione solare in dati d'illuminamento. Applicando tali modelli alle mappe georeferenziate d'irradiazione solare, sviluppate da dati satellitari, è possibile creare mappe equivalenti d'illuminamento globale e diffuso.

Il rapporto presenta la costruzione di database d'illuminamento, al momento per tre città di riferimento, ottenuto applicando i modelli più autorevoli presenti in letteratura.

I dati sono successivamente elaborati per renderli conformi ad analisi legate alla disponibilità di luce naturale e al servizio di illuminazione artificiale negli edifici, caratterizzandoli a seconda del profilo di utilizzo temporale degli edifici stessi (servizio continuo, solo diurno, residenziale, ufficio, scuola...).

## 2 Radiazione solare e illuminamento naturale. I dati ENEA

La promozione di studi, di applicazioni pratiche e, non ultimo, della stessa attività di normazione in tema di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, e in quelli ad esso correlati, prima fra tutti il comfort visivo, richiede la disponibilità di archivi (banche) di dati d'*illuminamento naturale* adeguati. Per caratterizzare una località occorre in primo luogo che siano disponibili i valori relativi a un intervallo temporale sufficientemente lungo: un anno di dati copre un intero ciclo di variabilità stagionale, ma per effettuare analisi che siano significative dal punto di vista climatico (ossia per il lungo periodo) occorrono serie storiche di diversi anni, cinque o più. In aggiunta, la frequenza di registrazione dei dati dev'essere sufficientemente alta per apprezzare i dettagli della variabilità meteorologica (ossia nel corto periodo): di norma si collezionano dati orari, ma analisi recenti fanno uso di dati acquisiti con frequenza anche più spinta (fino al minuto). In secondo luogo, a causa della fenomenologia dell'illuminamento naturale, è necessario considerare sia il valore *globale* sul piano orizzontale, sia la sua frazione *diffusa*. Infine, se lo scopo è quello di caratterizzare una regione geografica comunque estesa e non singole località, le serie storiche pluriennali dei dati d'illuminamento naturale devono riguardare un numero di siti sufficiente a coprire con uniformità il territorio in istudio.

Di norma, i dati d'illuminamento si ottengono da misurazioni mediante luxmetri. Un luxmetro è costituito essenzialmente da un sensore che raccoglie l'energia della radiazione elettromagnetica incidente e ne filtra la frazione corrispondente al campo *visibile* dello spettro (quello con lunghezze d'onda comprese fra 380 a 780 nanometri<sup>1</sup>). Nei luxmetri che misurano l'illuminamento naturale globale, il sensore riceve la radiazione (elettromagnetica) solare che proviene dall'intero emisfero celeste. Rispetto a questi, luxmetri per l'illuminamento diffuso sono, invece, costruttivamente più impegnativi: devono infatti registrare soltanto la componente di luce diffusa dall'atmosfera verso il suolo, ed escludere la luce diretta del Sole. Ciò si ottiene con l'aggiunta di un dispositivo schermante mobile in grado di arrestare i raggi diretti.

Si comprende facilmente che la realizzazione di una rete di luxmetri per la misurazione dell'illuminamento naturale, in entrambe le forme globale e diffusa (quest'ultima, come si è visto, più impegnativa da ottenersi), da installare all'aperto e capillarmente sull'intero territorio italiano; e la gestione operativa di tale rete (acquisizione dati, manutenzione) per periodi necessariamente prolungati di tempo (almeno quinquennali), sono compiti impegnativi anche sotto l'aspetto economico. Perciò, ai fini della creazione di banche dati d'illuminamento naturale, è di grande utilità la messa a punto di metodi di ottenimento dei dati, alternativi alla misurazione diretta. A questo proposito si può osservare che da diversi decenni sono disponibili per l'Italia numerose banche dati di *radiazione solare*. Queste sono state allestite principalmente per stimare il potenziale radiativo solare del territorio italiano al fine dell'installazione di impianti di potenza che sfruttino tale fonte energetica. D'altro canto, irraggiamento e illuminamento sono grandezze strettamente correlate: la seconda è sostanzialmente una frazione spettrale della prima, modulata in base alla curva di risposta dell'occhio umano; è comprensibile pertanto che tale correlazione sia stata attivamente studiata e la letteratura ne riporti numerose formulazioni ottenute in differenti situazioni meteoro-

---

<sup>1</sup>Come definito nella norma tecnica europea e italiana UNI EN 410 – 2011 - Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing. Da notare che norme fanno riferimento a lunghezze d'onda differenti per lo spettro visibile.

logiche. In definitiva, utilizzando le banche dati di radiazione solare disponibili e applicando le correlazioni attestate in letteratura fra radiazione solare e illuminamento naturale, si ottengono le banche dati d'illuminamento naturale richieste per gli scopi enunciati in precedenza. In questo capitolo verranno mostrate le caratteristiche della banca dati della radiazione solare allestita dall'ENEA nel corso degli anni passati, descritte le modalità con cui è stata ottenuta e, infine, presentati le formulazioni e gli algoritmi a cui si è fatto ricorso per convertire i dati di radiazione solare in quelli d'illuminamento naturale.

## 2.1 Le immagini satellitari METEOSAT di copertura nuvolosa

In ENEA l'attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione solare è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso e prosegue tuttora. Uno dei metodi di ottenimento dei dati procede dall'elaborazione delle immagini satellitari di copertura nuvolosa [13,14,15,16,17]. Tali immagini sono acquisite dall'*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) [18], nell'intervallo 500 ÷ 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  $1 \times 1.5 \text{ km}^2$  per pixel (HRV, *High Resolution Visible*) [19]. 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÷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 estrarne i dati virtualmente per qualunque località della superficie terrestre rappresentata.

Le immagini satellitari di *copertura nuvolosa* mostrano la superficie del pianeta così come viene vista dal satellite al momento della loro "cattura" e dunque forniscono una misura del coefficiente di riflessione (*albedo*) della superficie riflettente, che può essere uno strato di nubi, in caso di cielo coperto, oppure direttamente il suolo terrestre quando sussistono condizioni di cielo sereno. Poiché in assenza di nubi (ossia per condizioni di *cielo sereno*) il comportamento dell'atmosfera ai fini dell'attenuazione dei raggi solari che l'attraversano è ben caratterizzato, la variabilità della radiazione che giunge al suolo – una volta che si è tenuto in debito conto della posizione relativa fra Sole e Terra nei diversi periodi dell'anno e nei diversi momenti del giorno – è attribuibile in prima approssimazione alla minore o maggiore quantità di nubi presenti a causa delle condizioni meteorologiche del momento. Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera, consentono di stimare il dato di radiazione a partire da un opportuno *indice di copertura nuvolosa* che si ottiene confrontando l'immagine 'attuale' del pianeta visto dal satellite, con una sua rappresentazione riferita a condizioni di cielo sereno. L'indice così calcolato varierà fra zero (cielo sereno in assenza di nubi) e uno (cielo completamente coperto di nubi). Nella figura 1 sono mostrate due di tali immagini: quella di sinistra è stata registrata dal satellite meteorologico in una giornata particolarmente nuvolosa e la regione italiana si intravede parzialmente sotto la coltre delle nubi, mentre l'altra si riferisce allo stesso periodo temporale e corrisponde alla situazione priva di nubi.

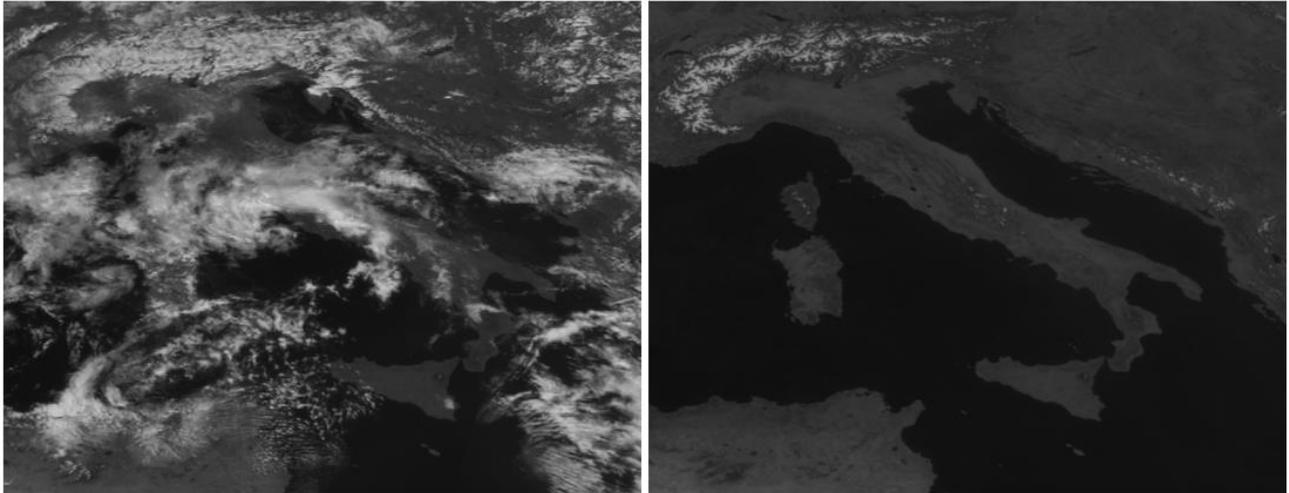


Figura 1. Immagine satellitare di copertura nuvolosa e mappa dell'albedo del suolo.

## 2.2 Modelli per la radiazione solare al suolo

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

$$I = I_b + I_d = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_d \quad (1)$$

in cui:

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

$I_b$  è l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale;

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

$I_d$  è l'irradianza solare diffusa sul piano orizzontale;

$\vartheta_z$  è l'angolo zenitale, ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale.

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

$$I = K_T \cdot I_0 \quad (2)$$

in cui:

$I_0$  è l'irradianza extraatmosferica su piano orizzontale (EHI). Si veda l'appendice 1 per una sua espressione analitica;

$K_T$  è il *coefficiente di trasmissione globale* dei raggi solari attraverso l'atmosfera (*clearness index*). Nella modellistica adottata in ENEA, questo viene scritto nella forma:

$$K_T = K_{Tc} K_c = B \cos^\alpha \vartheta_z \cdot e^{-Pi - Ai^2} \quad (3)$$

dove:

$K_{Tc} = B \cos^\alpha \vartheta_z$  è il coefficiente di trasmissione (globale) in condizione di cielo sereno (*clear-sky transmittance*). Nell'espressione precedente,  $\alpha$  è un parametro sperimentale che determina la "forma" tramite il termine  $\cos^\alpha \vartheta_z$  della curva di attenuazione dell'irradianza globale nell'arco della giornata per condizioni di cielo sereno e di norma vale 0.15, mentre il parametro  $B$  ne modula il valore massimo (figura 2);

$K_c = e^{-Pi - Ai^2}$  è il fattore che tiene conto dell'attenuazione dovuta alla presenza delle nubi (*indice di cielo sereno, clear-sky index*). Nella formula,  $i$  è l'indice di copertura nuvolosa ricavato dalle immagini satellitari.

I valori dei parametri  $B$ ,  $P$  e  $A$  introdotti nel modello dell'equazione 4 vengono stimati per regressione statistica con misure effettuate al suolo in località opportunamente distribuite dal punto di vista geografico. In particolare, il primo è un parametro statistico che caratterizza il cielo in assenza di nubi ("cielo sereno") e pertanto dipende soltanto dal carico di aerosol e di vapore acqueo presenti nell'atmosfera; è dunque una misura del grado di "torbidità dell'atmosfera serena" e di conseguenza varia da luogo a luogo e in funzione delle stagioni. Nell'algoritmo implementato in ENEA, esso si fa dipendere dalla posizione geografica e dal mese; il risultato è la redazione di dodici mappe mensili dalle quali estrarre i valori in corrispondenza della località e del mese pertinenti, valori da utilizzare per la stima della GHI.

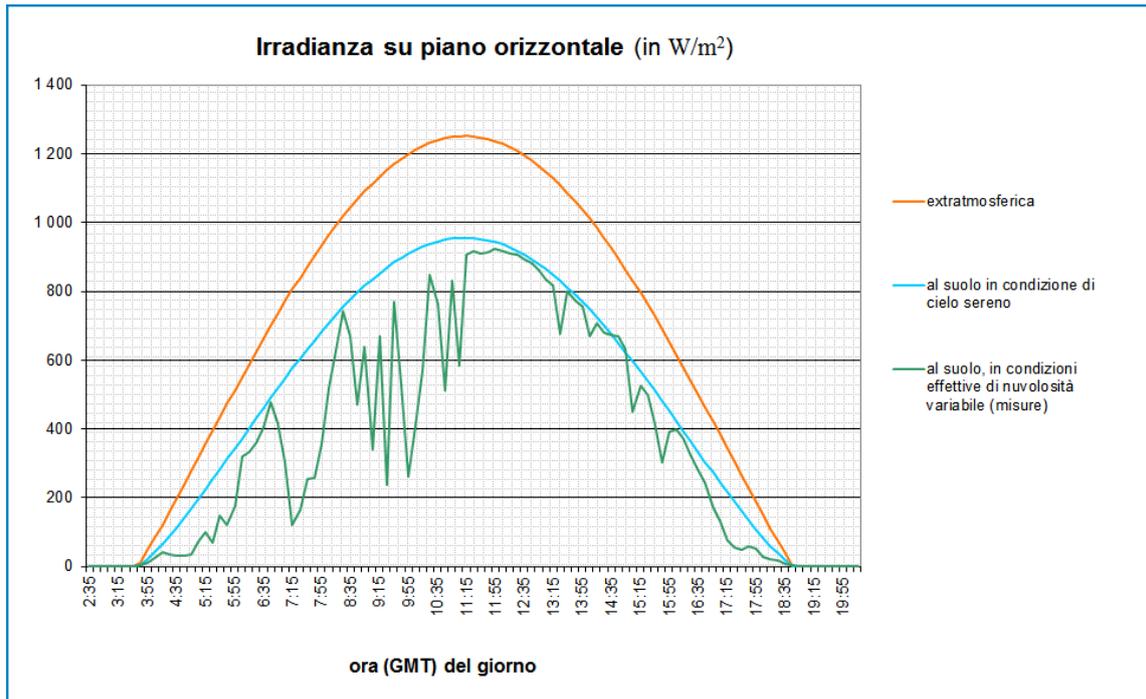


Figura 2. Irradianza globale su piano orizzontale, nell’arco della giornata.

La caratterizzazione del fenomeno radiativo al suolo viene completato con la stima delle irradianze diretta e diffusa ma, grazie alla relazione (1), è sufficiente stimare una sola delle due perché l’altra si ottiene per differenza dall’irradianza globale. Comunque, i modelli implementati in ENEA permettono la stima indipendente di entrambi; per il calcolo immediato dell’irradianza diffusa orizzontale si ricorre alla formula:

$$I_d = k \cdot I \quad (4)$$

dove il fattore  $k$  ha significato di frazione della radiazione diffusa (sul piano orizzontale) ed è calcolato mediante la correlazione di Boland & Ridley [20]:

$$k = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta \cdot K_T}} \quad (5)$$

in cui  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri riportati in letteratura (Boland e Ridley stessi propongono rispettivamente  $-5$  e  $8.6$  per i siti europei) o stimabili per regressione lineare da misure di globale e diffusa<sup>2</sup>. Note le irradianze globale e diffusa, quella diretta su piano orizzontale si ricava, come si è detto, per differenza:

$$I_b = I - I_d = I - k \cdot I = I(1 - k) \quad (6)$$

mentre quella diretta sul piano normale (DNI) con la formula (di definizione):

<sup>2</sup> In letteratura è nota, tra le altre, anche la relazione di Erbs [21], qui usata invece per controllo e validazione dei valori ottenuti.

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos \vartheta_z} \quad (7)$$

Va detto che in tutte le definizioni precedenti le irradianze si intendono riferite a un dato istante, ma è immediato estendere il loro significato a intervalli di tempo finiti, ad esempio *orari*; in questo caso, però, trattandosi ancora di potenze (incidenti) per unità di superficie, vanno interpretate come valori medi nell'intervallo e riferite all'istante centrale di questo. Per intervalli finiti – siano essi orari, giornalieri, mensili o annui – è anche possibile derivare un'altra grandezza pertinente, ossia l'energia incidente per unità di area e per l'intero intervallo temporale considerato. Questa grandezza prende il nome d'*irradiazione* (*oraria, giornaliera ecc.*) e si ottiene dall'irradianza per integrazione:

$$H = \int_{\Delta t} I dt \quad (8)$$

in cui:

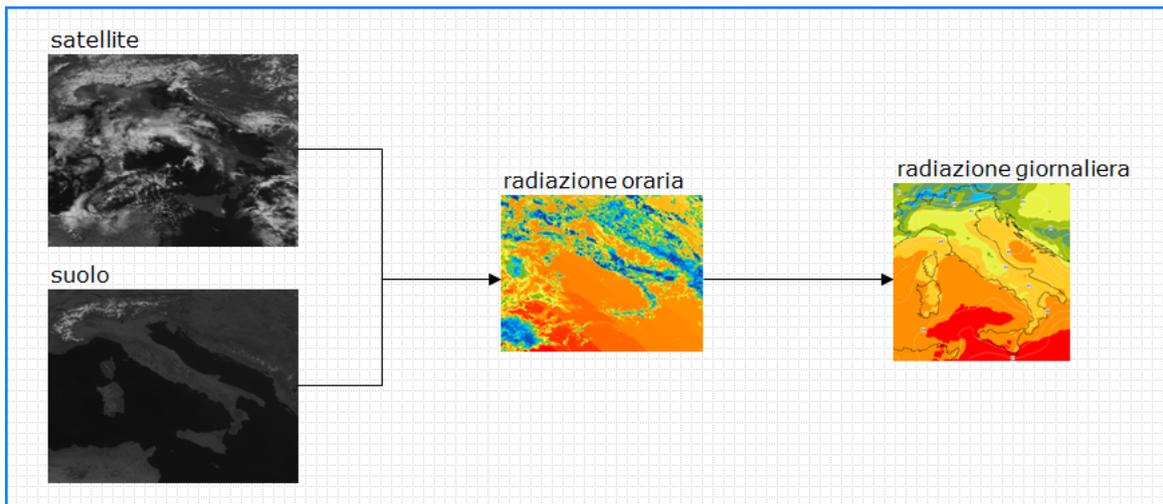
*I* è l'irradianza coinvolta (globale, diffusa, extraatmosferica ecc.);

*H* è la corrispondente *irradiazione* risultante nel tempo  $\Delta t$ ; essendo per definizione un'energia per unità di superficie, si misura in (unità SI) joule al metro quadro,  $J/m^2$ , o in qualsiasi altra unità dimensionalmente equivalente; in ambito tecnico, è diffuso il kilowattora al metro quadro,  $kWh/m^2$ , che vale:

$$1kWh/m^2 = 3600J/m^2 \quad (9)$$

### 2.3 Le mappe di radiazione dell'ENEA

Come si è detto in precedenza, le immagini satellitari di copertura nuvolosa costituiscono il dato di partenza di tutto il sistema di stima della radiazione solare. Grazie ai modelli descritti in precedenza, i valori (pixel) registrati nelle immagini vengono dapprima trasformati in dati di un opportuno indice di copertura nuvolosa e successivamente convertiti nei dati d'irradianza. Il risultato del calcolo è rappresentato da nuove mappe d'irradianza (in  $Wm^{-2}$ ) *globale e diffusa orizzontali e diretta normale*: tali mappe sono per frequenza temporale e risoluzione spaziale, uguali alle immagini METEOSAT di partenza. A partire dall'irradianza per ogni quarto d'ora si ricavano le mappe d'irradianza *media oraria* (in  $Wm^{-2}$ ) e le mappe d'irradiazione (in  $kWhm^{-2}$  o in  $MJm^{-2}$ ) *giornaliera, giornaliera media mensile* e infine *annua* (figura 3).



**Figura 3. Schema di calcolo delle mappe di radiazione solare a partire dalle immagini di copertura nuvolosa.**

Trattandosi di stime ottenute con un metodo differente dalla misurazione effettiva (è impensabile installare centraline di acquisizione al suolo per migliaia di località da far funzionare per un considerevole numero di anni), i valori calcolati non necessariamente coincidono con quelli che effettivamente verrebbero misurati a terra. Rispetto alle misure a terra usate per confronto, le stime mostrano scarti fino al 4-8% sul dato giornaliero medio mensile della radiazione globale su piano orizzontale: è un ottimo risultato se si tiene conto del metodo usato e del fatto che, come contropartita, si dispone automaticamente della stima puntuale di radiazione per qualunque località italiana (e non solo per pochi siti). Ovviamente scarti più grandi sono possibili per i dati giornalieri (fino al 10%) e per i dati orari (fino 20%).

Un esempio di mappa finale è riportata in figure 4. La mappa rappresenta la media pluriennale 2006-2012 dell'irradiazione globale annua su piano orizzontale in Italia. Nell'immagine, i colori della tavolozza esprimono l'intensità e sono scelti in modo che quelli *freddi* (violetto cupo, blu, celeste e così via) corrispondano ai valori bassi d'irradiazione, mentre quelli *caldi* (giallo, arancione e rosso) ai valori alti, passando attraverso le tonalità di verde per i valori intermedi.

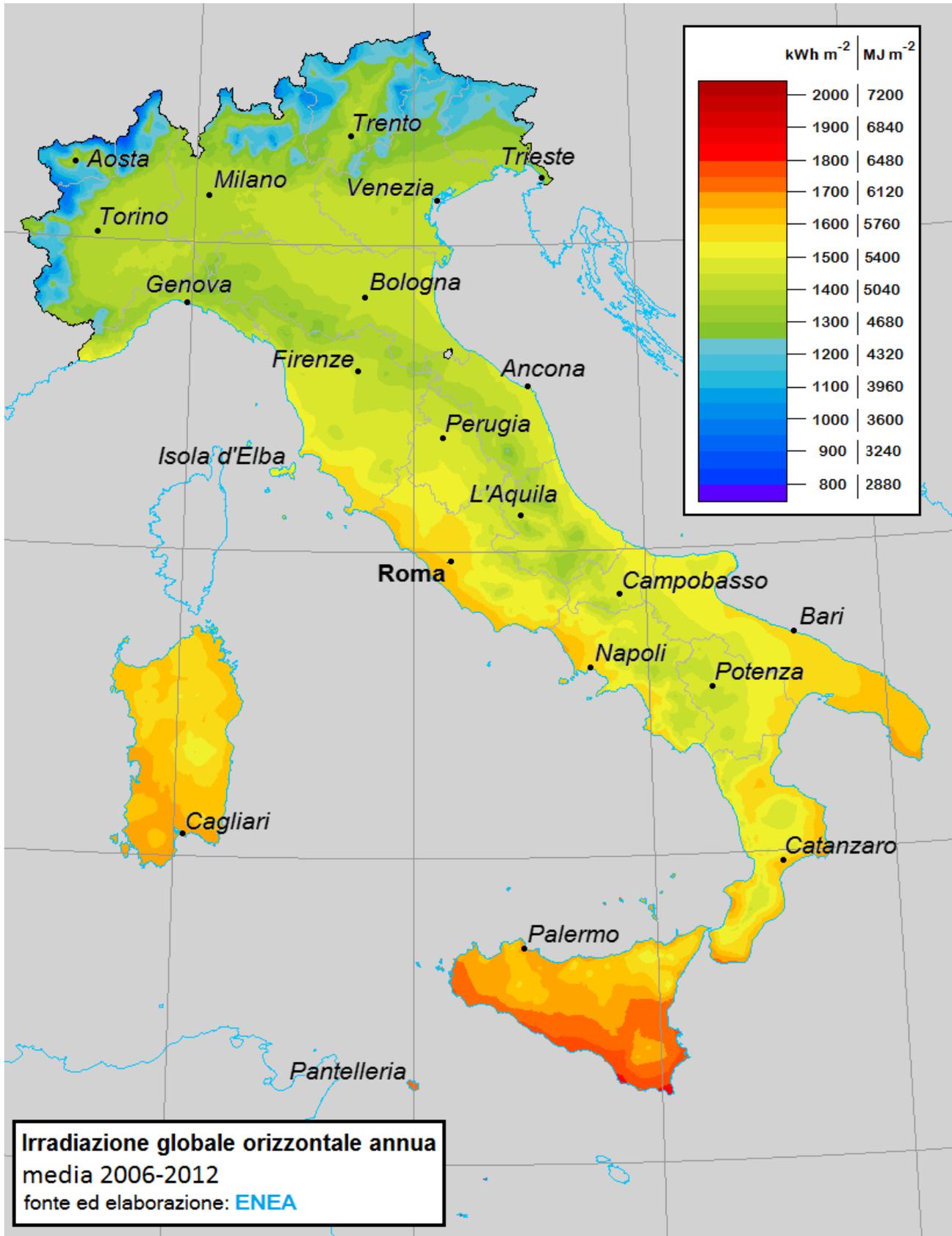
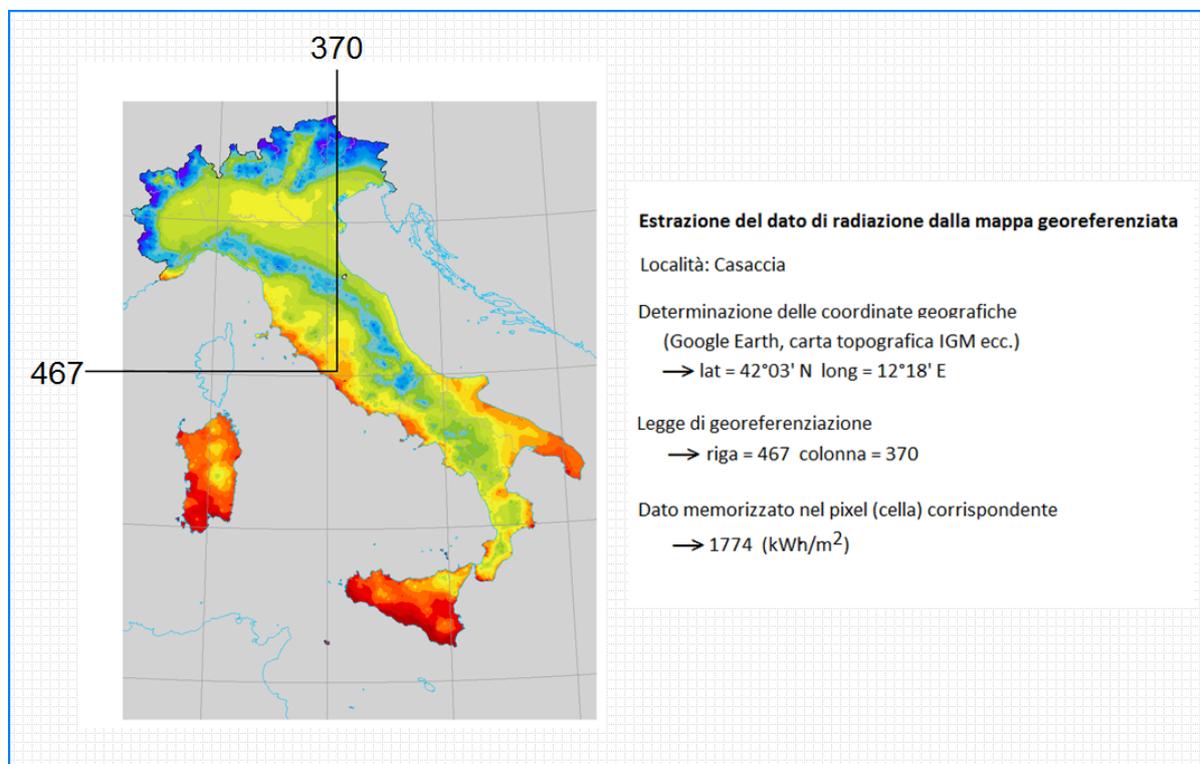


Figura 4. Mappa dell'irradiazione globale annua in Italia su piano orizzontale, media 2006-2012.

Poiché tutte le mappe sono georeferenziate, è possibile estrarre da esse i valori d'irradianza o irradiazione in corrispondenza di **qualunque località della regione italiana** – di cui siano assegnate le corrispondenti coordinate geografiche – e costruire per essa serie storiche pluriennali (figura 5).



**Figura 5. Estrazione dei valori di radiazione dalle mappe georeferenziate.**

## 2.4 Anno meteorologico tipico per la radiazione

Attualmente, le mappe di radiazione coprono l'intervallo di anni dal 2006 al 2014 e con regolarità vengono elaborati i mesi più recenti affinché la banca dati rimanga sempre aggiornata. Con la serie pluriennale già disponibile – al momento, sono nove anni per intero – è possibile effettuare stime della radiazione solare sufficientemente affidabili per il lungo termine, ma per applicazioni particolari è richiesta la collezione completa di un solo anno di dati che sia rappresentativa dell'intera serie pluriennale. Questa esigenza ricorre, ad esempio, nell'input delle simulazioni per la progettazione degli impianti (solari, fotovoltaici ecc.), per la stima dei fabbisogni energetici degli edifici, e per lo studio del comportamento dell'ambiente sottoposto a sollecitazioni antropiche (diffusione d'inquinanti ecc.) e/o naturali. *L'anno meteorologico tipico* (AMT; per gli americani: *Typical Meteorological Year*, TMY; per gli europei: *Test Reference Year*, TRY) risponde a questa esigenza. Si tratta di una collezione di 8760 (= 365 x 24) dati orari della grandezza meteo-climatica d'interesse (temperatura dell'aria, radiazione solare ecc.), estratta dalla serie pluriennale disponibile, e scegliendo, per ciascuno dei dodici mesi, l'intero mese di dati dell'anno fra quelli presenti nella serie che più si avvicina alla media pluriennale. Il "grado di vicinanza" è stabilito sulla base di appropriati criteri statistici

(vedi poco oltre). L'anno tipico sarà costituito giustappoendo in sequenza i dati dei dodici mesi così scelti. In tal modo:

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

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

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

Gli AMT ENEA riferiti alla la radiazione solare, sono redatti con i dati della sola radiazione solare (globale e diffusa orizzontali e diretta normale); a questi si aggiungono, con il presente lavoro, i valori orari degli illuminamenti globale e diffuso orizzontali e diretto normale. La scelta dei mesi incorporati nell'anno tipico è "pilotata" dall'irradianza globale orizzontale.

## 2.5 Solaritaly : l'Atlante italiano della radiazione solare

I risultati della complessa mappatura della regione italiana sotto il profilo radiativo solare, sono dall'ENEA pubblicati anche in rete attraverso il sito *Solaritaly - Atlante italiano della radiazione solare* [13] (figura 6) e l'altro meno recente del *Profilo climatico dell'Italia* [14]. Il materiale pubblicato consta di mappe, tabelle di valori giornalieri medi mensili e strumenti di calcolo on-line. I dati tuttora fruibili si riferiscono a un periodo non molto recente sebbene statisticamente significativo (dal 1994 al 1999) ma è previsto a breve l'aggiornamento con i risultati relativi alle elaborazioni degli ultimi anni (dal 2006 al 2014).



www.solaritaly.enea.it

**Atlante italiano della radiazione solare**

Home Chi siamo Archivio Calcoli Previsioni Prodotti Contatto

Sito dell'Atlante italiano della radiazione solare

### Contenuto

- Pubblicazione di **dati** di radiazione solare al suolo globale e diretta, in forma di mappe del territorio italiano e di misure per singole località
- Servizio di **previsione** della radiazione incidente al suolo (per alcuni siti)
- Programmi di **calcolo** (diagrammi solari, stima della radiazione etc.)
- **Documentazione**
- **Prodotti** e servizi concernenti la radiazione solare e cedibili su richiesta

Mappe di irraggiamento solare

Impianto fotovoltaico "Delphos" - ENEA

Impianto a collettori parabolici lineari "PCS" - ENEA

© 2006-2013 ENEA Fonti Rinnovabili [Informazioni sul sito](#) [Aggiornamenti](#) N° visitatori dal 21-Set-2006 : 568799

Figura 6. Pagina iniziale del sito Solaritaly – Atlante italiano della radiazione solare.

Una sezione portante del sito dell'Atlante è quella deputata ai *Calcoli*. Essa consiste essenzialmente in uno strumento di calcolo on-line dell'irradiazione solare giornaliera media mensile – e dunque anche annua – per qualsivoglia località italiana e configurazione della superficie ricevente (quale può essere quella captante degli impianti energetici che sfruttano la fonte solare). I dati di partenza sono costituiti dalle mappe d'irradiazione su piano orizzontale redatte dall'ENEA e il sistema d'interrogazione prima estrae i valori in corrispondenza delle coordinate geografiche e poi li riporta sulla giacitura inclinata. Località geografica e orientazione della superficie sono scelte dall'utente.

Un'ultima possibilità offerta dalla procedura on-line riguarda l'eventuale presenza di ostacoli che per alcune ore del giorno possano schermare i raggi solari diretti sulla superficie ricevente (a causa di un'orografia particolare del terreno: colline ecc., o per la presenza di manufatti come edifici vicini ecc.). In questo caso occorre indicare l'intervallo – più corto di quello diurno – in cui i raggi solari diretti investono effettivamente la superficie, affinché la procedura ne tenga debito conto. In figura 7 è mostrato un esempio, relativo alla località di Roma, per la quale il sito dell'Atlante è stato interrogato per fornire l'irradiazione globale giornaliera media mensile in tre situazioni differenti: superficie captante orizzontale, parete verticale esposta a Sud (con coefficiente di riflessione molto alto), infine la medesima parete con presenza di ostacoli che – limitatamente ai mesi di aprile, maggio, luglio e ottobre – intercettano i raggi diretti. Si può constatare che

nei mesi invernali, alle nostre latitudini, una superficie verticale esposta a Sud è investita da una quantità di radiazione solare maggiore rispetto a un'altra disposta orizzontalmente; il contrario avviene nei mesi estivi. Con il programma è possibile studiare tutte le situazioni intermedie e ricavare indicazioni sull'orientazione ottimale delle superfici captanti degli impianti solari o degli edifici da climatizzare.

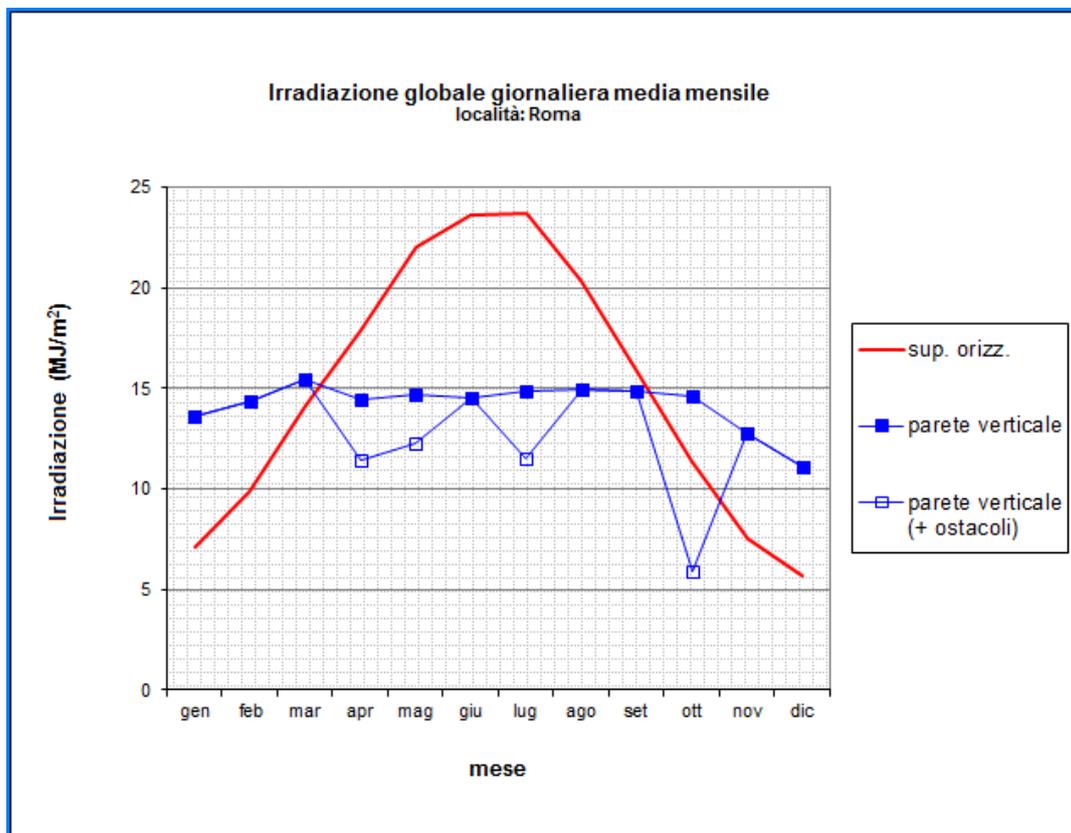


Figura 7. Sito Solaritaly, sezione Calcoli: risultati di un'interrogazione.

## 2.6 Illuminamento naturale

Come si è detto prima, la disponibilità di serie storiche pluriennali e sintetiche (anni tipici) d'illuminamento naturale è condizione indispensabile per valutare il fabbisogno di energia per l'illuminamento degli edifici, che tenga anche conto dell'apporto della componente naturale. Sappiamo però che le grandezze fotometriche (flusso luminoso, illuminamento ecc.) e quelle radiometriche (flusso radiante, irradianza ecc.) sono strettamente correlate, per cui è teoricamente possibile ricavare le prime dalle seconde.

Le grandezze radiometriche misurano l'energia e/o la potenza associata alle radiazioni elettromagnetiche, mentre le grandezze fotometriche traducono la stessa energia e/o potenza in termini di luminosità legata alla capacità fisiologica della visione umana. Più rigorosamente, indicata con  $G_e$  una qualunque grandezza

radiometrica e con  $G_v$ , la corrispondente grandezza fotometrica, esse sono legate dalla seguente definizione:

$$G_v = F \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) G_e(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

dove:

$G_e(\lambda)$  è la grandezza radiometrica *spettrale*<sup>3</sup>, funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$ . L'aspetto funzionale di  $G_e(\lambda)$  dipende ovviamente dal tipo e stato della sorgente che ha emesso la radiazione elettromagnetica e dalle vicissitudini che questa ha subito (assorbimento e/o scattering selettivi) nel mezzo materiale attraversato;

$V(\lambda)$  è la curva di sensibilità dell'occhio umano, normalizzata a uno. Si tratta della curva *fotopica*: è noto che l'occhio umano possiede due tipi di fotorecettori, i coni e i bastoncelli, e la curva fotopica si riferisce ai primi, attivi in condizioni di luminosità normale (permettono di apprezzare i colori). Invece in condizioni di scarsa luminosità la visione umana è affidata soprattutto ai bastoncelli, che sono molto più sensibili – permettono di apprezzare soprattutto le differenze di brillantezza al posto del colore, e dunque le forme e i movimenti – e ai quali è associata una diversa curva di sensibilità, detta *scotopica*  $V_{scot}(\lambda)$ .

$F$  è il fattore (costante) della conversione i tue tipi di grandezze. Vale:  $F = 683 \text{ lm W}^{-1}$ . Nel caso della visione scotopica è invece:  $F_{scot} = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ ;

$\lambda_1, \lambda_2$  sono le lunghezze d'onda degli estremi dell'intervallo visibile dello spettro elettromagnetico.

$$\text{Valgono: } \begin{cases} \lambda_1 = 380 \text{ nm} \\ \lambda_2 = 780 \text{ nm} \end{cases}$$

Il simbolo *lm* sta per *lumen*, unità di misura SI per il flusso luminoso. L'illuminamento, definito come flusso luminoso per unità di area, viene misurato in  $\text{lm m}^{-2}$ , a cui corrisponde il nome di *lux* (simbolo *lx*).

In questo lavoro le grandezze fotometriche studiate sono tre, ossia gli illuminamenti naturali: globale orizzontale, diffuso orizzontale e diretto normale. Le rispettive definizioni sono:

<sup>3</sup> Il legame fra una grandezza  $G$  – radiometrica o fotometrica – e la corrispondente grandezza spettrale  $G(\lambda)$  è

$$\text{ovviamente: } G = \int_0^{+\infty} G(\lambda) d\lambda$$

$$E = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) I(\lambda) d\lambda$$

$$E_d = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) I_d(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$$E_{bn} = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) I_{bn}(\lambda) d\lambda$$

Nelle formule precedenti, le espressioni  $I(\lambda)$ ,  $I_d(\lambda)$  e  $I_{bn}(\lambda)$  stanno per le irradianze solari spettrali, rispettivamente: globale orizzontale, diffusa orizzontale e diretta normale. Il set delle grandezze utili per caratterizzare gli illuminamenti naturali viene infine completato introducendo le seguenti tre quantità, dette *efficacie luminose* (EL) e riferite rispettivamente alle modalità globale orizzontale, diffusa orizzontale e diretta normale:

$$\eta_{gh} = \frac{E}{I} = \frac{683 \int_{380}^{780} V(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_0^{+\infty} I(\lambda) d\lambda}$$

$$\eta_{dh} = \frac{E_d}{I_d} = \dots \quad (12)$$

$$\eta_{bn} = \frac{E_{bn}}{I_{bn}} = \dots$$

## 2.7 Modelli per l'efficacia luminosa (letteratura)

Ovviamente, non è affatto pratico utilizzare le definizioni precedenti per ricavare gli illuminamenti naturali dalle irradianze solari. Scrivere le espressioni funzionali delle irradianze spettrali  $I(\lambda)$ ,  $I_d(\lambda)$  e  $I_{bn}(\lambda)$  che occorrono nelle (12) è impresa improba: occorrerebbe conoscere la composizione chimica dell'atmosfera in dettaglio, la distribuzione spaziale delle sostanze presenti e tutte le proprietà fisiche e chimiche di queste sotto l'aspetto dell'interazione con la radiazione elettromagnetica. In verità, diversi autori hanno sviluppato modelli *fisici* con diverso grado di approssimazione, essenzialmente limitati a condizioni di cielo sereno, ma il numero di dati d'input necessari resta comunque grande e questo rende tali modelli difficilmente utilizzabili per il calcolo sistematico di serie storiche estese. In presenza di nubi, poi, essi sono del tutto inapplicabili.

Per poter procedere comunque all'allestimento di serie temporali degli illuminamenti sufficientemente estese e rappresentative per gli scopi applicativi, si ovvia alle difficoltà appena ricordate ricorrendo a modelli di altra natura, che possiamo chiamare *empirici* (o *parametrici*: dipende dall'aspetto che si vuol mettere in risalto). In questi modelli:

- a) si ipotizza una forma funzionale della dipendenza delle efficacie luminose  $\eta_{gh}$ ,  $\eta_{dh}$  e  $\eta_{bn}$  da alcune quantità che descrivono lo stato "corrente" del cielo e la posizione del Sole: angolo zenitale  $\vartheta_z$ , coefficiente di trasmissione globale  $K_T$ , frazione della diffusa rispetto alla globale  $k$  e altri indici di "chiarezza" e/o "brillanza" variamente definiti;
- b) si introduce un certo numero di parametri, i quali vengono stimati per regressione statistica confrontando le misure sperimentali con le previsioni dei modelli.

La letteratura offre moltissimi modelli validi per qualunque situazione meteo, oppure per condizioni di cielo particolari: sereno (*clear sky*), parzialmente coperto, coperto (*overcast*). Qui di seguito sono presentati alcuni di essi, selezionati sia in base alla facilità con cui possono essere implementati in programmi di calcolo, sia in base alla "esemplarità" rispetto al tipo e quantità di parametri prescelti per la correlazione. Poiché lo scopo del lavoro consiste nella costruzione di una banca dati che caratterizzi compiutamente l'illuminamento naturale delle località, sono stati comunque esclusi dallo studio i modelli incompleti, ad esempio quelli che non prendono in considerazione tutti e tre i tipi d'illuminamento (globale, diffuso e diretto), e quelli riferentisi a orientazioni particolari (ad esempio le superfici verticali orientate a Sud, e così via)

**1) modello di Cucumo, De Rosa, Ferraro, Kaliaktos e Marinelli, 2004.** Il modello è descritto in [22] e si basa sui valori di irradianze e illuminamenti misurati nella località di Arcavacata di Rende (CS). La correlazione è la più semplice possibile e ipotizza una proporzionalità diretta fra illuminamenti e rispettive irradianze. Precisamente:

$$\begin{cases} \eta_{gh} = \frac{E}{I} = 109.54 \frac{lm}{W} \\ \eta_{dh} = \frac{E_d}{I_d} = 112.84 \frac{lm}{W} \\ \eta_{bn} = \frac{E_{bn}}{I_{bn}} = 106.06 \frac{lm}{W} \end{cases} \quad (13)$$

Si noti per inciso che, indipendentemente da qualunque modello, è:

$$\eta_{bn} = \eta_{bh} \quad (14)$$

in quanto:  $\eta_{bn} = \frac{E_{bn}}{I_{bn}} = \frac{E_b / \cos \vartheta_z}{I_b / \cos \vartheta_z} = \frac{E_b}{I_b} = \eta_{bh}$ .

Va detto anche che le EL non potrebbero darsi a priori tutte e tre, essendo legate con un quarto parametro, ossia la frazione dell'irradianza diffusa. Tale legame è il seguente:

$$\eta_{gh} = \eta_{bn}(1-k) + \eta_{dh}k \quad (15)$$

che si ricava agevolmente ricordando le stesse definizioni delle tre efficacie:

$$\eta_{gh} = \frac{E}{I} = \frac{E_b + E_d}{I} = \frac{E_b}{I} + \frac{E_d}{I} = \frac{E_b}{I_b} \cdot \frac{I_b}{I} + \frac{E_d}{I_d} \cdot \frac{I_d}{I} = \frac{E_{bn}}{I_{bn}} \cdot \frac{I_b}{I} + \frac{E_d}{I_d} \cdot \frac{I_d}{I} = \eta_{bn}(1-k) + \eta_{dh}k$$

Ponendo allora nella (15) i valori proposti dalle (13), otteniamo un valore fisso  $k \approx 0.51$  sebbene la frazione diffusa  $k$  possa variare in ogni momento in funzione delle condizioni meteo. Pertanto il valore ottenuto di  $k$  è da intendersi rappresentativo delle condizioni medie a Arcavacata di Rende; se  $k$  è noto indipendentemente, allora due dei tre valori proposti in (13) sono sufficienti, potendo il terzo ricavarsi dalla (15).

Per completezza, va ricordato che gli Autori hanno sviluppato anche modelli di EL più articolati, che dipendono dall'angolo zenitale e con riguardo a differenti orientazioni della superficie captante (essenzialmente per pareti verticali orientati verso i quattro punti cardinali).

**2) modello di Muneer e Kinghorn, 1998.** T. Muneer e D. Kinghorn [23] hanno proposto il loro modello basandosi sui dati di cinque località del Regno Unito, ricavati negli anni Novanta del secolo scorso. E' un modello relativamente semplice in quanto non tiene conto della posizione "attuale" del Sole e si ipotizza che le efficacie luminose possano scriversi come sviluppi polinomiali del solo coefficiente di trasmissione globale  $K_T$ . I coefficienti polinomiali sono ovviamente ricavati per regressione statistica. Gli Autori hanno pubblicato le formule per i soli illuminamenti globale e diffuso, che sono:

$$\begin{cases} \eta_{gh} = (136 - 74.541 \cdot K_T + 57.3421 \cdot K_T^2) \frac{lm}{W} \\ \eta_{dh} = (130.2 - 39.828 \cdot K_T + 49.979 \cdot K_T^2) \frac{lm}{W} \end{cases} \quad (16)$$

ma, come visto prima, l'efficacia per l'illuminamento diretto può calcolarsi agevolmente a partire dalle due precedenti; basta infatti invertire l'uguaglianza (15):

$$\eta_{bn} = \frac{\eta_{gh} - \eta_{dh}k}{1-k} \quad (17)$$

**3) modello di Perez, Ineichen, Seals, Michalsky e Stewart, 1990.** R.R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky e R. Stewart hanno presentato [24] nel 1990 un modello completo per ricavare gli illuminamenti (naturali) globale e diffuso orizzontali e diretto normale, a partire da quattro quantità d'input: le tre irradiazioni (solari) globale orizzontale e diffusa orizzontali e diretta normale, con l'aggiunta del contenuto di acqua precipitabile in atmosfera (*atmospheric precipitable water*). Il modello di Perez & al. è descritto qui di

seguito. L'intero lavoro si basa sui dati ricavati in dieci siti americani e tre europei, per un periodo variabile da pochi mesi a tre anni.

Le tre irradianze sopra elencate non entrano direttamente nelle espressioni, ma sono combinate, insieme all'irradianza extraatmosferica, in opportuni indici che descrivono i gradi di copertura e di brillantezza del cielo. Per ultimo, il modello tiene conto anche della posizione del Sole attraverso l'angolo zenitale.

Gli indici sono:

– *indice di serenità di Perez (sky's clearness index)*:

$$\varepsilon' = \frac{\left(1 + \frac{I_{bn}}{I_d}\right) + k \vartheta_z^3}{1 + k \vartheta_z^3} \quad (18)$$

dove:

$I_{bn}$ ,  $I_d$  sono rispettivamente le irradianze diretta normale e diffusa orizzontale;

$\vartheta_z$  è l'angolo zenitale;

$k$  è una costante e vale:  $k = 1.041/rad^3$  o anche  $k = 5.535 \cdot 10^{-6}$  se l'angolo zenitale è espresso in gradi sessadecimali (°).

I valori dell'indice di serenità sono stati discretizzati da Perez in 8 intervalli (vedi appendice 3). Il primo di essi, corrispondente a  $1 \leq \varepsilon' < 1.23$ , identifica le condizioni di cielo completamente coperto (*overcast*), mentre l'ottavo, con  $\varepsilon' \geq 6.2$ , quelle di cielo terso o sereno (*clear*). Le situazioni intermedie di copertura nuvolosa corrispondono infine alle classi etichettate da 2 a 7.

– *indice di brillantezza di Perez (sky's brightness index)*:

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{0n}} \quad (19)$$

dove:

$I_d$ ,  $I_{0n}$  sono rispettivamente le irradianze diffusa orizzontale ed extraatmosferica normale;

$m$  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 2); 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.

Introdotti i due indici  $\varepsilon'$  e  $\Delta$ , le EL si calcolano mediante le espressioni seguenti:

$$\begin{cases} \eta_{gh} = (a_{g,i} + b_{g,i}W + c_{g,i} \cos \vartheta_z + d_{g,i} \ln \Delta) \frac{lm}{W} \\ \eta_{dh} = (a_{d,i} + b_{d,i}W + c_{d,i} \cos \vartheta_z + d_{d,i} \ln \Delta) \frac{lm}{W} \\ \eta_{bn} = \left( |a_{b,i} + b_{b,i}W + c_{g,i} e^{5.73\vartheta_z - 5} + d_{b,i} \ln \Delta|_+ \right) \frac{lm}{W} \end{cases} \quad (20)$$

dove:

$a_{\bullet,i}$ ,  $b_{\bullet,i}$ ,  $c_{\bullet,i}$  e  $d_{\bullet,i}$  sono coefficienti che Perez e collaboratori hanno tabellato per ciascuna efficacia  $\eta$  e ogni intervallo  $i$ -esimo dell'indice  $\varepsilon'$  discretizzato (vedi sempre appendice 3);

$W$  è il contenuto di vapore acqueo, reso in termini di altezza dell'acqua precipitabile ed espresso in  $cm$ ;

Nella terza delle uguaglianze precedenti, l'angolo zenitale che occorre nell'argomento della funzione esponenziale va espresso in radianti; inoltre il simbolo  $|...|_+$  significa che se il risultato numerico dell'espressione compresa fra le barre verticali è negativo, si prende il valore zero:

$$|x|_+ = \max(0, x) = \begin{cases} x & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Infine, qualora il dato dell'acqua precipitabile non fosse disponibile, lo si può calcolare agevolmente a partire dalla temperatura del punto di rugiada (*dew point*)  $T_d$ . All'uopo esistono più correlazioni empiriche, con diverso grado di accuratezza. Perez propone:

$$W = \exp(0.07 \cdot T_d - 0.075) \quad (21)$$

in cui  $T_d$  è il dato tri-orario del punto di rugiada e va espresso in gradi centigradi ( $^{\circ}C$ ).

**4) Robledo e Soler, 2001.** L. Robledo e A. Soler [25,26,27] hanno proposto fra il 2000 e il 2001 numerosi modelli per l'EL, utilizzando serie storiche di misure risalenti agli anni 1994 e 1995 ed effettuate presso la Escuela Técnica Superior de Arquitectura di Madrid. Al pari del modello di Perez e collaboratori, i modelli di Robledo e Soler sono accurati in quanto tengono conto sia della posizione del Sole, sia dello stato di brillantezza del cielo; nel contempo, i coefficienti necessari sono pochi e l'aspetto formale (che non è uno sviluppo polinomiale) è suggerito dalle stesse caratteristiche del fenomeno luminoso. I modelli sono numerosi perché sviluppati con riferimento alle differenti condizioni di cielo: sereno, parzialmente coperto e completamente coperto; ma sono fornite anche le espressioni compatte che si applicano a qualunque situazione meteorologica. Queste ultime sono:

$$\begin{cases} \eta_{dh} = (91.07 \cdot \Delta^{-0.254}) \frac{lm}{W} \\ \eta_{bn} = [134.27 \cdot \cos^{0.269} \vartheta_z \cdot e^{-0.0045(90^\circ - \vartheta_z)} \cdot (1.045 - 0.427 \cdot \Delta)] \frac{lm}{W} \end{cases} \quad (22)$$

L'EL globale può ricavarsi dalle due precedenti ricorrendo all'uguaglianza (15) che la definisce:  $\eta_{gh} = \eta_{bn}(1 - k) + \eta_{dh}k$ , oppure, in alternativa, calcolarsi mediante un'espressione ricavata direttamente, al pari delle (22); ciò allo scopo di evitare, come avvertono i due Autori, che le incertezze inevitabilmente associate al calcolo delle due efficacie diretta e diffusa si sommino quando l'efficacia globale si calcola per combinazione delle due. Per questo motivo, gli Autori propongono la seguente espressione, valida però solo per condizioni di cielo sereno:

$$\eta_{gh,clear} = (129.46 \cdot \cos^{0.122} \vartheta_z \cdot e^{-0.0029(90^\circ - \vartheta_z)}) \frac{lm}{W} \quad (23)$$

## 2.8 Modelli per l'efficacia luminosa implementati in ENEA

Come già anticipato in parti precedenti del testo, uno degli obiettivi perseguito con il lavoro descritto nel presente rapporto consiste nell'approntare e rendere operativa una procedura per il calcolo automatizzato degli illuminamenti naturali per qualunque località italiana. Più in dettaglio, si tratta di produrre per un'assegnata località l'anno tipico, consistente in una collezione di dati orari che coprono un intero anno solare, ricavato da serie temporali pluriennali, in modo da risultare rappresentativo delle caratteristiche d'illuminamento naturale — globale e diffuso — della località stessa. In ENEA, negli anni scorsi, è stato messo a punto il procedimento per la redazione dell'anno meteorologico tipico riferito però alle irradianze solari; si è trattato, pertanto, di estendere il procedimento aggiungendovi il calcolo degli illuminamenti naturali, che si ricavano utilizzando una delle correlazioni già esistenti fra irradianze e illuminamenti. In una fase successiva del presente lavoro si prevede di stabilire e implementare una nuova correlazione oltre a quelle già documentate in letteratura, ma studiata specificatamente per la regione italiana. A questo scopo verrà effettuata una campagna di misure contestuali d'irradianza solare e illuminamento naturale in alcune località italiane — le prime tre individuate sono: Milano, Roma e Lampedusa — per un intervallo temporale sufficientemente esteso. In questa prima fase, in attesa che sia approntato il modello "domestico", il nuovo sistema di calcolo è stato completato incorporandovi in alternativa tutti i modelli di letteratura enumerati sopra. Ciò è stato utile per diversi motivi: testare la funzionalità del codice, risolvere gli inevitabili problemi di traduzione delle formulazioni modellistiche in algoritmi informatici, ed effettuare infine il confronto fra i risultati forniti con i diversi modelli ai fini della loro validazione reciproca. In definitiva, i modelli informatici che sono stati implementati e utilizzati sono, al momento:

- **Perez standard.** In questo modello, le EL sono calcolate — ciascuna delle tre indipendentemente dalle altre due — mediante le (20) e gli illuminamenti tramite le definizioni (12). Ovviamente, gli illuminamenti delle ore notturne sono nulli. Va segnalata la circostanza che, oltre alle irradianze orarie, fornite contestualmente dal sistema di calcolo ENEA, il modello richiede come input anche i dati orari

della temperatura di rugiada o, in alternativa, del contenuto dell'acqua precipitabile in atmosfera: si tratta di 8760 valori o meglio, poco più di 4000, tante sono all'incirca le ore diurne in un anno (per quelle notturne il dato non è indispensabile). Questi ultimi dati vanno reperiti autonomamente e pertanto non è garantito che si riferiscano alle stesse condizioni meteorologiche in cui sono state ricavate le irradianze. C'è purtroppo l'ulteriore complicazione costituita dal fatto che la collezione annua della temperatura di rugiada o dell'acqua precipitabile va reperita singolarmente per ogni località di cui si necessita il calcolo degli illuminamenti, mentre il sistema di partenza, deputato al calcolo delle irradianze, non soffre di questa limitazione in quanto i valori orari d'input sono estratti da mappe georeferenziate, circostanza che rende immediato il calcolo per qualunque località che ricada nella regione geografica rappresentata nelle mappe.

- **Perez con un solo valore di  $T_d$ .** Questo modello è stato derivato dal precedente per ovviare alla difficoltà legata al fatto che i dati d'input, ossia irradianze e temperature, derivando da fonti indipendenti, possano riferirsi a situazioni meteorologiche differenti. Il nuovo modello ricorre sempre alla formulazione di Perez, ma ora il dato d'input per la temperatura di rugiada è unico, per tutto l'anno, e pari al suo valor medio calcolato per le ore diurne. In questo modo l'unico valore annuo è svincolato dalle condizioni meteo contingenti pur rimanendo rappresentativo della località studiata. Per uniformare le differenti tipologie d'input, è sufficiente redigere una sola mappa delle temperature di rugiada, ottenuta come media sulle ore diurne dell'intero anno, da aggiungere alle mappe di copertura nuvolosa da cui si ricavano invece le irradianze. Quest'unica mappa potrebbe ottenersi per interpolazione geografica a partire da un numero sufficiente di località uniformemente distribuite sul territorio, per le quali è stato preventivamente ricavato il dato di temperatura di rugiada rappresentativo. Per ciascuna località utilizzata nell'interpolazione, il dato rappresentativo della temperatura di rugiada è calcolato da una serie storica di misurazioni ivi effettuate oppure da elaborazioni effettuate a partire dalle misure. Nel nostro caso, per la prima fase dello studio sono state selezionate tre città rappresentative per l'Italia, ossia Milano, Roma e Palermo, e il dato di temperatura è stato ricavato dagli anni meteorologici tipici calcolati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) per tutti i capoluoghi provinciali italiani [28]. I valori di riferimento medi annui (per le sole ore diurne) della temperatura di rugiada per le tre città risultano:

$$\begin{aligned}
 \text{Milano : } & T_d = +9.4^{\circ}\text{C} \\
 \text{Roma : } & T_d = +10.3^{\circ}\text{C} \\
 \text{Palermo : } & T_d = +11.4^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

- **Cucumo.** In questo modello, il calcolo delle efficacie diffusa e diretta è effettuato mediante la seconda e la terza delle (13), mentre l'efficacia luminosa globale è calcolata per coerenza mediante la (15).
- **Muneer.** Muneer et al. forniscono solo le efficacie globale e diffusa, mediante le (16). Nell'implementazione ENEA è aggiunto il calcolo della efficacia diretta, mediante la (17). A denominatore di quest'ultima espressione, nel caso risulti  $k=1$  e il denominatore si annulli, per evitare l'occorrenza di un errore di calcolo run-time, è posto  $1-k=0.05$  senza pregiudizio per l'accuratezza del calcolo.

— **Robledo.** In questo modello, il calcolo delle efficacie diffusa e diretta è effettuato mediante le (22), mentre l'efficacia luminosa globale è calcolata per coerenza con la (15).

## 2.9 Anni tipici per l'illuminamento naturale dell'ENEA. Controlli e verifiche

In questa prima fase il sistema di calcolo implementato è stato utilizzato per produrre i seguenti anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale (AMTIN):

- 1) AMTIN di Roma, modello Perez standard
- 2) AMTIN di Roma, modello Perez con  $T_d=+10.3$  °C
- 3) AMTIN di Roma, modello Perez con  $T_d=-13$  °C
- 4) AMTIN di Roma, modello Perez con  $T_d=+22$  °C
- 5) AMTIN di Roma, modello Cucumo
- 6) AMTIN di Roma, modello Muneer
- 7) AMTIN di Roma, modello Robledo
  
- 8) AMTIN di Milano, modello Perez standard
- 9) AMTIN di Milano, modello Perez con valore unico per  $T_d=+9.4$  °C
- 10) AMTIN di Milano, modello Cucumo
- 11) AMTIN di Milano, modello Robledo
  
- 12) AMTIN di Palermo, modello Perez standard
- 13) AMTIN di Palermo, modello Perez con  $T_d=+11.4$  °C
- 14) AMTIN di Palermo, modello Cucumo
- 15) AMTIN di Palermo, modello Robledo

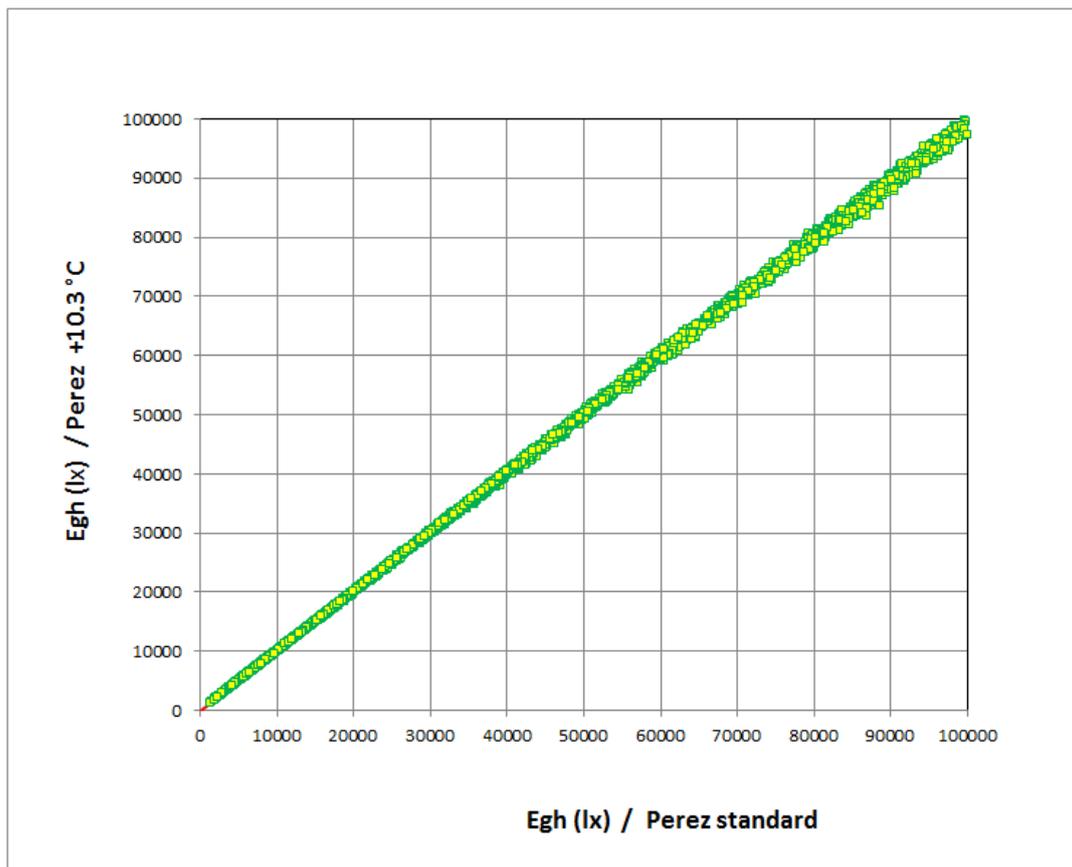
A mo' di esempio, lo stralcio dell'elaborato di un AMTIN è riportato in appendice 4.

Per quanto riguarda il modello Perez con  $T_d$  fissa, per ciascuna località è stata scelta la temperatura di rugiada calcolata come media annua delle sole ore diurne; solo per Roma, sono stati prodotti anche due anni tipici, rispettivamente con temperature di -13 e +22 °C, corrispondenti alla minima e alla massima oraria registrate nel corso dell'anno.

Non disponendo ancora di dati di misura, non è possibile al momento validare i modelli anche per la regione italiana e individuare quello più appropriato, o in alternativa, proporre uno nuovo. Pertanto a questo stadio è stato eseguito il confronto fra i modelli disponibili per valutarne la coerenza reciproca e sceglierne comunque uno da usare come riferimento per le prime indicazioni da trarre ai fini del miglioramento energetico degli edifici civili.

Un controllo preliminare è necessario per quantificare la dipendenza delle EL dalla temperatura di rugiada, la quale determina il contenuto di vapore acqueo in atmosfera che compare nei termini delle espressioni del modello di Perez. Infatti, se le EL fossero poco "sensibili" al variare della temperatura di rugiada, sarebbe giustificato il ricorso al modello che utilizza come input un valore unico di questo parametro per

l'intero anno solare; rimarrebbe peraltro la variabilità geografica, e per ogni località andrà calcolato il valore appropriato. Un confronto grafico fra due modelli, immediato ed efficace, è possibile grazie ai diagrammi a dispersione; ad esempio, in figura 8 sono mostrate le differenze fra i valori orari delle EL globali ricavate dall'anno tipico della località di Roma, fra Perez standard e Perez con temperatura di rugiada costante  $T_d = +10.3\text{ °C}$  ( $+10.3\text{ °C}$  è la media di tutto l'anno, tenendo conto solamente delle ore diurne).



**Figura 8. Valori d'illuminamento globale di un anno tipico – località di Roma – confronto fra due modelli**

Punti situati sulla bisettrice del diagramma cartesiano corrispondono a coppie di valori uguali nei due modelli, mentre punti distanti corrispondono a valori differenti. La statistica definisce moltissimi *parametri e indici di accostamento* che forniscono una misura delle differenze fra due serie di valori corrispondenti – in appendice 5 è un elenco ragionato di essi, con le relative definizioni – 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 stesse. 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%). Nel confronto fra i due modelli di Perez, si ottengono i seguenti valori:

$$\text{MBE} = -155 \text{ lx}$$

$$\text{MBE}\% = -0.4 \%$$

$$\text{RMSE}\% = 1.3 \%$$

I risultati appena visti sono riferiti agli illuminamenti globali, ma diagramma e indici simili si ottengono anche per gli illuminamenti diffuso e diretto. In conclusione, errori così esigui ben giustificano il ricorso al modello di Perez con  $T_d$  unica in vece di quello standard (come si è visto, più esigente per l'input).

Per completare lo studio della sensibilità della dipendenza dell'EL al variare della temperatura di rugiada, sono stati ricavati i dati del modello semplificato di Perez anche per le temperature  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sempre per la località di Roma ( $-13 \div +22$  è l'intervallo di variabilità della  $T_d$  oraria a Roma secondo l'anno tipico, tenendo conto anche delle ore notturne). I risultati sono stati confrontati con il modello standard e qui mostrati nelle figure 9. Si osserva che le differenze rispetto al modello standard rimangono piccole: pertanto, esse giustificano l'assunzione che la variabilità della temperatura di rugiada influenzi in misura trascurabile il calcolo delle EL, e che si possa far ricorso al modello semplificato a temperatura di rugiada costante senza che l'accuratezza dei risultati si degradi significativamente.

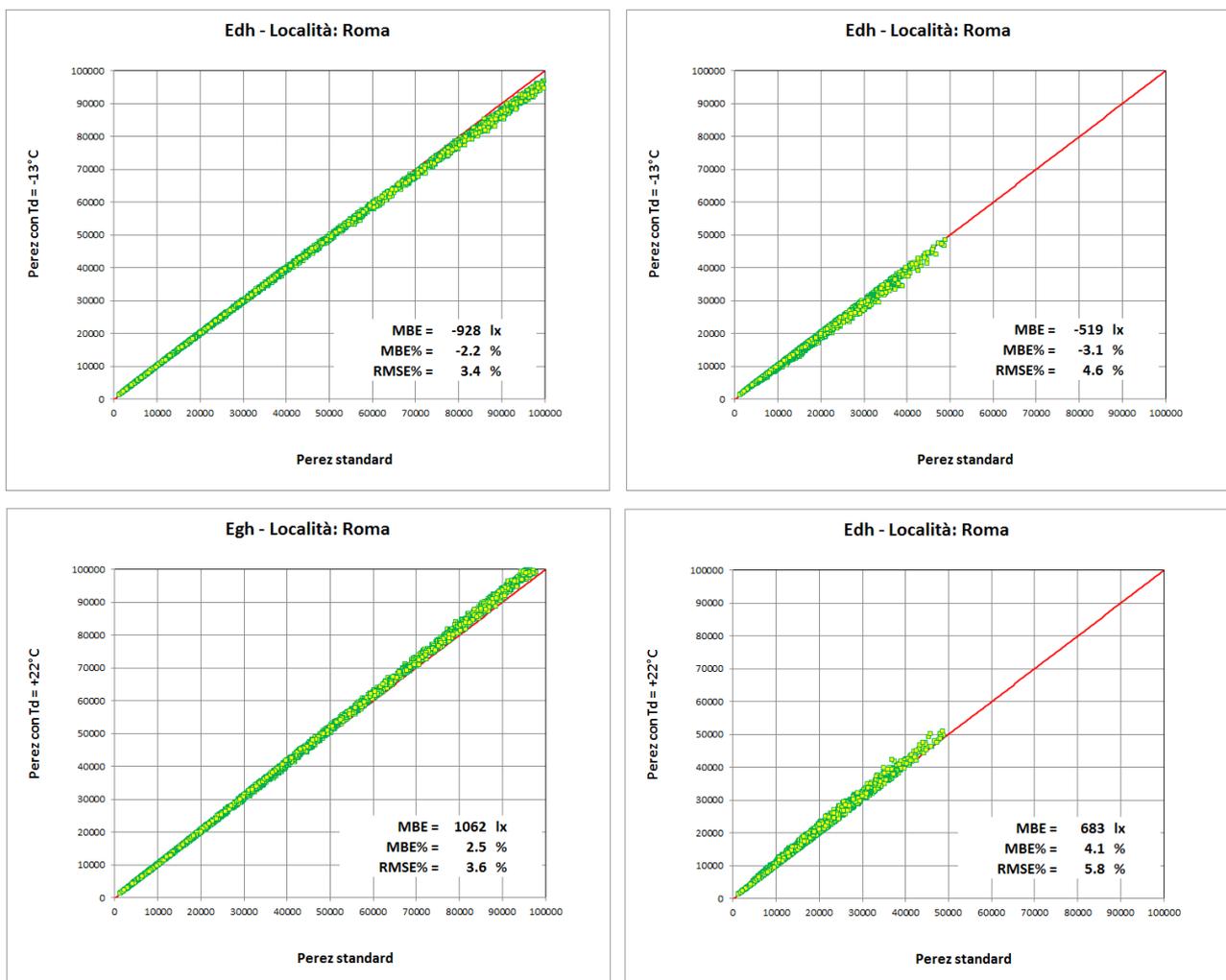


Figura 9. Valori d'illuminamento globale e diffuso di un anno tipico – località di Roma – confronto fra modelli

L'ottenimento degli AMTIN con altri modelli, che presentano caratteristiche differenti sotto l'aspetto della dipendenza formale dell'EL dai parametri, ha permesso di confrontarne i risultati ai fini di una loro valida-

zione reciproca. Qui di seguito, fig. 10, per non allungare inutilmente il documento, sono mostrati i solo i confronti delle EL globali e diffuse di ciascun modello rispetto a quello di Perez standard, ma le conclusioni che seguono tengono conto di tutti i tipi di confronto possibili ed effettuati. Dall'esame dei diagrammi e degli indici di accostamento si desume che ogni modello mostra differenze minime rispetto a qualunque altro e, inoltre, le differenze per l'efficacia diffusa sono più pronunciate rispetto a quelle della globale, a dimostrazione della maggiore difficoltà, stante la complessità dei fenomeni radiativi che avvengono in atmosfera, a modellare proprio la componente diffusa.

Come considerazione conclusiva, ai fini della scelta finale di un modello da utilizzare come riferimento nei lavori futuri, quando saranno disponibili i dati delle misurazioni provenienti dalle località italiane, il miglior candidato sembra il modello di Robledo (e Soler), messo a punto con i dati di Madrid. Oltre a fornire valori che non si discostano significativamente da tutti gli altri esaminati, tale modello ha il vantaggio di presentare una formulazione che, sebbene compatta e "parsimoniosa" sotto il profilo dei parametri utilizzati, tiene conto di entrambi i fattori che influenzano l'efficacia luminosa, ovvero la posizione del Sole e la brillantezza del cielo; infine, a differenza del modello di Perez, non richiede come input il dato della temperatura di rugiada (o, equivalentemente, del contenuto di vapore acqueo) che in molti casi è un dato difficilmente disponibile o calcolabile.

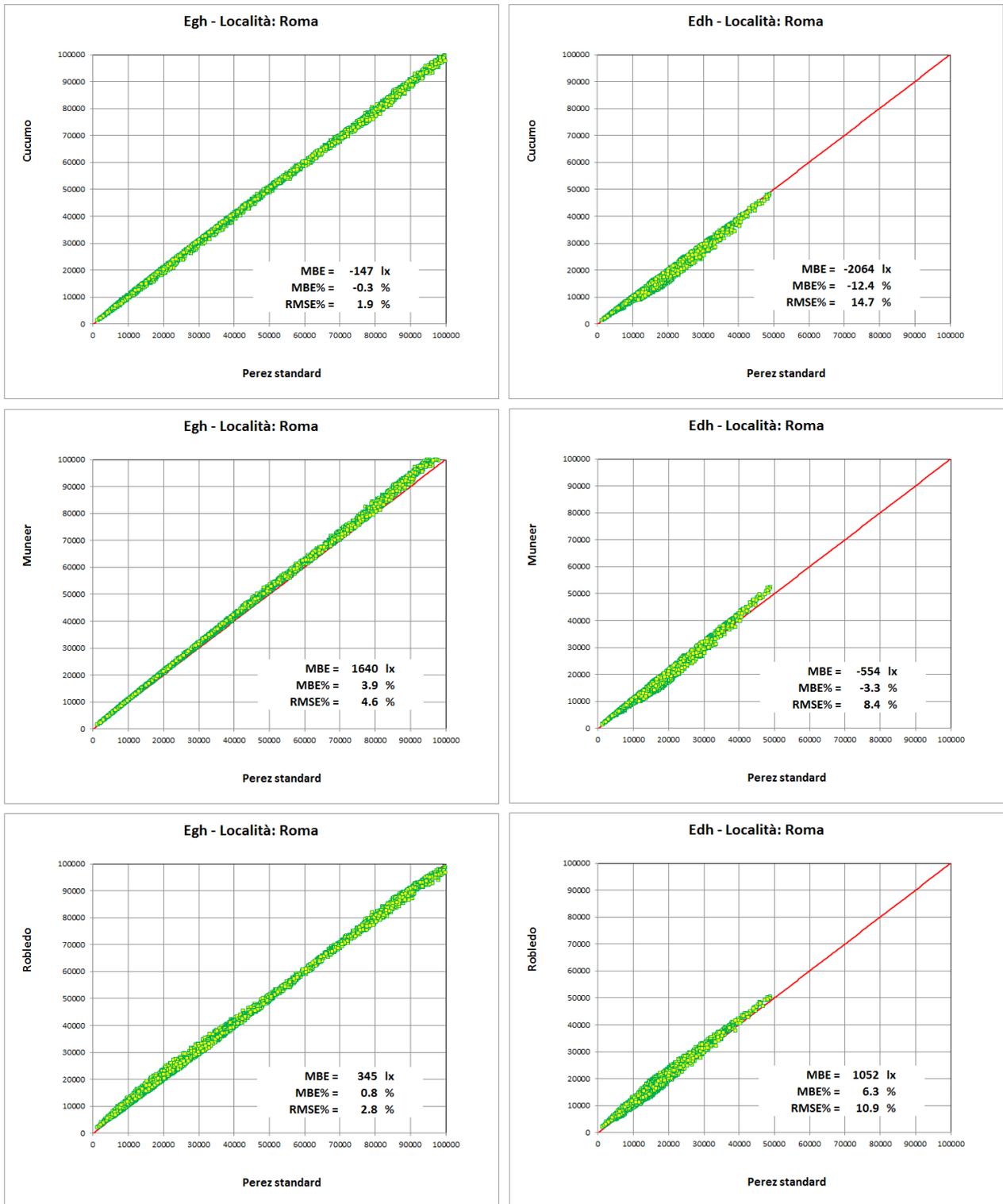


Figura 10. Valori d'illuminamento globale e diffuso di un anno tipico – località di Roma – confronto fra modelli

### 3 La disponibilità di luce naturale per l'illuminazione degli ambienti

Dopo aver illustrato le modalità per addivenire alla costruzione di una banca dati dei valori orari medi dell'illuminamento globale,  $E_{gh}$  e diffuso,  $E_{dh}$ , su piano orizzontale e dell'illuminamento diretto normale  $E_{bn}$  sul territorio nazionale a partire dai dati di radiazione solare, mostriamo ora come sia possibile utilizzare questi dati<sup>4</sup> (in particolare  $E_{dh}$ ) per la stima del contributo della luce naturale (*daylighting*) all'illuminazione di ambienti interni di edifici.

L'illuminazione con luce naturale, infatti, accanto alle sue qualità estetiche, visuali e spaziali, gioca un ruolo importante nello sforzo di minimizzare, o almeno ridurre, il consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale degli spazi interni degli edifici. I calcoli di *daylight* dovrebbero, di conseguenza, essere inclusi nella progettazione e nella gestione dell'edificio e dei sistemi energetici. Attualmente sono disponibili numerosi *software* commerciali di calcolo delle condizioni d'illuminamento naturale (e artificiale) di interni [33]. Essi hanno in comune l'utilizzazione di modelli di cielo (le fonti cioè della luminosità naturale) corrispondenti alle norme CIE 110 "Spatial Distribution of Daylight-Luminance Distribution of Various Reference Skies". I modelli di cielo attualmente previsti sono sedici per tenere conto della estrema variabilità della natura e qualità di daylight in dipendenza delle varie condizioni di luminanza<sup>5</sup> del cielo (da quello uniformemente coperto a quello completamente sereno).

La figura 11 illustra la distribuzione di luminanza dei cieli CIE tipo 1 e tipo 16.

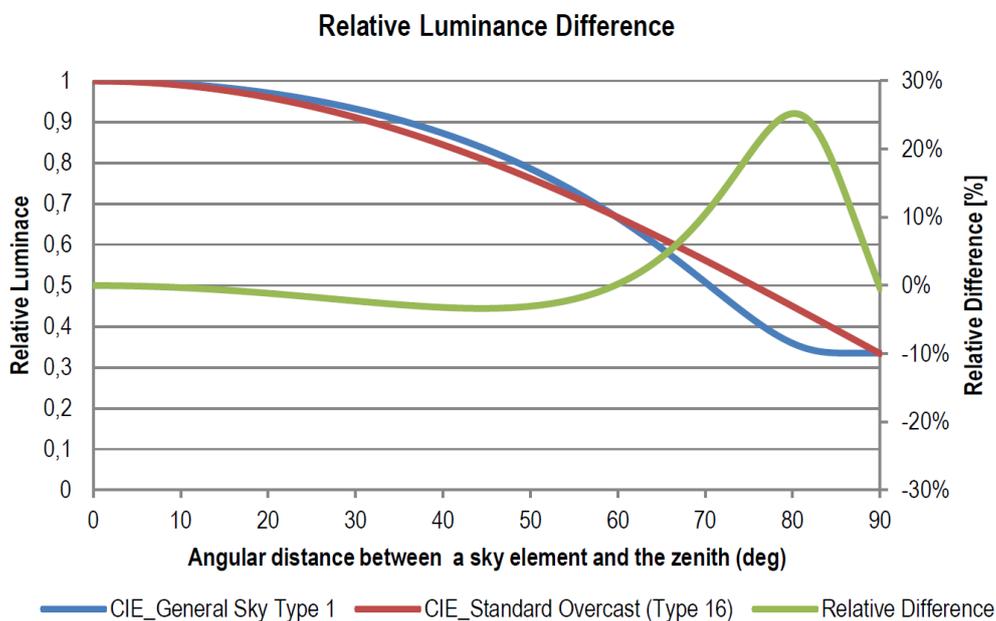


Figura 11. Distribuzione della luminanza relativa di due cieli CIE

<sup>4</sup> Finora sono stati valutati i dati con riferimento ai piani orizzontale (per l'illuminamento globale e diffuso) e normale (per quello diretto) ma, in analogia con quanto già avviene per la radiazione solare mediante l'utility web *Solaritaly - Atlante italiano della radiazione solare*, è possibile ottenere dati d'illuminamento per giaciture comunque orientate.

<sup>5</sup> La luminanza è una grandezza fotometrica definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente nella direzione dell'osservatore e l'area della superficie emittente. La luminanza è espressa in candele a metro quadrato ( $cd/m^2$ ). L'intensità luminosa è il flusso luminoso (misurato in lumen) emesso da una sorgente puntiforme in una determinata direzione nell'angolo solido unitario.

La metodologia proposta in questo lavoro prescinde dal concetto di cielo di riferimento e utilizza le grandezze fotometriche così come sono state qui determinate a partire dalla radiazione solare sul territorio nazionale.

### 3.1 Il fattore di luce diurna (FLD)

La disponibilità di luce naturale per l'illuminazione di ambienti interni di edifici dipende manifestamente dalla disponibilità, in qualità e quantità, di quella che penetra negli ambienti stessi attraverso le superfici trasparenti dell'involucro edilizio. Il livello d'illuminamento (espresso in lux) su una qualsiasi superficie interna dell'ambiente è, inoltre, funzione delle dimensioni, dell'orientamento e delle caratteristiche ottiche delle superfici trasparenti oltre che dipendere dalla presenza di ostacoli o schermature della luce (accidentali o di progetto), nonché, naturalmente, dalla posizione, giacitura e caratteristiche ottiche della superficie illuminata stessa e delle superfici riflettenti (in modo speculare o diffondente) circostanti.

Le caratteristiche qualitative (luce diretta e/o diffusa) e i valori d'illuminamento interno dipendono quindi sia dalle caratteristiche e dai valori dell'illuminamento esterno che dalle caratteristiche generali delle superfici trasparenti e di quelle illuminate.

Un parametro semplice che descrive l'illuminamento naturale in uno specifico punto di un ambiente interno di un edificio è il *fattore di luce diurna* (*FLD*, oppure *Daylight Factor*, *DF*, nella letteratura anglosassone o, meglio semplicemente *D* nella denominazione delle norme internazionali) definito come il rapporto tra il livello d'illuminamento diffuso interno ( $E_{i}$ ), nel punto specificato, e il livello d'illuminamento diffuso sul piano orizzontale esterno indotto da un cielo di riferimento (tipicamente il CIE Standard Overcast Sky -Type 16-). Si esclude quindi dalla definizione l'influenza sull'illuminamento interno della radiazione diretta.

$$FLD = \frac{E_{interno}}{E_{dh}} \quad (25)$$

Tradizionalmente questo parametro si esprime in termini percentuali.

Il fattore di luce diurna dipende dalla distribuzione relativa di luminanza del cielo considerato ma non dai suoi valori assoluti. La distribuzione di luminanza del cielo standard considerato nel calcolo è infatti normalizzata rispetto al suo valore massimo (fig. 11) e la luminanza del cielo compare sia nel calcolo dell'illuminamento interno che in quello dell'illuminamento esterno sul piano orizzontale; nel loro rapporto si elide quindi il valore di normalizzazione. A causa, inoltre, della simmetria azimutale del cielo di riferimento considerato, *FLD* è indipendente dall'orientamento azimutale della superficie trasparente che può, invece, avere influenza sull'illuminamento interno.

I punti dell'ambiente interno nei quali è calcolato *FLD* in genere appartengono al cosiddetto *piano di lavoro*, definito a una specifica quota rispetto al pavimento, dove è prescritto un determinato valore dell'illuminamento necessario per svolgere il *compito* assegnato all'utente. Il fattore di luce diurna risente,

naturalmente, delle caratteristiche ottiche e geometriche delle superfici trasparenti attraverso le quali penetra la luce naturale e ha una distribuzione spaziale nell'ambiente interno [33].

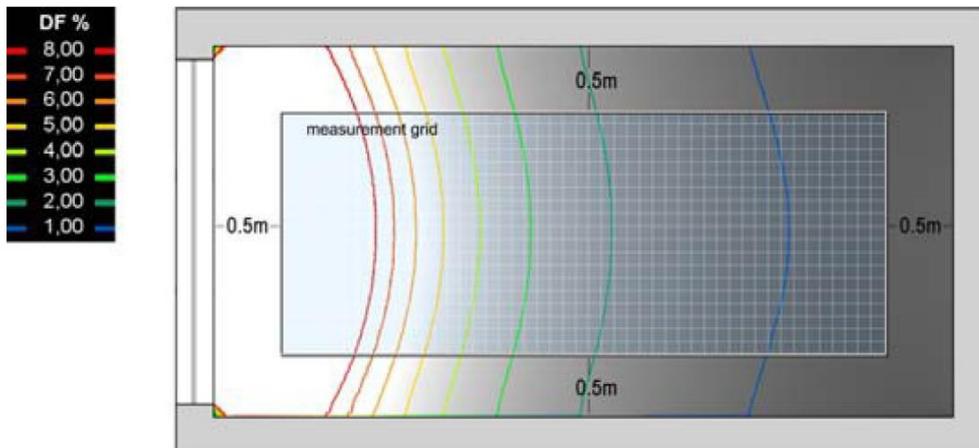
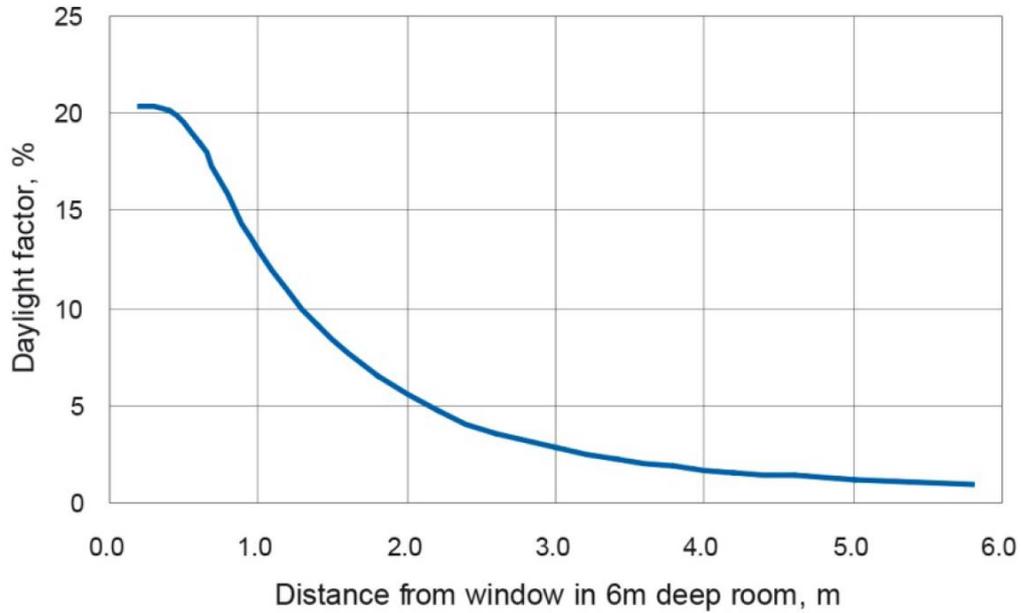


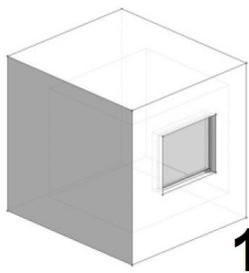
Figura 12. Distribuzione del Fattore di Luce Diurna (penetrazione)

La qualità e l'accuratezza della valutazione di *FLD* effettuata dai numerosi software commerciali disponibili è influenzata dai seguenti fattori:

- metodo di calcolo : (Split Flux, Radiosity, Ray Tracing, Back Ray Tracing, Photon Mapping)
- modello di cielo standard: (CIE Type 1 o Type 16)
- modello geometrico dell'ambiente
- proprietà delle superfici riflettenti/diffondenti
- esperienza dell'utilizzatore.

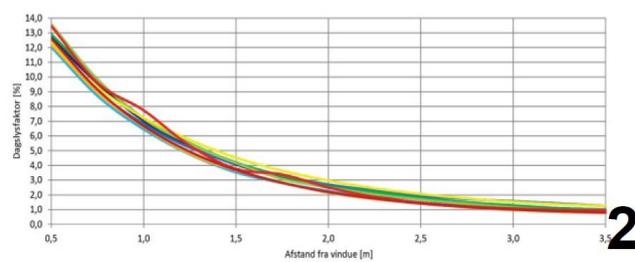
La figura seguente illustra i risultati ottenuti, in un caso semplice, da parte di utilizzatori esperti dei vari software commerciali disponibili [33].

### 1. STANDARD RUM - Beregningsark

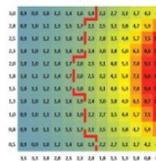


- RADIANCE
- RADIANCE 2.0 BETA
- ECOTECT
- DIALUX
- DAYSIM
- RELUX RADIOSITY
- RELUX RAYTRACING
- IESVE
- LIGHTCALC
- VELUX DAYLIGHT VISUALISER

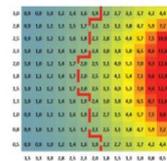
Dagslysfaktor niveauet gennem rummet



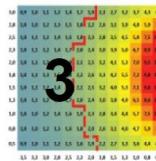
Radiance



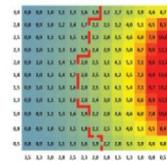
Relux - Raytracing



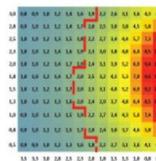
Daysim



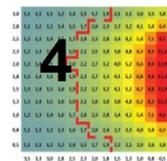
Relux - Radiosity



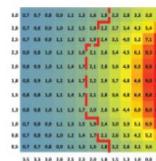
Radiance 2.0 BETA



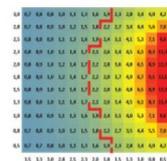
Ecotect



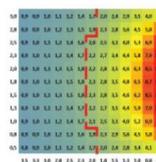
IESVE



Velux Daylight Visualizer



Dialux



Lightcalc

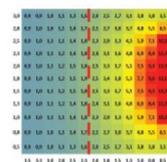


Figura 13. Calcolo di FLD con diversi software commerciali

Alcuni autori (Mardaljevic 1995; Reinhart & Walkenhorst 2001; Reinhart & Andersen 2006; Reinhart 2010) [34,35,36,37], hanno confrontato i fattori di luce diurna calcolati tramite simulazione con quelli effettivamente riscontrati realmente negli ambienti interni considerati, trovando deviazioni contenute entro il 10%.

### 3.2 L'impiego del fattore di luce diurna (*FLD*) per la stima dell'illuminamento interno

L'analisi degli autori prima citati giustifica l'applicazione della seguente procedura, proposta in questo lavoro, per la valutazione dei valori dell'illuminamento in uno o più specifici punti di una superficie di un ambiente interno:

- simulazione dell'ambiente in istudio con uno dei software commerciali disponibili
- determinazione, nei punti e sulle superfici specificate, dei valori e delle relative distribuzioni dei fattori *FLD*
- calcolo degli illuminamenti interni:

$$E_{interno} = FLD \cdot E_{dh} \quad (26)$$

dove si utilizza il valore appropriato di  $E_{dh}$  della costituita banca dati dell'illuminamento.

Al variare della località dove è situato l'edificio di cui fa parte l'ambiente simulato, *FLD* di calcolo non varia, mentre varia  $E_{dh}$  e, di conseguenza anche  $E_{interno}$ . La disponibilità di una serie di dati orari georeferenziati di  $E_{dh}$  rende evidente l'utilità di questa procedura. Si fa presente che i software commerciali calcolano anch'essi il livello d'illuminamento interno considerando però un valore della luminanza di riferimento del cielo standard utilizzato nel calcolo tale da produrre un illuminamento diffuso sul piano orizzontale pari, in genere, a 10000 lx.

### 3.3 La disponibilità di luce naturale e le curve di disponibilità (*Dresler*) standard

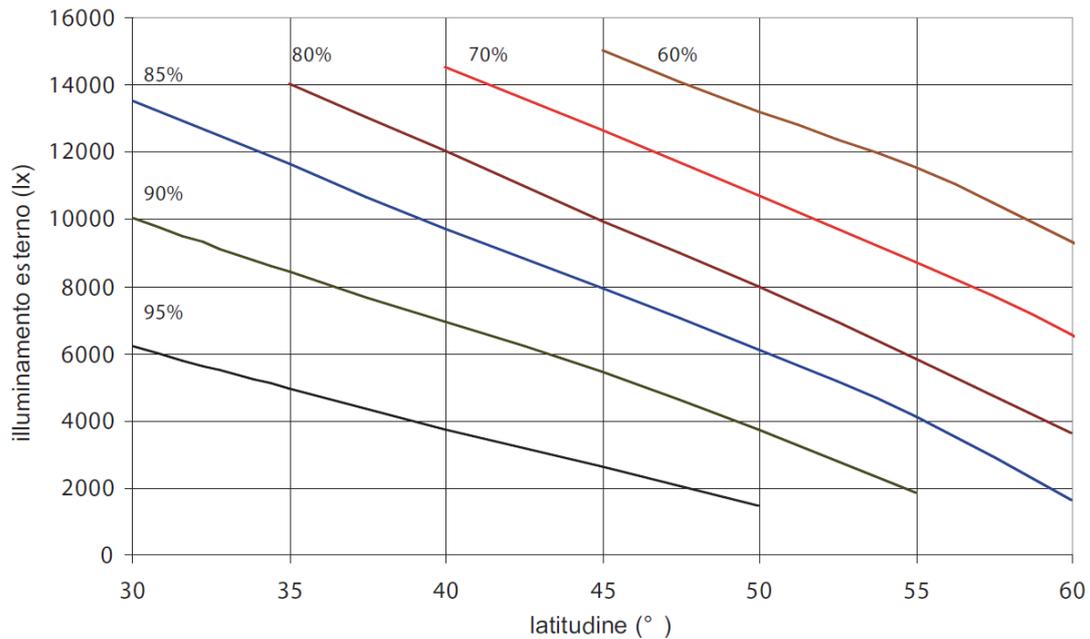
L'obiettivo principale di questo lavoro è la valutazione del contributo del daylight all'illuminazione interna, al livello di  $E_{interno}$  (in lux) desiderato, in modo da stimare il fabbisogno energetico per l'eventuale integrazione con l'illuminazione artificiale in una finestra temporale specificata (giorno, mese, anno, altro) adeguata al profilo di utilizzo dell'ambiente.

A partire dal livello di  $E_{interno}$  desiderato, medio dell'ambiente o puntuale, è possibile, conoscendo il relativo fattore di luce diurna *FLD* determinare la frazione della finestra temporale considerata nella quale la luce diurna è in grado di garantire il livello d'illuminamento richiesto.

Attualmente sono disponibili, nella letteratura tecnica, dei diagrammi (*curve di Dresler*) standard che forniscono la percentuale di tempo in cui è superato un certo livello d'illuminamento all'esterno  $E_{dh}$  in un determinato periodo del giorno (9:00 ÷ 17:00 per la fig. 14), in funzione della latitudine del luogo. Noti il valore d'illuminamento richiesto e il fattore di luce diurna dell'ambiente si ha:

$$E_{dh} = \frac{E_{interno}}{FLD} \quad (27)$$

In corrispondenza del valore di  $E_{dh}$  così determinato e della latitudine del luogo si determina la frazione di tempo in cui non è richiesto l'ausilio dell'illuminazione artificiale.



**Figura 14. Percentuale di tempo fra le 9:00 e le 17:00 in cui si supera un determinato valore di illuminamento esterno in funzione della latitudine del luogo (Diagramma di Dresler).**

Ad esempio per un ambiente che abbia  $FLD_{medio} = 0.02$  e per il quale sia da garantire un illuminamento medio interno pari a 200 lx, l'illuminamento esterno richiesto per tale compito deve essere superiore a 10000 lx (infatti:  $10000lx = \frac{200lx}{0.02}$ ).

Dal diagramma di Dresler, per una località a 45° di latitudine, si ricava che tale condizione per l'illuminamento esterno su piano orizzontale si verifica per l'80% del tempo compreso fra le 9:00 e le 17:00. L'integrazione da fornire per mezzo dell'illuminazione artificiale deve essere assicurata quindi per il 20% della finestra temporale indicata.

**Conoscendo la potenza delle sorgenti artificiali utilizzate, è allora immediato stimare l'energia elettrica necessaria.**

Le curve di Dresler pubblicate sono elaborate per un limitato numero di finestre temporali giornaliere e per un range di valori d'illuminamento esterno del pari limitato.

**La possibilità di costruire curve di disponibilità di luce naturale per qualsiasi località del territorio nazionale e con finestre temporali adeguate al profilo di utilizzo degli ambienti di lavoro è facilmente perseguibile utilizzando la banca dati dell'illuminamento costruita nel presente lavoro.**

### 3.4 La costruzione delle curve di disponibilità per $E_{dh}$ e $E_{gh}$ (Dresler) dell' AMTIN

La trasformazione delle grandezze relative alla radiazione solare in grandezze fotometriche è stata, si ricorda, effettuata per mezzo di modelli, reperiti in letteratura, dell'efficacia luminosa per le varie componenti:

$$\eta = \frac{E}{I} \quad (\text{si esprime in } \frac{lm}{W}) \quad (28)$$

Ai fini della scelta finale di un modello di efficacia luminosa da utilizzare come riferimento nei lavori futuri, quando saranno disponibili i previsti dati delle misurazioni provenienti dalle località italiane, il miglior candidato è sembrato, come detto, il modello di Robledo & Soler. Abbiamo riscontrato, Infatti, che oltre a fornire valori che non si discostano significativamente da tutti gli altri esaminati, tale modello ha il vantaggio di presentare una formulazione che, sebbene compatta e "parsimoniosa" sotto il profilo dei parametri utilizzati, tiene conto di entrambi i fattori che influenzano l'efficacia luminosa, ovvero la posizione del Sole e la brillantezza del cielo; infine, a differenza del modello di Perez, non richiede come input il dato della temperatura di rugiada (o, equivalentemente, del contenuto di valore acqueo). Esso, inoltre, del pari di quello di Perez e al contrario di quello di Cucumo & altri, è un modello a efficacia luminosa variabile.

*Le elaborazioni successive saranno dunque centrate essenzialmente sui dati ricavati dal modello di Robledo&Soler.*

#### **DEFINIZIONE: "disponibilità di un livello di illuminamento".**

In accordo con quanto prima detto nell'illustrare il significato delle curve di Dresler, si definisce come disponibilità di un valore prefissato  $E$  d'illuminamento, per una finestra temporale giornaliera  $t_{Day}$  di dimensioni e limiti assegnati ( $t_i$  : ora di inizio,  $t_f$  : ora di fine,  $t_i < t_f$ ), il rapporto  $D_E$  tra il tempo  $\tau(E)$  nel quale tale valore di illuminamento è superato e il tempo totale  $T$  (periodo di osservazione composto da più giorni).

$$D_E(E) = \frac{\tau(E)}{T} \quad (29)$$

La disponibilità della variabile  $E$  è dunque coincidente con la sua funzione di ripartizione in frequenza relativa  $f$  :

$$D_E(E_*) = \left[ f_{E > E_*} \right] \quad (30)$$

Nella pratica la disponibilità  $D_E$  si esprime in termini percentuali.

Il complemento a 1 (o a 100%) di  $D_E$  esprime, manifestamente, la frazione di tempo di osservazione  $T$  durante il quale è necessario, in conformità a un assegnato valore di  $FLD$  e di  $E_{interno}$ , integrare l'illuminazione naturale con quella artificiale con conseguente consumo di energia elettrica.

Analizziamo ora come si possa determinare la curva di disponibilità per  $E_{dh}$  e  $E_{gh}$  dai dati orari dell'anno meteorologico tipico per l'illuminamento naturale (AMTIN), reso disponibile in questo lavoro, per le tre località campione Milano, Roma e Palermo.

È opportuno, prima di tutto, riferire il tempo all'ora adottata in Italia (Fuso orario dell'Europa Centrale) e non al Tempo medio di Greenwich (GMT) impiegato per ragioni di calcolo nell'elaborazione del data base, considerando anche l'effetto dell'ora legale<sup>6</sup>: operando in tal modo si fanno coincidere le ore, per tutto l'anno tipico, con quelle che si leggerebbero su un orologio locale ben regolato.

I dati orari dell'AMTIN costituiscono vettori di valori d'illuminamento con 8760 elementi corrispondenti, naturalmente alle 8760 ore dell'anno, ore notturne comprese.

Se si desidera valutare la curva di disponibilità di un tipo d'illuminamento per una finestra temporale giornaliera determinata, è necessario:

- *filtrare* il vettore corrispondente in modo da eliminare i dati orari che non rientrano in tale finestra
- *raggruppare* i valori presenti nel vettore in *classi* di opportuna dimensione in quanto la variabile coinvolta ha un carattere discreto
- *valutare* il numero di ricorrenze nelle varie classi (frequenza assoluta)
- *valutare* la disponibilità delle varie classi (frequenza relativa o percentuale).

Con l'impiego di un foglio elettronico tali operazioni sono di facile esecuzione e possono essere automatizzate in un'implementazione futura del data base dell'AMTIN.

La scelta della finestra temporale giornaliera dipende dal profilo d'impiego dell'ambiente per il quale si vuole valutare la disponibilità di luce naturale: se l'attività prevista si svolge per tutte le 24 ore del giorno per tutto l'anno, non ci sarà necessità di filtrare i vettori della componente d'illuminamento di interesse; se invece l'arco giornaliero diurno è specificato ed è altresì specificato il periodo dell'anno di attività, si filtreranno di conseguenza i dati orari.

---

<sup>6</sup> L'inizio dell'ora legale (aggiunta di un'ora) è, per legge, fissato per l'ultima domenica del mese di marzo alle ore 2 del fuso Europa centrale; la fine dell'ora legale (sottrazione di un'ora) è altresì fissato per l'ultima domenica del mese di ottobre alle ore 3 (legali). L'AMTIN è un anno convenzionale ricavato dagli anni che vanno dal 2006 al 2014 e, per ciascuno di questi, tali giorni hanno numero d'ordine differente. Si è convenuto di fissare al 28 marzo e al 28 ottobre le date d'inizio e fine del periodo di vigenza dell'ora legale (valori medi per gli anni dal 2006 al 2014).

A titolo di esempio si riportano alcune curve di disponibilità calcolate per le località attualmente disponibili.

### 3.5 Curve di disponibilità (Dresler) “Alba – Tramonto” per le località selezionate

#### MILANO

##### Finestra temporale “Alba-Tramonto” – anno intero –

Per questa finestra temporale sono stati considerati (filtrati), ovviamente, solo i valori d’illuminamento non nulli (*che possono però essere diversi a inizio e fine periodo data la loro caratteristica di valori orari!*), corrispondenti quindi a un dì (periodo diurno del giorno) convenzionale<sup>7</sup>. Nell’arco dell’intero anno questi periodi assommano a un numero di ore  $T = 4765 h$  corrispondenti alla frazione di anno pari a:

$$R_T = \frac{T}{8760 h} = 0.534$$

La durata del dì, definita come sopradetto, al variare del periodo dell’anno, risente della variazione di latitudine e longitudine delle località considerate; il valore di  $T$ , tuttavia, praticamente non cambia (passando da Milano a Palermo varia solo di 6 ore, pari allo 0.13%), tenuto sempre conto che i valori d’illuminamento sono valori orari.

Si riportano, nella figura seguente e a titolo di esempio, i risultati dell’operazione di filtraggio e classificazione dei valori d’illuminamento diffuso su piano orizzontale. Per il seguito si riportano solo i grafici che si riferiscono all’illuminamento diffuso su piano orizzontale  $E_{dh}$  e all’illuminamento globale sempre su piano orizzontale  $E_{gh}$

---

<sup>7</sup> Dal punto di vista astronomico, l'alba “dura” un solo istante, ed equivale al momento in cui il bordo superiore del Sole diviene visibile sopra l'orizzonte, così come il tramonto è il momento in cui il Sole scompare all'orizzonte.

$x = E_{dh}$		$x = E_{dh}$		$x = E_{dh}$	
Classe [lx]	disponibilità $D_E$	Classe [lx]	disponibilità $D_E$	Classe [lx]	disponibilità $D_E$
x>0	100.00%	x>17000	42.22%	x>35000	3.34%
x>1000	92.00%	x>18000	37.57%	x>36000	2.75%
x>2000	88.44%	x>19000	32.21%	x>37000	2.50%
x>3000	85.94%	x>20000	27.01%	x>38000	2.08%
x>4000	83.88%	x>21000	20.57%	x>39000	1.72%
x>5000	81.68%	x>22000	15.22%	x>40000	1.39%
x>6000	79.96%	x>23000	13.39%	x>41000	1.11%
x>7000	77.65%	x>24000	12.05%	x>42000	0.90%
x>8000	75.24%	x>25000	10.93%	x>43000	0.78%
x>9000	72.82%	x>26000	9.76%	x>44000	0.61%
x>10000	70.01%	x>27000	8.71%	x>45000	0.36%
x>11000	66.97%	x>28000	8.06%	x>46000	0.31%
x>12000	63.53%	x>29000	7.07%	x>47000	0.25%
x>13000	59.58%	x>30000	6.21%	x>48000	0.13%
x>14000	55.11%	x>31000	5.52%	x>49000	0.04%
x>15000	50.62%	x>32000	4.97%	x>50000	0.02%
x>16000	46.46%	x>33000	4.37%	x>51000	0.02%
		x>34000	3.86%	x>52000	0.00%

**Tabella 1. Valori della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.**

Per  $E_{dh} = 10000 \text{ lx}$ , per esempio, si ha  $D_E = 70.01\%$  e quindi  $\tau = D_E \cdot T = 3340 \text{ h}$  (numero di ore di disponibilità di  $E_{dh} > 10000 \text{ lx}$  giudicato sufficiente ad avere l'illuminamento interno desiderato).

Per le restanti  $(1 - D_E) \cdot T = (T - \tau) = 1425 \text{ h}$  si dovrà ricorrere all'illuminazione artificiale.

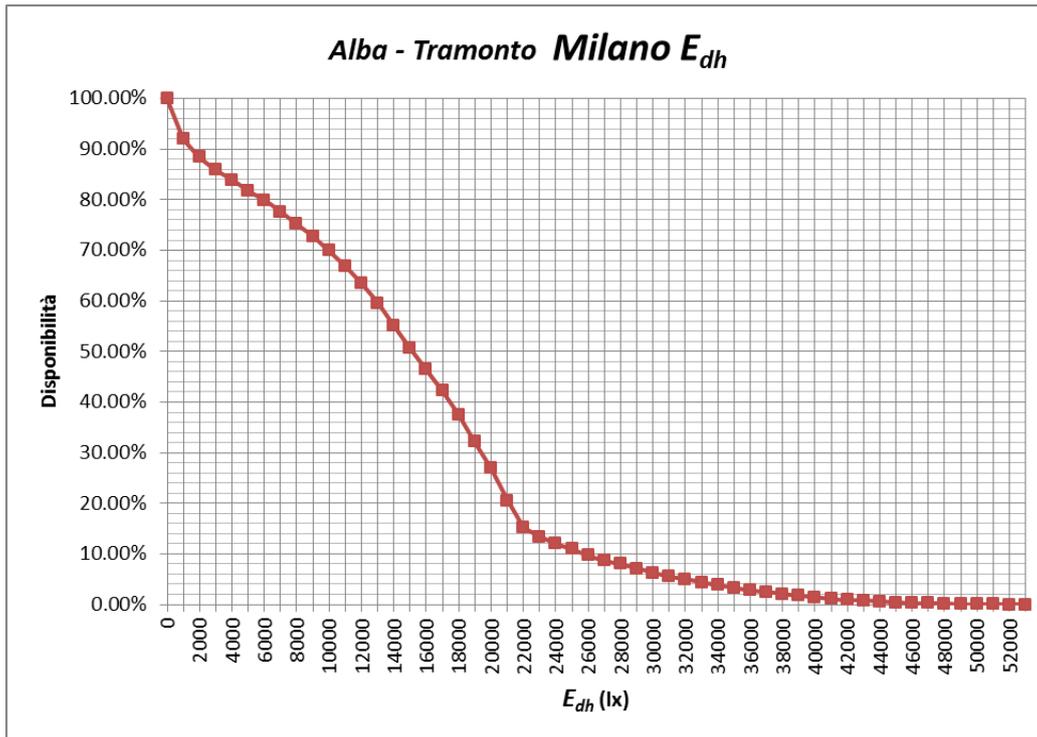


Figura 15. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

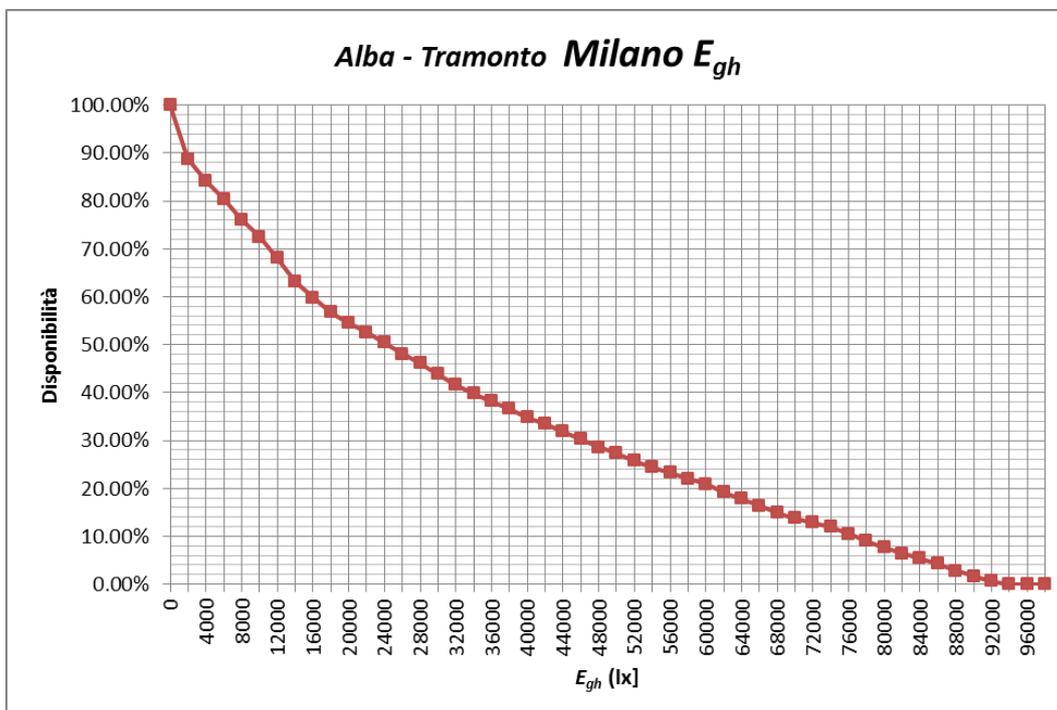


Figura 16. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

ROMA

Finestra temporale “Alba-Tramonto” – anno intero –

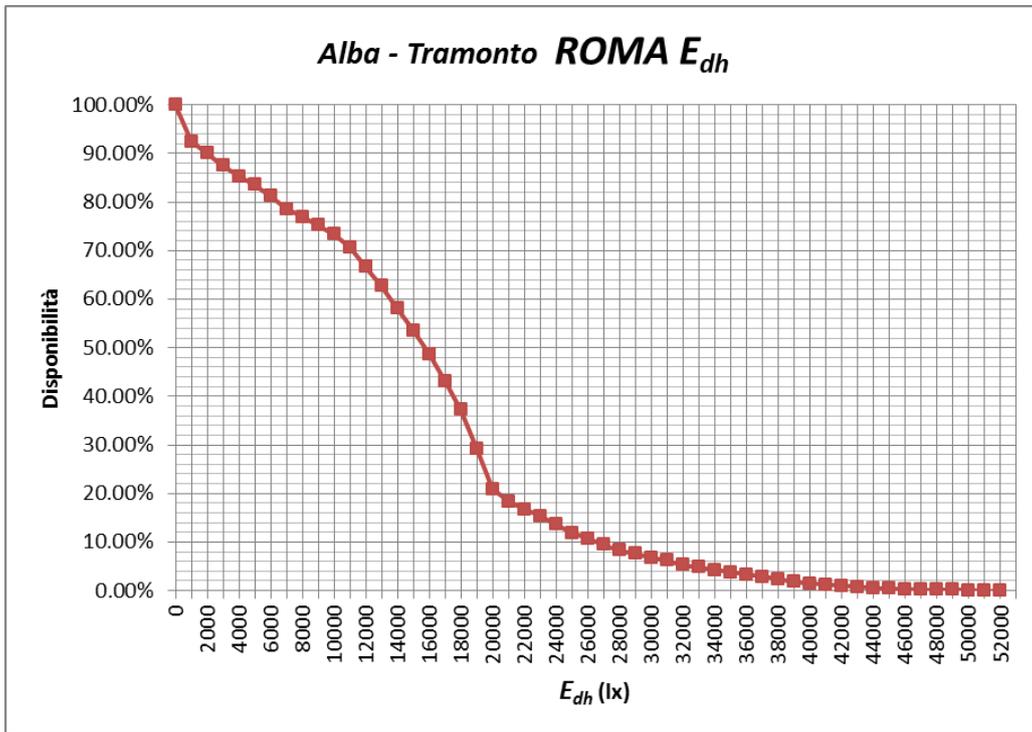


Figura 17. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Roma.

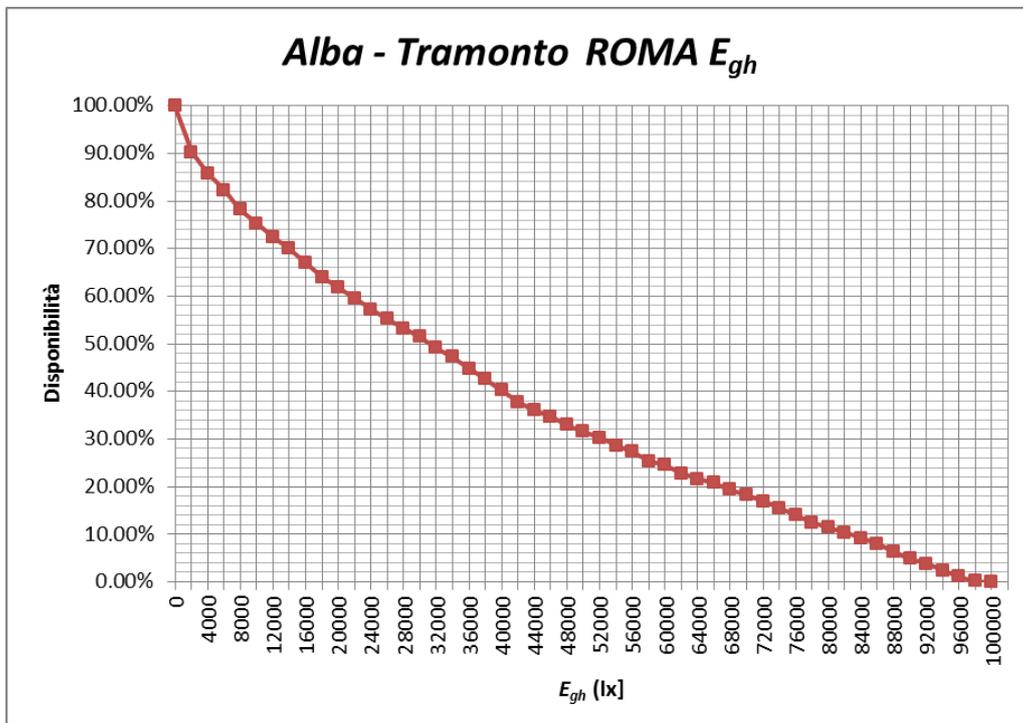


Figura 18. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Roma.

**PALERMO**

Finestra temporale “Alba-Tramonto” – anno intero –

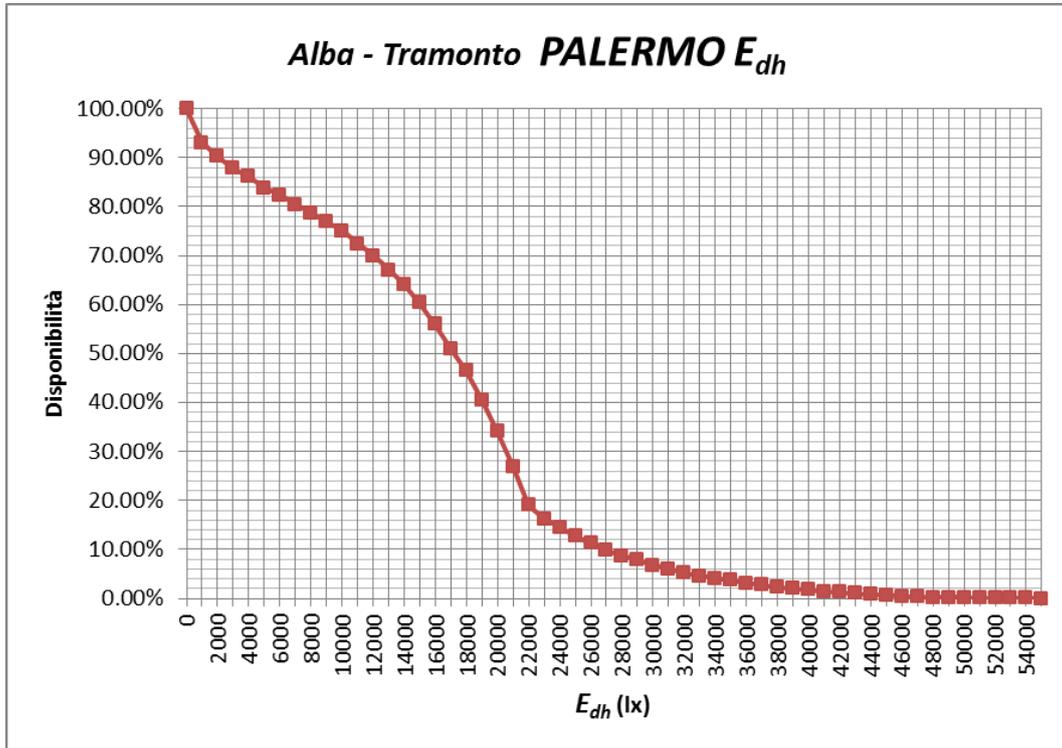


Figura 19. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Palermo.

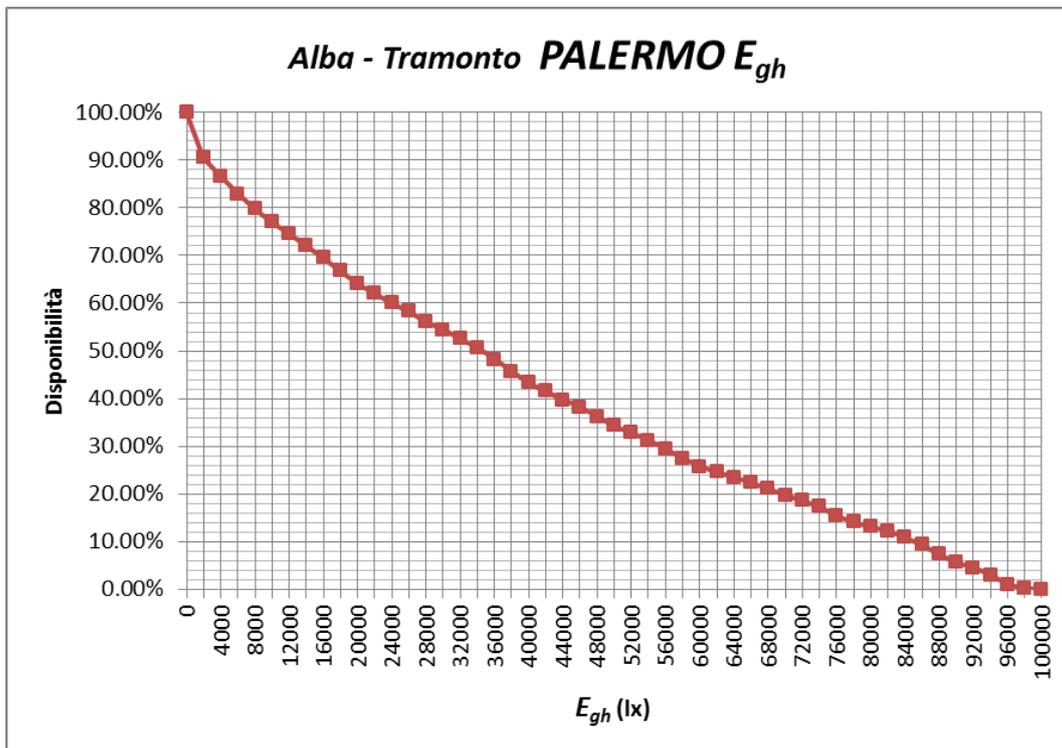


Figura 20. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Palermo.

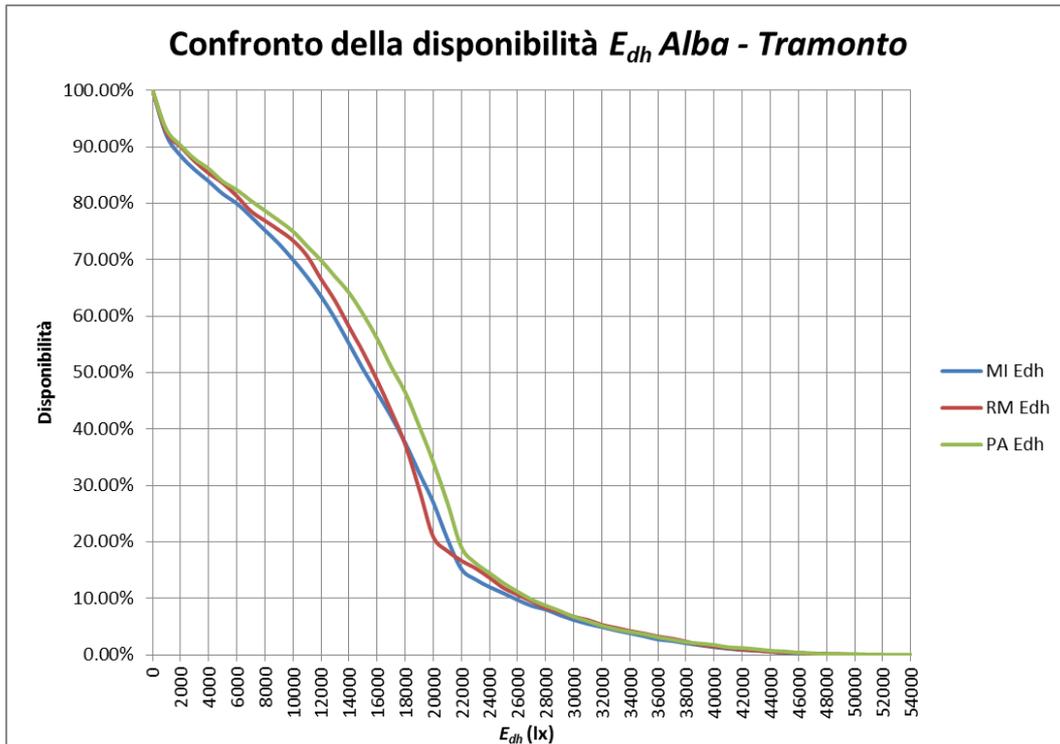


Figura 21. Grafico delle disponibilità percentuali di  $E_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno MI – RM - PA.

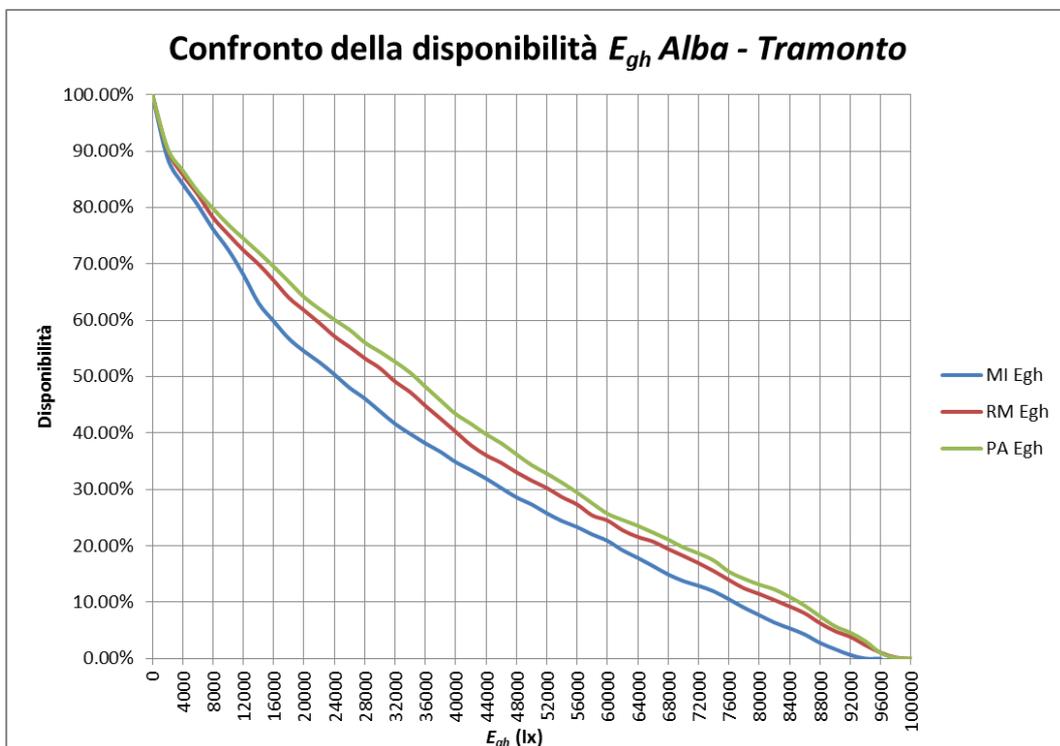


Figura 22. Grafico delle disponibilità percentuali di  $E_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno MI – RM - PA.

La figura seguente mostra le differenze algebriche della disponibilità (*in punti percentuali e non in percentuale!*) tra l'alba e il tramonto considerando come riferimento la località che appare la più "luminosa", cioè, nella fattispecie, Palermo.

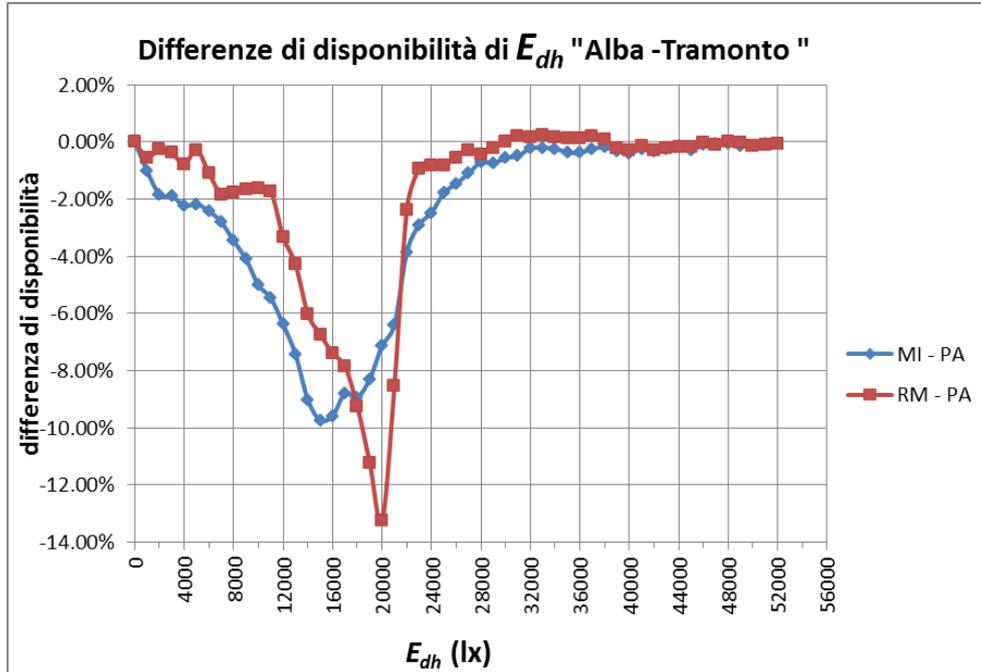


Figura 23. Grafico delle differenze di disponibilità di  $E_{dh}$  "Alba - Tramonto" MI - RM - PA.

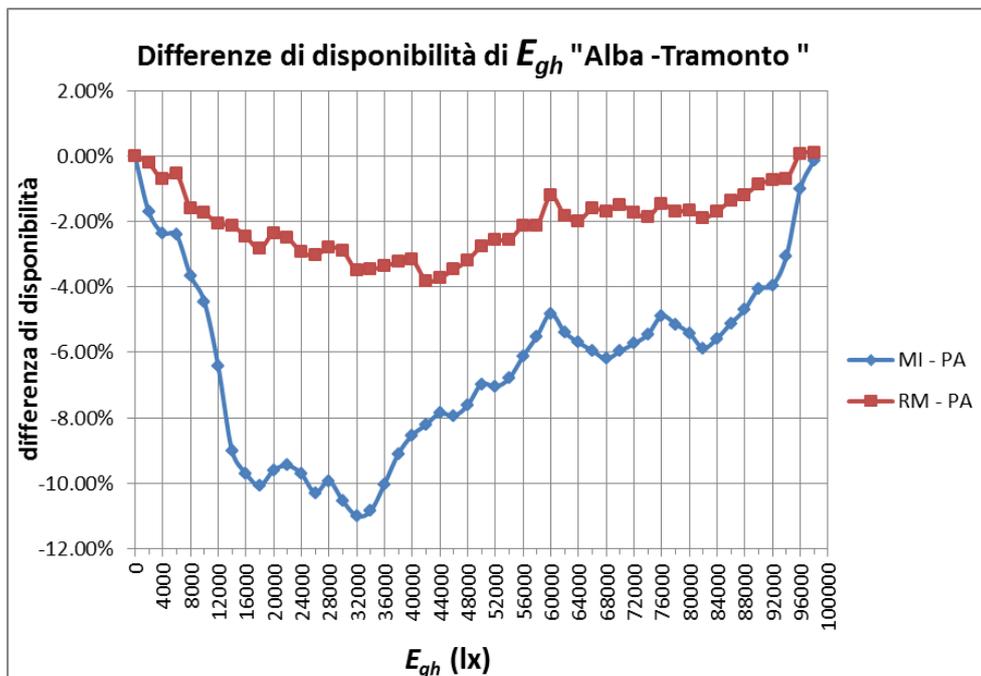


Figura 24. Grafico delle differenze di disponibilità di  $E_{gh}$  "Alba - Tramonto" MI - RM - PA.

Le differenze sono essenzialmente negative, tranne azzerarsi per i valori estremi d'illuminamento, e più regolari per l'illuminamento globale. La componente diffusa presenta picchi negativi nel campo 10000 ÷ 22000 lx, quello più interessante per i calcoli illuminotecnici, connessi con le diverse condizioni di nuvolosità e diffusività dell'atmosfera delle località considerate.

È interessante vedere come sono distribuite le grandezze radiometriche corrispondenti a quelle fotometriche in precedenza considerate.

Riportiamo le curve di disponibilità (Milano) dell'irradianza diffusa  $I_{dh}$  e dell'irradianza globale  $I_{gh}$  sul piano orizzontale così come determinate con l'algoritmo ENEA dall'anno meteorologico tipico per la radiazione, usando gli anni 2006 ÷ 2014:

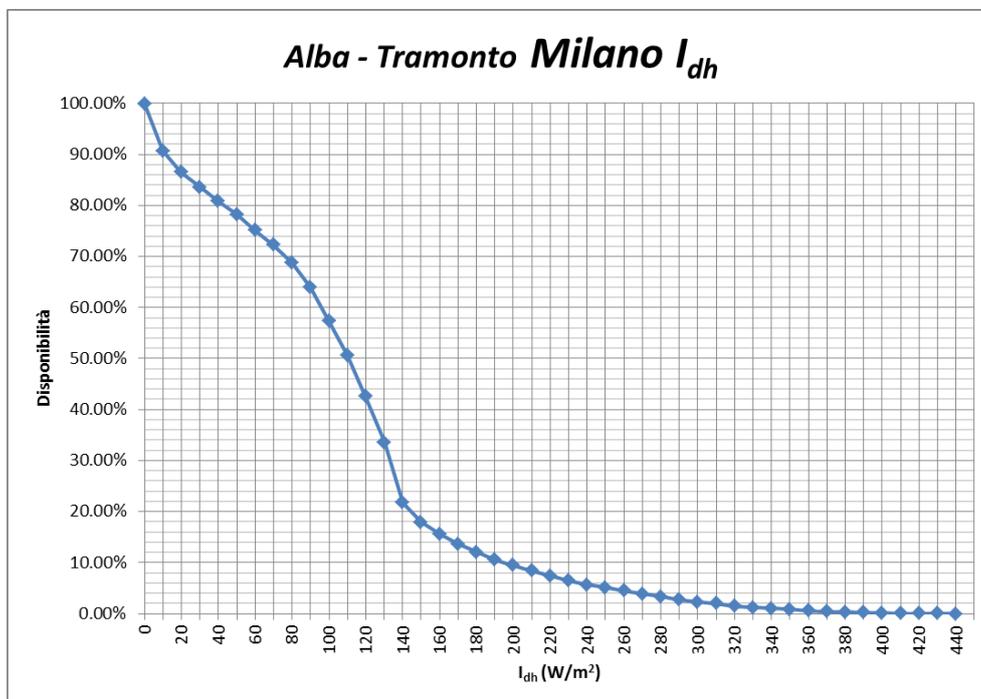


Figura 25. Grafico della disponibilità percentuale di  $I_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

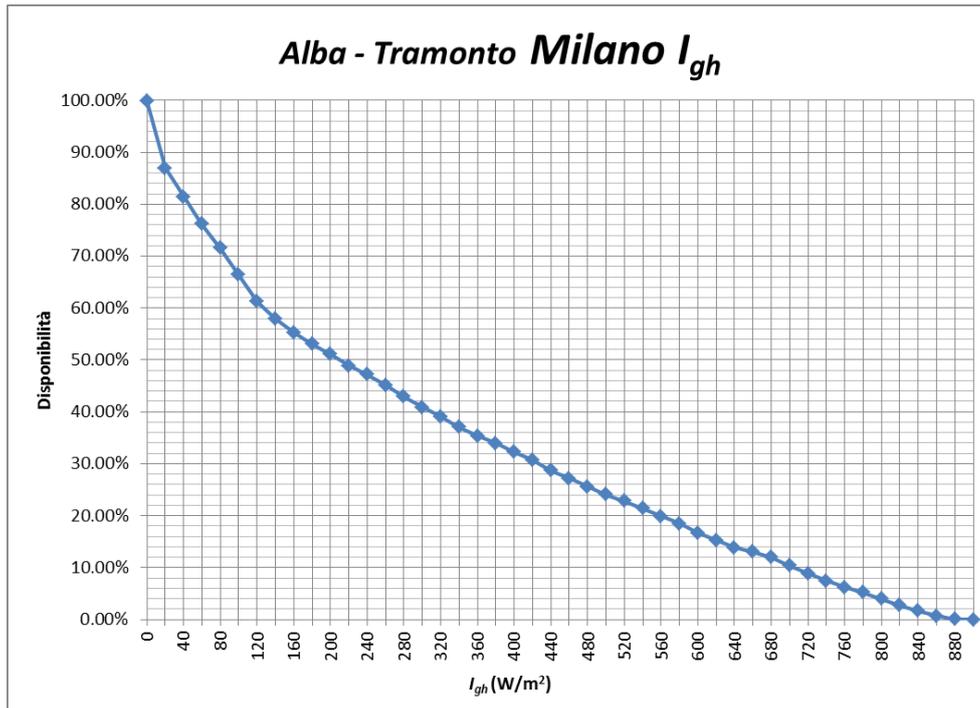


Figura 26. Grafico della disponibilità percentuale di  $I_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

L'andamento delle grandezze fotometriche corrispondenti appare analogo ma la loro differente misura rende non immediato il confronto.

Il rapporto di scala tra grandezze radiometriche e fotometriche è, infatti, intorno a  $100 \frac{lm}{W}$ , corrispondente all'efficacia luminosa  $\eta$  media.

Per un confronto significativo è opportuno allora normalizzare le grandezze rispetto, per esempio, al loro valore massimo, come riportato nella figura seguente:

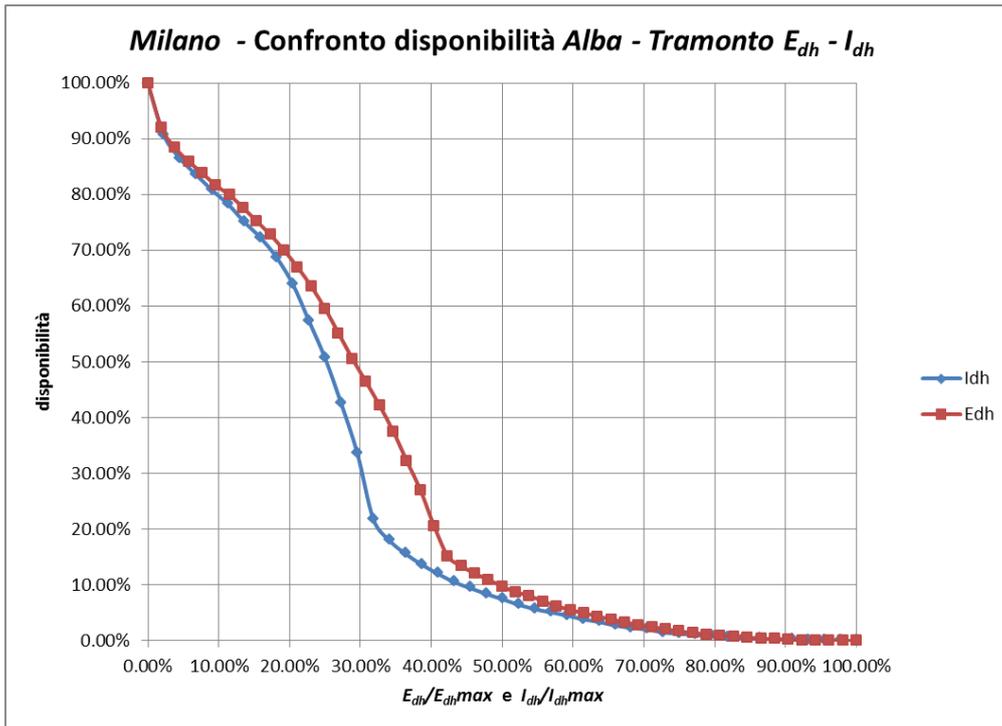


Figura 27. Grafico della disponibilità di  $E_{dh}$  e  $I_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

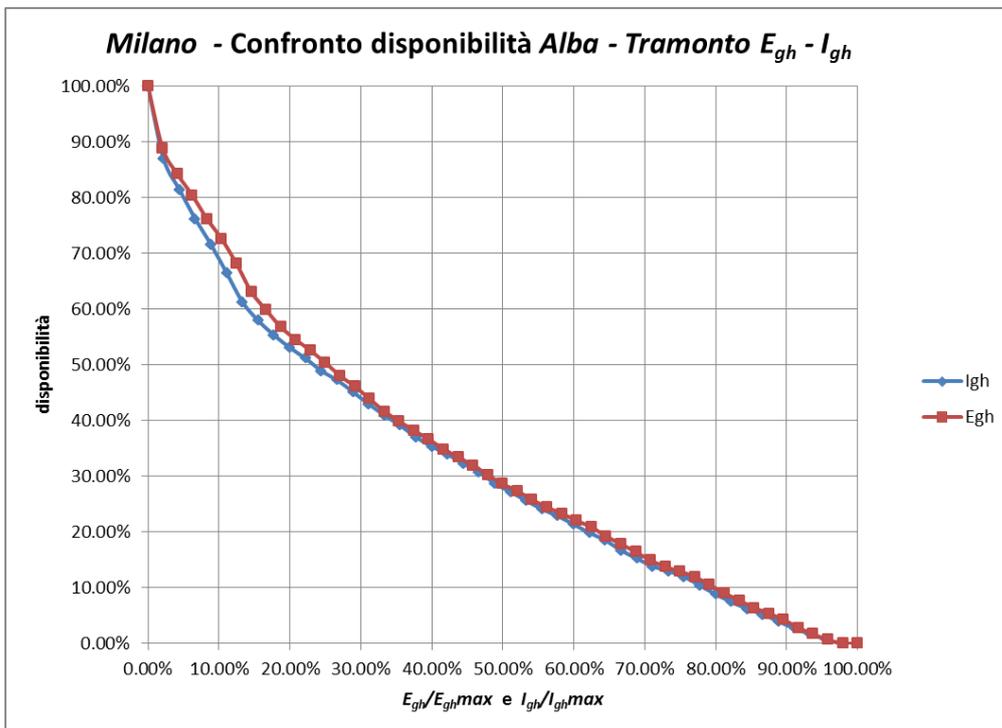


Figura 28. Grafico della disponibilità di  $E_{gh}$  e  $I_{gh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

Le differenze maggiori (a parità di frazione del valore massimo delle grandezze corrispondono disponibilità differenti) si hanno per  $I_{dh}$  e  $E_{dh}$  tra il 20 % e il 40% dei loro valori massimi, mentre tra lo 0% e il 20% e il

40% e il 100%, le differenze si attenuano: ciò dipende, essenzialmente, dall'accentuata variazione dell'efficacia luminosa  $\eta$  nella zona centrale rispetto alle zone periferiche. Naturalmente anche le distribuzioni di  $I_{gh}$  e  $E_{gh}$  divergono, pur se in misura inferiore.

Questo fatto occorre per tutti i modelli a efficacia luminosa variabile nei quali questa dipende, tra l'altro, dall'altezza del Sole sull'orizzonte. I modelli a efficacia luminosa costante non presentano questo comportamento poiché il passaggio da grandezze radiometriche a grandezze fotometriche è semplicemente un cambiamento di scala che, manifestamente, non può influire sulla funzione di ripartizione (disponibilità) delle grandezze stesse.

A titolo di esempio si riporta il grafico delle curve di disponibilità per  $E_{dh}$  ottenute con il modello a efficacia luminosa costante di Cucumo & altri a partire, naturalmente, dalla stessa distribuzione di  $I_{dh}$ .

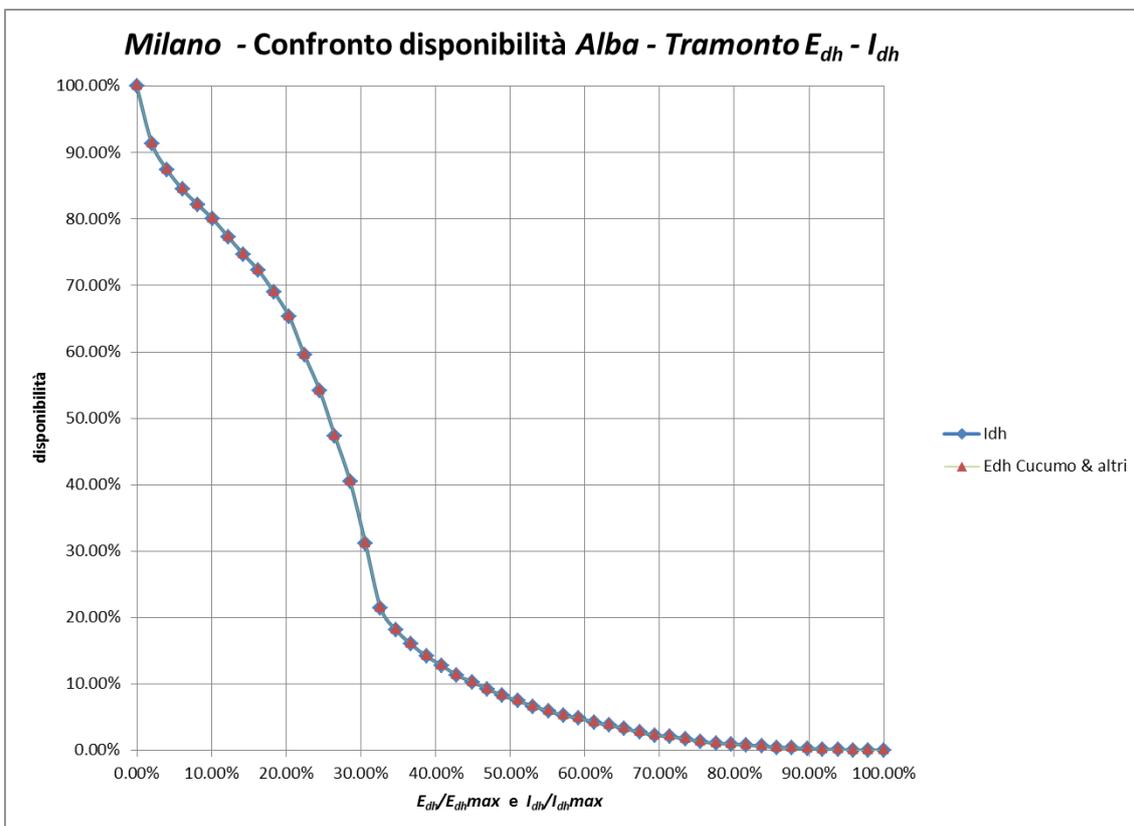


Figura 29. Grafico della disponibilità di  $E_{dh}$  e  $I_{dh}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano (modello a efficacia luminosa costante).

### 3.6 Istogrammi dell'illuminamento diffuso orario medio mensile $E_{dh,omm}$ "Alba - Tramonto" per le località selezionate

In alternativa alle curve di Dresler si possono avere informazioni equivalenti per la stima del contributo dell'illuminazione naturale all'illuminamento interno calcolando l'illuminamento diffuso orario medio mensile  $E_{dh,omm}$  dal data base dell'AMTIN per la località selezionata.

#### MILANO

#### Finestra temporale "Alba-Tramonto" – anno intero –

mese	$E_{dh,omm}$ [lx]
gen	9736
feb	11978
mar	14362
apr	16484
mag	17762
giu	18570
lug	17437
ago	16914
set	15934
ott	13661
nov	10162
dic	8714

Tabella 2. Valori di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

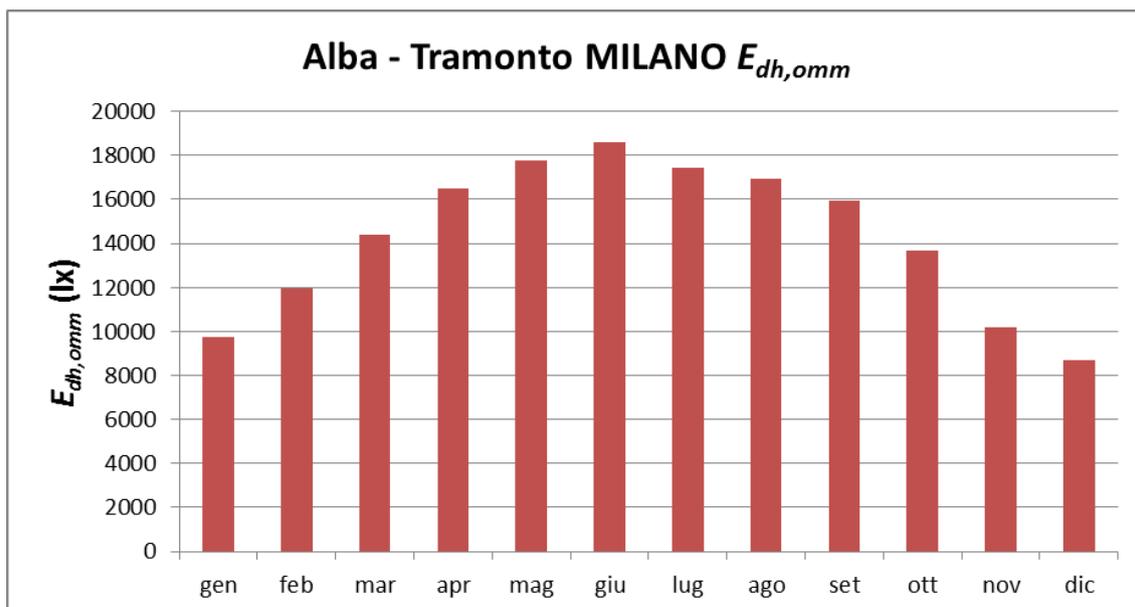


Figura 30. Istogramma di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Milano.

**ROMA**

**Finestra temporale “Alba-Tramonto” – anno intero –**

mese	$E_{dh,omm}$ [lx]
gen	10891
feb	12734
mar	16319
apr	17037
mag	17995
giu	17239
lug	15581
ago	15812
set	16988
ott	15768
nov	11763
dic	10538

Tabella 3. Valori di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Roma.

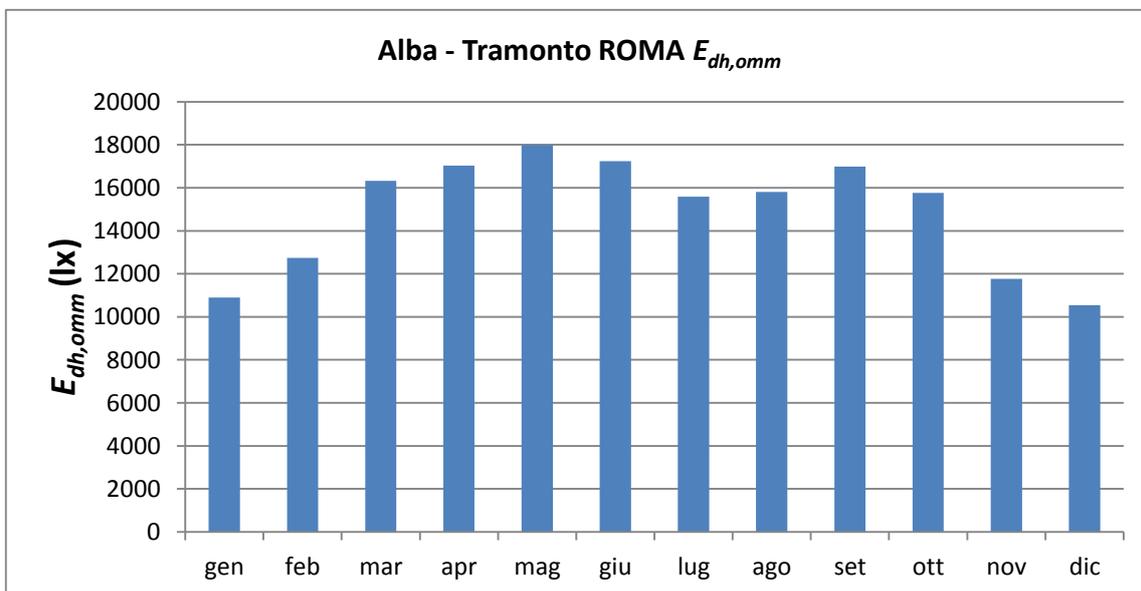


Figura 31. Istogramma di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Roma.

**PALERMO**

**Finestra temporale “Alba-Tramonto” – anno intero –**

mese	$E_{dh,omm}$ [lx]
gen	12393
feb	15576
mar	16367
apr	17989
mag	17389
giu	17533
lug	17639
ago	16746
set	18177
ott	16668
nov	14007
dic	11691

Tabella 4. Valori di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Palermo.

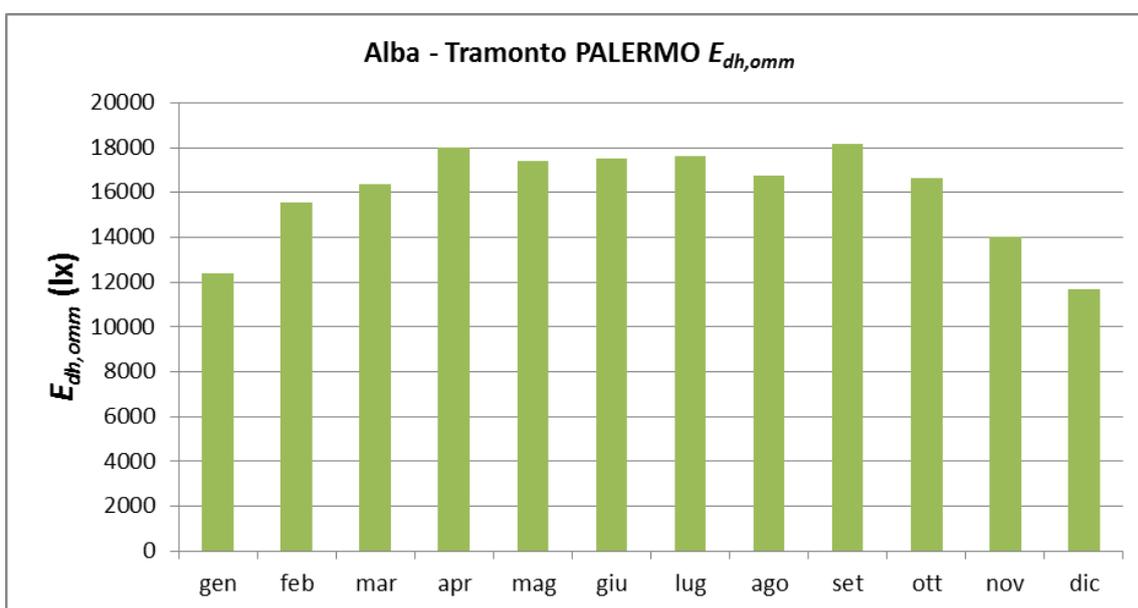


Figura 32. Istogramma di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per Palermo.

Nella figura seguente è presentato un utile raffronto dell'illuminamento orario medio mensile per le tre località.

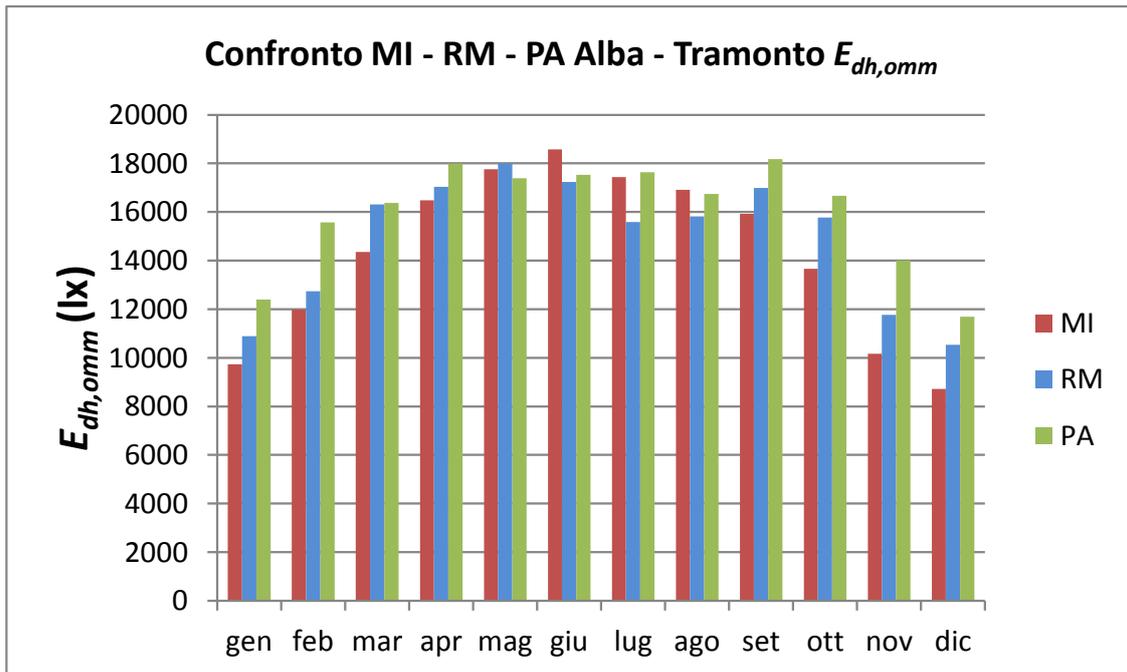


Figura 33. Confronto degli Istogrammi di  $E_{dh,omm}$  tra l'alba e il tramonto per l'intero anno per MI – RM - PA.

Ricordando come l'aver costruito anni meteorologici tipici, composti dagli 8760 valori orari dell'illuminamento, per qualsiasi località del territorio nazionale, consenta di determinare la disponibilità sotto la forma sia di diagrammi di Dresler sia di istogrammi dei valori di illuminamento di interesse e come sia possibile definire in una qualsivoglia maniera sia la finestra temporale che il periodo complessivo di tempo di osservazione, riportiamo i risultati ottenuti, sempre per le tre località selezionate, per una finestra temporale adattata all'orario di un'attività scolastica che si svolga tra le ore 8:00 e le ore 16:00 per l'intero anno escludendo però il periodo delle vacanze scolastiche .

### 3.7 Curve di disponibilità (Dresler) "8 – 16"- Edificio scolastico - per le località selezionate

Per questo profilo di attività si avrà, quindi:

$$t_{Day} = 8h$$

$$T = 2250h$$

$$R_T = \frac{T}{8760} = 0.257$$

Anche in tal caso il valore di  $T$  non risente delle variazioni in latitudine e longitudine delle località.

## MILANO

Edificio scolastico - Finestra temporale "8 - 16" – anno intero, vacanze escluse –

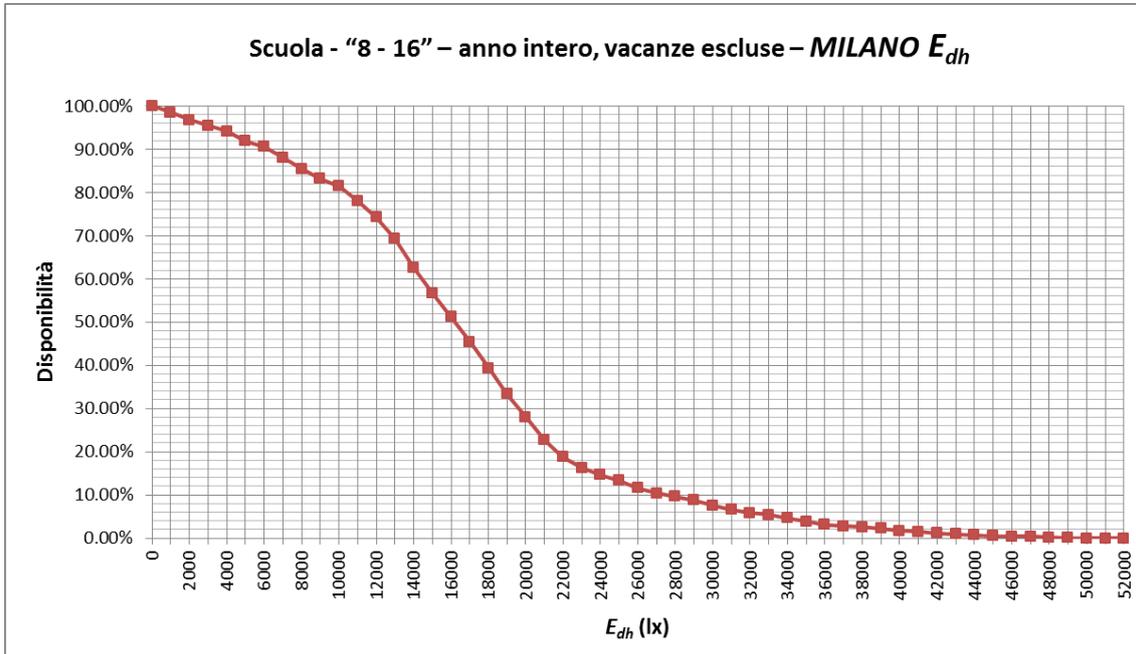


Figura 34. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra 8:00 e 16:00 per l'intero anno per le scuole di Milano.

## ROMA

Edificio scolastico - Finestra temporale "8 - 16" – anno intero, vacanze escluse –

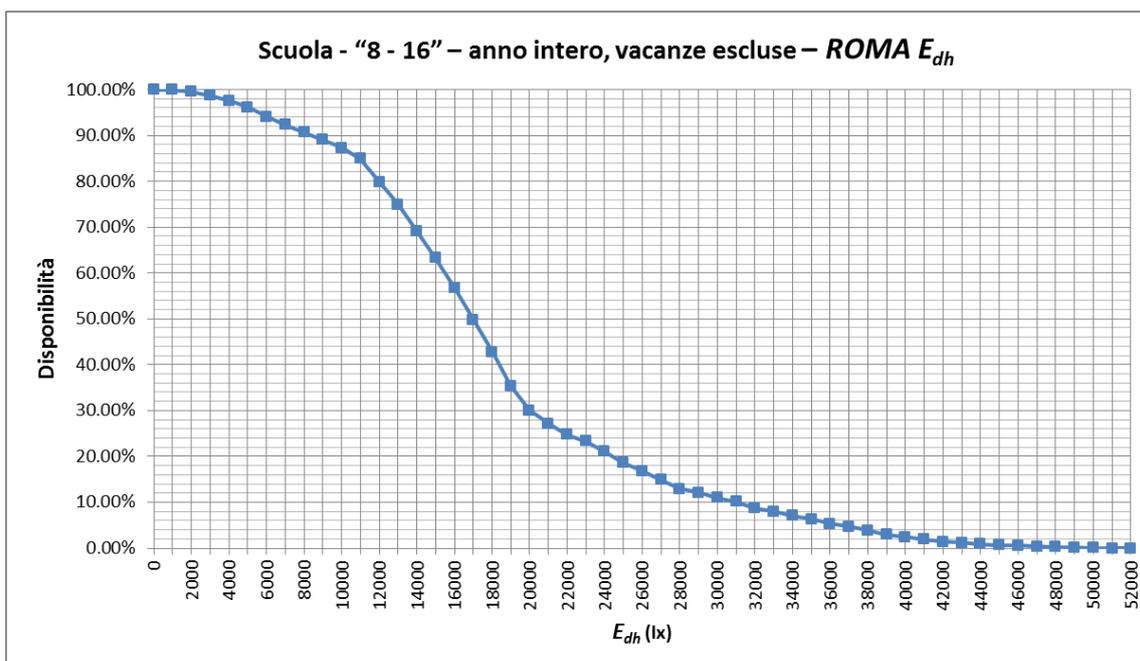


Figura 35. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra 8:00 e 16:00 per l'intero anno per le scuole di Roma.

**PALERMO**

**Edificio scolastico - Finestra temporale "8 - 16" – anno intero, vacanze escluse –**

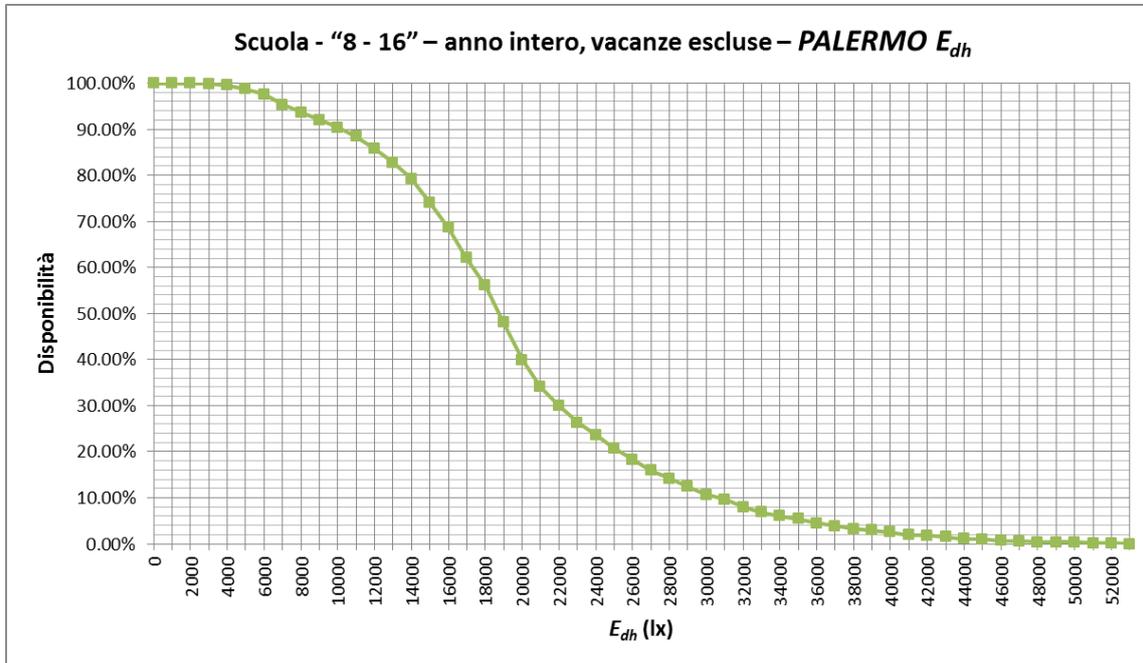


Figura 36. Grafico della disponibilità percentuale di  $E_{dh}$  tra 8:00 e 16:00 per l'intero anno per le scuole di Palermo.

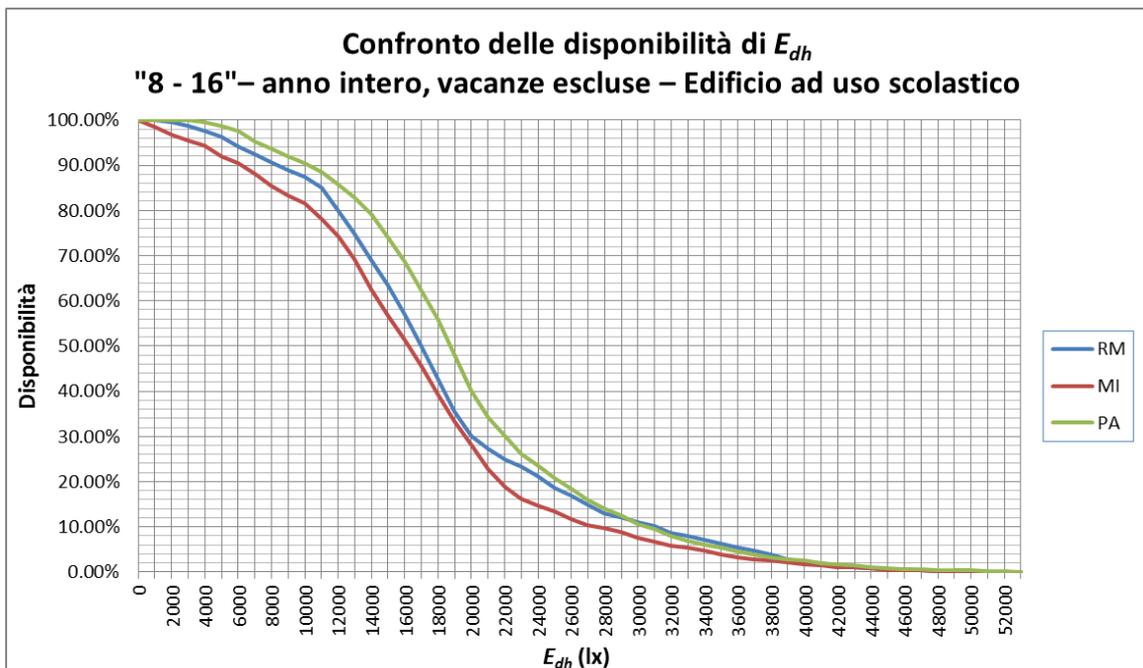


Figura 37. Grafico delle disponibilità percentuali di  $E_{dh}$  "8 - 16" per l'intero anno per le scuole di MI - RM - PA.

### 3.8 Istogrammi dell'illuminamento diffuso medio mensile $E_{dh,omm}$ "8 – 16"- Edificio scolastico - per le località selezionate

Per la stessa finestra temporale presentiamo nel seguito la rappresentazione in istogrammi dell'illuminamento diffuso orario medio mensile,  $E_{dh,omm}$ , parallela e complementare a quella costituita dalle curve di disponibilità di Dresler:

mese	$E_{dh,omm}$ [lx]		
	MI	RM	PA
gen	10697	12025	14962
feb	14262	15791	19496
mar	18192	20614	20649
apr	21117	22147	23282
mag	23735	23273	22648
giu	24512	22800	21706
lug	22658	20071	22105
ago	21841	20060	21349
set	20003	21458	22709
ott	16134	19240	20723
nov	11827	14240	16822
dic	9675	11967	14238

Tabella 5. Valori di  $E_{dh,omm}$  "8 – 16" per l'intero anno per le scuole di MI – RM - PA

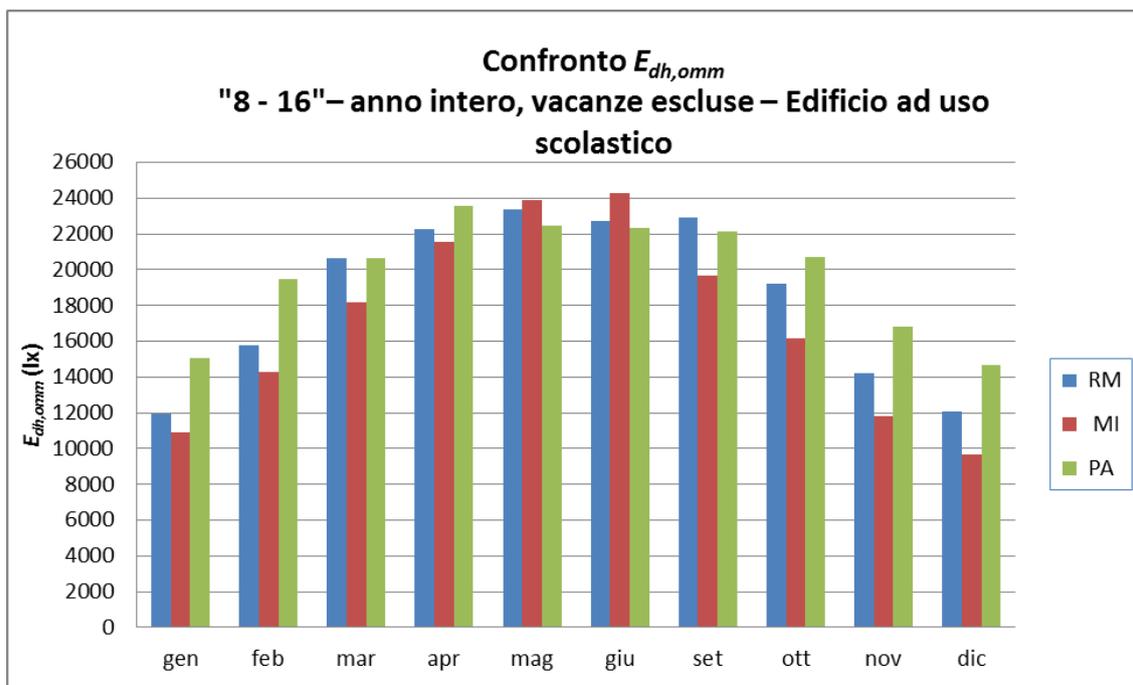


Figura 38. Confronto degli Istogrammi di  $E_{dh,omm}$  "8 – 16" per l'intero anno per le scuole di MI – RM - PA.

### 3.9 Confronto delle curve di disponibilità per le due finestre temporali

Al cambiare della finestra temporale giornaliera scelta per filtrare il vettore dei dati orari d'illuminamento (AMTIN) e del tempo di osservazione, la disponibilità d'illuminamento cambia: a titolo di esempio riportiamo le curve di disponibilità per  $E_{dh}$  valutate per due finestre temporali giornaliere in Roma.

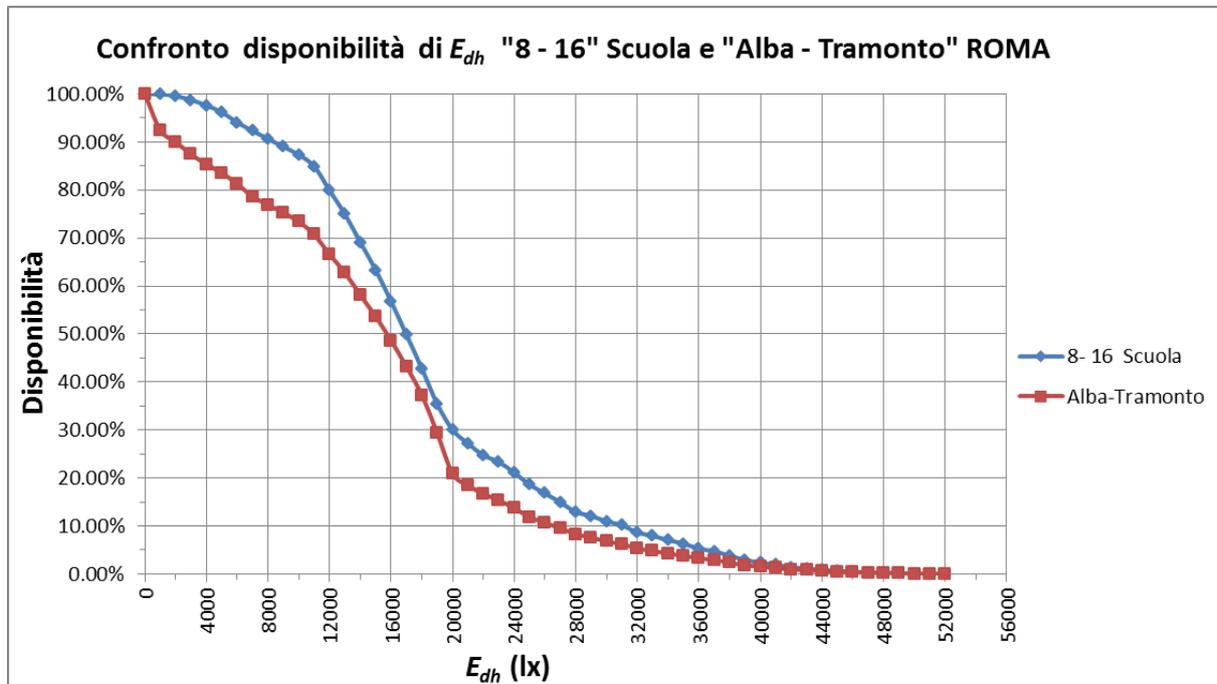


Figura 39. Confronto delle disponibilità di  $E_{dh}$  "8 - 16" per l'intero anno per le scuole, vacanze escluse e "Alba - Tramonto" intero anno per RM.

Consideriamo ora un ambiente avente, in punto specificato, un certo valore del fattore di luce diurna  $FLD$  con una necessità prefissata d'illuminamento interno su piano orizzontale.

Sarà, di conseguenza, determinato il livello d'illuminamento diffuso su piano orizzontale esterno  $E_{dh}^*$  richiesto. La disponibilità  $D_E$  di questo livello esterno sarà però diversa a seconda che si consideri una finestra giornaliera o l'altra. Anche il tempo di osservazione  $T$ , nei due casi, sarà diverso. Si potrà scrivere, per il numero di ore  $\tau$  di disponibilità di  $E_{dh}^*$  per le due finestre:

$$\tau_{8-16} = D_{E,8-16} \cdot T_{8-16}$$

$$\tau_{alba-tramonto} = D_{E,alba-tramonto} \cdot T_{alba-tramonto}$$

Considerando, come esempio,  $E_{dh}^* = 12000 \text{ lx}$  si ha, dalla figura precedente,  $D_{E,8-16} = 80\%$  e  $D_{E,alba-tramonto} = 66.6\%$ . Poiché è  $T_{8-16} = 2250h$  e  $T_{alba-tramonto} = 4765h$  si ottiene  $\tau_{8-16} = 1800h$  e  $\tau_{alba-tramonto} = 3173h$ . Sarà necessario ricorrere all'illuminazione artificiale per un tempo  $t = (T - \tau)$  pari a 450 e 1592 ore rispettivamente, con un rapporto dei fabbisogni di energia elettrica di  $\frac{1592}{450} = 3.54$ .

## 4 Conclusioni

I limiti incontrati nell'impiego della norma EN 15193:2007 *"Energy performance of Buildings. Energy requirements for lighting"* per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli ambienti considerando esplicitamente il contributo dell'illuminazione naturale uniti alla mancanza di dati di illuminamento naturale aggiornati e specifici per il territorio nazionale, hanno suggerito l'opportunità di costruire una banca dati georeferenziata delle grandezze di interesse per il calcolo illuminotecnico.

Punto di partenza è stato la disponibilità in ENEA di una mappatura georeferenziata delle grandezze radiometriche della radiazione solare a scala temporale oraria e anche di frazione di ora. Con l'impiego di modelli di *efficacia luminosa*, reperiti in letteratura, è stato possibile trasformare le grandezze radiometriche disponibili nelle grandezze fotometriche di interesse che sono state successivamente elaborate e presentate sotto le forme necessarie per il calcolo dei valori di illuminamento di ambienti interni indotto dalla luce naturale.

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.

Seguendo l'ormai stabile orientamento in ambiente internazionale per quanto riguarda l'organizzazione dei dati climatici, sono stati costruiti e presentati *Anni meteorologici tipici d'illuminamento naturale (AMTIN)*, costituiti da vettori di dati orari d'illuminamento su piano orizzontale globale e diffuso per tre località (Milano, Roma, Palermo); l'estensione all'intero territorio nazionale è immediata.

Il rapporto contiene inoltre una serie di elaborazioni dei dati orari che, attraverso la definizione di opportune finestre temporali, possono essere utilizzate per il calcolo dei requisiti energetici per l'illuminazione artificiale. A titolo di esempio sono costruite le curve di disponibilità di luce naturale per il periodo "alba-tramonto" e per la finestra oraria "8-16", tipica degli edifici scolastici. La possibilità di definire degli orari di funzionamento consentirà al metodo di calcolo alternativo di essere efficacemente utilizzato in condizioni di esercizio standard e per diagnosi energetiche, applicando il calcolo agli effettivi orari di funzionamento dell'edificio in esame.

Sviluppo successivo del lavoro sarà di verificare e adattare i modelli di efficacia luminosa di letteratura impiegati o di identificarne uno nuovo, specifico per la situazione climatologica nazionale, mediante il confronto diretto tra le misure radiometriche della radiazione solare e le misure fotometriche di illuminamento globale e diffuso ottenute da apposita strumentazione (luxmetro) in tre stazioni già individuate: Milano, Roma e Lampedusa.

Proseguirà, inoltre, il lavoro di sviluppo del metodo di calcolo alternativo, proposto da ENEA, per la valutazione del fabbisogno energetico per l'illuminazione interna degli ambienti basato sui dati dell'AMTIN.

Tale metodo sarà proposto, dopo la conclusione della presente linea di ricerca, per la revisione della citata norma EN 15193:2007 e sarà utilizzabile dal Ministero dello Sviluppo Economico per individuare i limiti e i requisiti per il servizio energetico "illuminazione artificiale" negli ambienti ai fini dell'attestato di prestazione energetica (APE) degli edifici.

## Appendice 1 Irradianza extraatmosferica su piano orizzontale

L'irradianza extraatmosferica su piano orizzontale (*Extraterrestrial Horizontal Irradiance*, EHI) è per definizione l'irradianza solare che incide sulla giacitura orizzontale alla sommità dell'atmosfera o, che è lo stesso, quella che si avrebbe al suolo qualora si prescindesse dall'attenuazione della radiazione solare durante il suo attraversamento dello strato atmosferico che avvolge la Terra. Dipende dalla potenza irradiante del Sole (ovviamente), dalla distanza variabile Sole-Terra e dall'angolo d'inclinazione dei raggi solari. Si calcola con la seguente espressione:

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos \vartheta_z \quad (31)$$

Dove:

$I_{sc}$  è la *costante solare*, il cui valore è:  $I_{sc} = 1367 \text{ W m}^{-2}$ ;

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

$$E_0 = (r_0/r)^2 \quad (32)$$

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

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

$$I_{0n} = I_{sc} E_0 \quad (33)$$

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

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

In letteratura, sono disponibili espressioni o tabelle di  $E_0$  (in funzione del giorno dell'anno) e di  $\cos \vartheta_z$  (in funzione del giorno dell'anno e del momento della giornata); a questo proposito, si veda [32]

## Appendice 2 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:

$$m_0 = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \quad (34)$$

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).

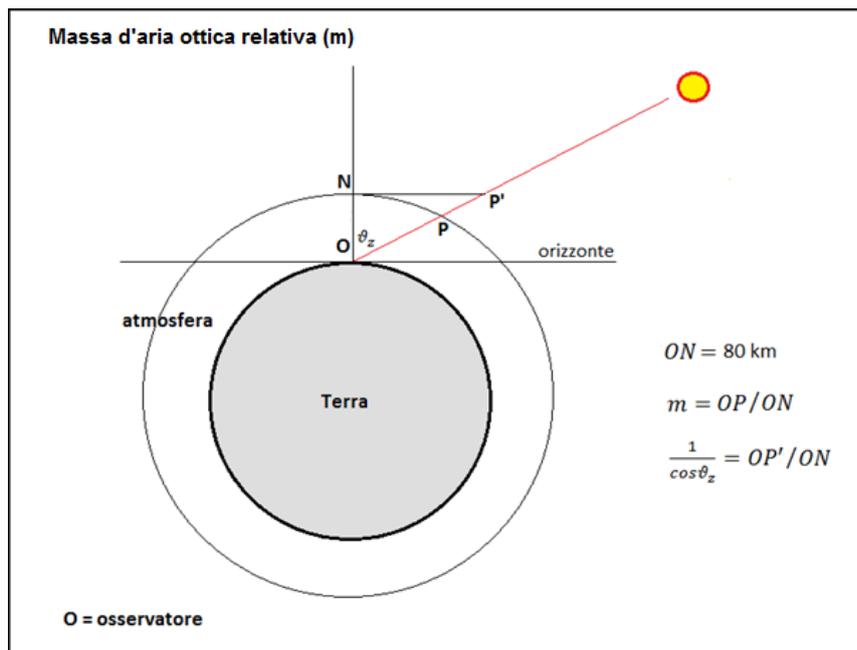


Figura 40. Massa d'aria ottica relativa

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

$$m_0 = \sqrt{1229 + (614 \cdot \cos \vartheta_z)^2} - 614 \cdot \cos \vartheta_z \quad (35)$$

(il rapporto fra i segmenti OP/ON di figura 11). Va detto che per angoli zenitali prossimi a  $90^\circ$ , 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, [29,30]), hanno trovato la seguente espressione:

$$m_0 = \frac{1}{\sin h_s + \frac{0.50572}{(h_s + 6.07995)^{1.6364}}} \quad (36)$$

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:  $h_s = 90 - \vartheta_z$ . Pertanto è pure:  $\sin h_s = \cos \vartheta_z$ .

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 [31]:

$$m = m_0 \exp(-h/8446) \quad (37)$$

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

## Appendice 3 Tabelle del modello dell'efficacia luminosa di Perez

I valori dell'indice di serenità sono stati discretizzati da Perez in 8 intervalli (classi), il primo dei quali corrisponde a condizioni di cielo completamente coperto, mentre l'ottavo a quelle di cielo sereno. Le situazioni di copertura nuvolosa intermedie corrispondono alle classi da 2 a 7:

Classe	Intervallo	
1	$1 \leq \varepsilon < 1.065$	Cielo completamente coperto
2	$1.065 \leq \varepsilon < 1.23$	
3	$1.23 \leq \varepsilon < 1.5$	
4	$1.5 \leq \varepsilon < 1.95$	
5	$1.95 \leq \varepsilon < 2.8$	
6	$2.8 \leq \varepsilon < 4.5$	
7	$4.5 \leq \varepsilon < 6.2$	
8	$\varepsilon \geq 6.2$	Cielo sereno

**Tabella 6. Classi dell'indice di serenità di Perez.**

La tabella che segue fornisce, tabellati in funzione della classe in cui cade l'indice di serenità, i coefficienti da introdurre nelle equazioni (20) per il calcolo delle efficacie luminose secondo il modello di Perez:

Global luminous Efficacy					Direct Luminous Efficacy			
$\varepsilon$ bin	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
1	96.63	-0.47	11.50	-9.16	57.20	-4.55	-2.98	117.12
2	107.54	0.79	1.79	-1.19	98.99	-3.46	-1.21	12.38
3	98.73	0.70	4.40	-6.95	109.83	-4.90	-1.71	-8.81
4	92.72	0.56	8.36	-8.31	110.34	-5.84	-1.99	-4.56
5	86.73	0.98	7.10	-10.94	106.36	-3.97	-1.75	-6.16
6	88.34	1.39	6.06	-7.60	107.19	-1.25	-1.51	-26.73
7	78.63	1.47	4.93	-11.37	105.75	0.77	-1.26	-34.44
8	99.65	1.86	-4.46	-3.15	101.18	1.58	-1.10	-8.29

Diffuse Luminous Efficacy				
$\varepsilon$ bin	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
1	97.24	-0.46	12.00	-8.91
2	107.22	1.15	0.59	-3.95
3	104.97	2.96	-5.53	-8.77
4	102.39	5.59	-13.95	-13.90
5	100.71	5.94	-22.75	-23.74
6	106.42	3.83	-36.15	-28.83
7	141.88	1.90	-53.24	-14.03
8	152.23	0.35	-45.27	-7.98

**Tabella 7. Coefficienti del modello di Perez per l'efficacia luminosa.**

Fonte: tabella scannerizzata dal lavoro di Perez et al. [24]

## Appendice 4 Anno meteorologico tipico per l'illuminamento naturale (esempio)



**ENEA** – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile  
**UTRINN** – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
**PCI** – Laboratorio Progettazione Componenti e Impianti

### Anno tipico - illuminamento solare

*Fonte dei dati: immagini satellitari*

Località: Roma

*Coordinate geografiche*

latitudine 41°54.4' Nord  
 longitudine 12°29.3' Est da Greenwich

*Anni utilizzati: 2006-2014*

*Significato dei simboli e delle locuzioni*

Egh	illuminamento (medio) globale su piano orizzontale
Edh	illuminamento (medio) diffuso su piano orizzontale
Ebn	illuminamento (medio) diretto normale
Da(GMT) a(GMT)	intervallo orario a cui sono riferiti i valori medi delle grandezze. Le ore sono espresse secondo il Tempo medio di Greenwich (GMT) che, rispetto all'ora adottata in Italia (Fuso orario dell'Europa Centrale) differisce: - di un'ora in meno in inverno (le 12:00 di GMT corrispondono alle 13:00 italiane) - di due ore in meno nel periodo dell'ora legale (quello estivo, per cui: le 12:00 GMT corrispondono alle 14:00 italiane)
Ora(GMT)	istante CENTRALE dell' intervallo orario a cui sono riferiti i valori medi delle grandezze L'ora è espressa secondo il Tempo medio di Greenwich (GMT)
CoStz	valore (medio orario) dell'angolo zenitale
Time	numero di secondi in cui il Sole è sopra l'orizzonte. Vale: - 3600 per gli intervalli orari diurni - 0 per gli intervalli orari notturni - un valore intermedio per gli intervalli orari crepuscolari in cui cade l'alba o il tramonto

*luglio 2015*

*Modello di stima per la radiazione solare: HE08k/39st*

*Modello per la stima degli illuminamenti naturali: Robledo & Soler, 2001*

**Figura 41. AMTIN: scheda d'intestazione**

Ora(Nr)	Giorno	Da(GMT)	a(GMT)	Egh [lx]	Edh [lx]	Ebn [lx]	CosTz	Time(s)
1	01-gen	00:00:00	01:00:00	0	0	0	0	0
2	01-gen	01:00:00	02:00:00	0	0	0	0	0
3	01-gen	02:00:00	03:00:00	0	0	0	0	0
4	01-gen	03:00:00	04:00:00	0	0	0	0	0
5	01-gen	04:00:00	05:00:00	0	0	0	0	0
6	01-gen	05:00:00	06:00:00	0	0	0	0	0
7	01-gen	06:00:00	07:00:00	373	367	218	0.02351	1033
8	01-gen	07:00:00	08:00:00	7107	6769	2518	0.12281	3600
9	01-gen	08:00:00	09:00:00	19561	12134	26320	0.25577	3600
10	01-gen	09:00:00	10:00:00	33713	12942	59192	0.35347	3600
11	01-gen	10:00:00	11:00:00	33582	21271	30340	0.40925	3600
12	01-gen	11:00:00	12:00:00	35154	19561	36983	0.41932	3600
13	01-gen	12:00:00	13:00:00	23922	21765	5451	0.38298	3600
14	01-gen	13:00:00	14:00:00	14518	14046	1649	0.30271	3600
15	01-gen	14:00:00	15:00:00	11029	10366	3489	0.18399	3600
16	01-gen	15:00:00	16:00:00	2310	2240	994	0.0578	2587
17	01-gen	16:00:00	17:00:00	0	0	0	0	0
18	01-gen	17:00:00	18:00:00	0	0	0	0	0
19	01-gen	18:00:00	19:00:00	0	0	0	0	0

4443	05-lug	02:00:00	03:00:00	0	0	0	0	0
4444	05-lug	03:00:00	04:00:00	316	307	426	0.02056	883
4445	05-lug	04:00:00	05:00:00	8263	6849	9494	0.12836	3600
4446	05-lug	05:00:00	06:00:00	24353	13158	34810	0.30651	3600
4447	05-lug	06:00:00	07:00:00	44907	16315	58932	0.48146	3600
4448	05-lug	07:00:00	08:00:00	64732	18520	71892	0.6413	3600
4449	05-lug	08:00:00	09:00:00	80715	19518	78895	0.77512	3600
4450	05-lug	09:00:00	10:00:00	91681	19983	82039	0.87382	3600
4451	05-lug	10:00:00	11:00:00	95941	19683	81942	0.93066	3600
4452	05-lug	11:00:00	12:00:00	91675	22433	73490	0.94178	3600
4453	05-lug	12:00:00	13:00:00	90213	20404	76968	0.90641	3600
4454	05-lug	13:00:00	14:00:00	74816	28058	57162	0.82696	3600
4455	05-lug	14:00:00	15:00:00	53711	33582	28624	0.70885	3600
4456	05-lug	15:00:00	16:00:00	50336	18532	56373	0.56013	3600
4457	05-lug	16:00:00	17:00:00	31631	15889	39714	0.39094	3600
4458	05-lug	17:00:00	18:00:00	14596	10697	17115	0.21279	3600
4459	05-lug	18:00:00	19:00:00	2729	2479	3168	0.06129	2597
4460	05-lug	19:00:00	20:00:00	0	0	0	0	0

8741	31-dic	04:00:00	05:00:00	0	0	0	0	0
8742	31-dic	05:00:00	06:00:00	0	0	0	0	0
8743	31-dic	06:00:00	07:00:00	404	394	414	0.02364	1040
8744	31-dic	07:00:00	08:00:00	7650	6998	4830	0.12295	3600
8745	31-dic	08:00:00	09:00:00	15978	14611	5593	0.2556	3600
8746	31-dic	09:00:00	10:00:00	21463	20207	3609	0.35296	3600
8747	31-dic	10:00:00	11:00:00	37020	17085	48159	0.40838	3600
8748	31-dic	11:00:00	12:00:00	40197	14983	60241	0.41809	3600
8749	31-dic	12:00:00	13:00:00	33767	16342	45510	0.38142	3600
8750	31-dic	13:00:00	14:00:00	24737	14652	32940	0.30089	3600
8751	31-dic	14:00:00	15:00:00	11736	10477	6689	0.18197	3600
8752	31-dic	15:00:00	16:00:00	2387	2261	1821	0.05672	2540
8753	31-dic	16:00:00	17:00:00	0	0	0	0	0
8754	31-dic	17:00:00	18:00:00	0	0	0	0	0
8755	31-dic	18:00:00	19:00:00	0	0	0	0	0
8756	31-dic	19:00:00	20:00:00	0	0	0	0	0
8757	31-dic	20:00:00	21:00:00	0	0	0	0	0
8758	31-dic	21:00:00	22:00:00	0	0	0	0	0
8759	31-dic	22:00:00	23:00:00	0	0	0	0	0
8760	31-dic	23:00:00	24:00:00	0	0	0	0	0

Tabella 7. AMTIN: dati orari (stralcio)

Ora(Nr)	Giorno	Ora(GMT)	Egh [lx]	Edh [lx]	Ebn [lx]	CosTz	Time(s)
1	01-gen	00:00:00	0	0	0	0	0
2	01-gen	01:00:00	0	0	0	0	0
3	01-gen	02:00:00	0	0	0	0	0
4	01-gen	03:00:00	0	0	0	0	0
5	01-gen	04:00:00	0	0	0	0	0
6	01-gen	05:00:00	0	0	0	0	0
7	01-gen	06:00:00	0	0	0	0	0
8	01-gen	07:00:00	2773	2683	1161	0.06311	2833
9	01-gen	08:00:00	11637	10918	3621	0.19318	3600
10	01-gen	09:00:00	29119	11305	56737	0.30951	3600
11	01-gen	10:00:00	34299	16890	45522	0.38691	3600
12	01-gen	11:00:00	36435	19613	39944	0.42012	3600
13	01-gen	12:00:00	28733	23355	13040	0.40687	3600
14	01-gen	13:00:00	18721	18179	1506	0.34806	3600
15	01-gen	14:00:00	12850	12114	3130	0.24771	3600
16	01-gen	15:00:00	6481	6186	2345	0.11265	3600
17	01-gen	16:00:00	222	220	148	0.01795	787
18	01-gen	17:00:00	0	0	0	0	0
19	01-gen	18:00:00	0	0	0	0	0
21	01-gen	20:00:00	0	0	0	0	0

-----

4443	05-lug	02:00:00	0	0	0	0	0
4444	05-lug	03:00:00	0	0	0	0	0
4445	05-lug	04:00:00	2921	2644	3390	0.06337	2683
4446	05-lug	05:00:00	15268	10667	19410	0.21707	3600
4447	05-lug	06:00:00	34614	14822	49326	0.39514	3600
4448	05-lug	07:00:00	55144	17582	66314	0.56398	3600
4449	05-lug	08:00:00	73273	19111	75960	0.71208	3600
4450	05-lug	09:00:00	86883	19794	80865	0.82935	3600
4451	05-lug	10:00:00	94642	19882	82356	0.90779	3600
4452	05-lug	11:00:00	94944	19863	79703	0.94206	3600
4453	05-lug	12:00:00	91693	22059	74925	0.92983	3600
4454	05-lug	13:00:00	78957	28500	57640	0.87192	3600
4455	05-lug	14:00:00	65704	29841	45541	0.77229	3600
4456	05-lug	15:00:00	54857	23445	49500	0.63773	3600
4457	05-lug	16:00:00	40767	17629	47976	0.4774	3600
4458	05-lug	17:00:00	22719	13676	28613	0.30223	3600
4459	05-lug	18:00:00	7972	6640	9165	0.12416	3600
4460	05-lug	19:00:00	258	252	362	0.01854	797
4461	05-lug	20:00:00	0	0	0	0	0
4462	05-lug	21:00:00	0	0	0	0	0

-----

8742	31-dic	05:00:00	0	0	0	0	0
8743	31-dic	06:00:00	0	0	0	0	0
8744	31-dic	07:00:00	2988	2816	2207	0.06318	2840
8745	31-dic	08:00:00	12539	11146	7011	0.19317	3600
8746	31-dic	09:00:00	18943	17733	3861	0.30917	3600
8747	31-dic	10:00:00	25885	21003	12170	0.38622	3600
8748	31-dic	11:00:00	43214	13444	71058	0.41906	3600
8749	31-dic	12:00:00	37019	16303	51018	0.40547	3600
8750	31-dic	13:00:00	29197	16229	37060	0.34636	3600
8751	31-dic	14:00:00	18514	12848	20751	0.24577	3600
8752	31-dic	15:00:00	6828	6280	4418	0.11055	3600
8753	31-dic	16:00:00	211	207	254	0.01687	740
8754	31-dic	17:00:00	0	0	0	0	0
8755	31-dic	18:00:00	0	0	0	0	0
8756	31-dic	19:00:00	0	0	0	0	0
8757	31-dic	20:00:00	0	0	0	0	0
8758	31-dic	21:00:00	0	0	0	0	0
8759	31-dic	22:00:00	0	0	0	0	0
8760	31-dic	23:00:00	0	0	0	0	0

Tabella 8. AMTIN: dati orari con intervalli centrati sull'ora esatta HH:00:00 (stralcio)

Giorno	Egh [lx]	Edh [lx]	Ebn [lx]	Alba(GMT)	Tramonto(GMT)
01-gen	7553	5061	6965	6h 43'	15h 43'
02-gen	6202	5478	2082	6h 43'	15h 44'
03-gen	9335	4294	14288	6h 43'	15h 45'
04-gen	9203	4440	13400	6h 43'	15h 46'
05-gen	9586	4199	15261	6h 43'	15h 47'
06-gen	9707	4220	15393	6h 43'	15h 47'
07-gen	9629	4336	14920	6h 43'	15h 48'
08-gen	5771	5135	2047	6h 43'	15h 49'
09-gen	5765	5206	1775	6h 42'	15h 50'
10-gen	2155	2154	3	6h 42'	15h 51'

22-giu	32908	12410	28314	3h 40'	18h 43'
23-giu	34755	10310	33215	3h 40'	18h 43'
24-giu	30276	12447	24343	3h 40'	18h 44'
25-giu	35638	9797	35651	3h 41'	18h 44'
26-giu	23578	13178	12117	3h 41'	18h 44'
27-giu	34096	11254	31669	3h 41'	18h 44'
28-giu	35614	10341	36039	3h 42'	18h 44'
29-giu	36597	9617	38105	3h 42'	18h 44'
30-giu	36051	9670	36948	3h 43'	18h 44'
01-lug	35194	10171	34338	3h 43'	18h 44'
02-lug	33181	11569	30473	3h 44'	18h 44'
03-lug	35909	9853	36335	3h 44'	18h 44'
04-lug	35640	9983	35698	3h 45'	18h 43'
05-lug	34192	11100	32127	3h 45'	18h 43'
06-lug	24772	13643	16702	3h 46'	18h 43'
07-lug	29797	12030	22116	3h 47'	18h 43'
08-lug	33488	11044	30741	3h 47'	18h 42'
09-lug	28673	11240	23476	3h 48'	18h 42'

14-dic	7851	4910	8274	6h 35'	15h 34'
15-dic	6257	4563	4617	6h 36'	15h 35'
16-dic	8959	4378	13313	6h 36'	15h 35'
17-dic	8836	4418	12726	6h 37'	15h 35'
18-dic	8955	4267	13635	6h 38'	15h 35'
19-dic	8653	4496	11850	6h 38'	15h 36'
20-dic	3291	3281	28	6h 39'	15h 36'
21-dic	9026	4205	14008	6h 39'	15h 36'
22-dic	7388	4732	7374	6h 40'	15h 37'
23-dic	8468	4632	10738	6h 40'	15h 37'
24-dic	9034	4181	14088	6h 41'	15h 38'
25-dic	5784	4741	2870	6h 41'	15h 38'
26-dic	3646	3617	91	6h 41'	15h 39'
27-dic	7396	4843	7077	6h 42'	15h 40'
28-dic	7903	4963	8145	6h 42'	15h 40'
29-dic	4338	4164	436	6h 42'	15h 41'
30-dic	3390	3354	99	6h 43'	15h 42'
31-dic	8139	4917	8742	6h 43'	15h 42'

Tabella 9. AMTIN: dati giornalieri (stralcio)

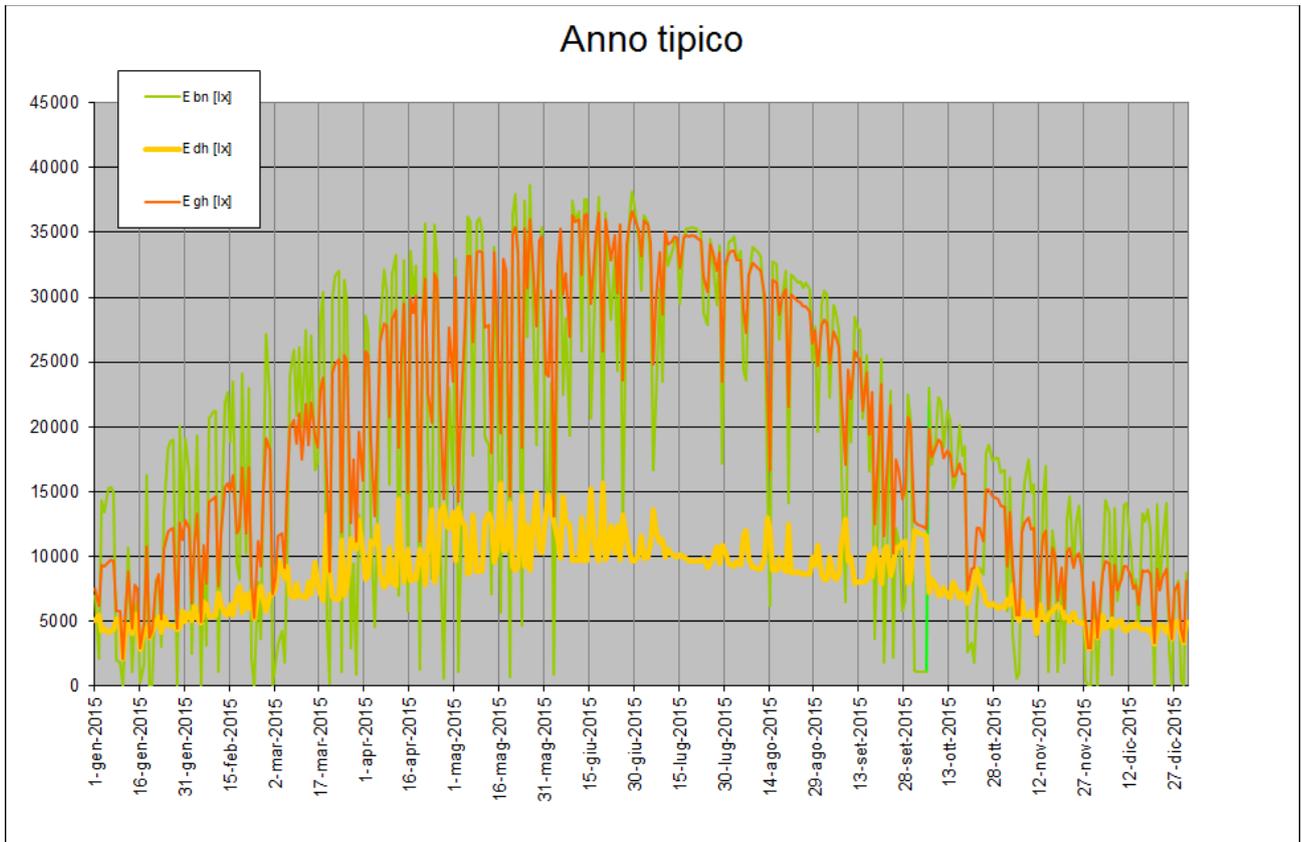


Figura 42. AMTIN: dati giornalieri — andamento annuale

Gen								2013
Feb								2013
Mar			2009					
Apr								2014
Mag								2014
Giu		2007						
Lug	2006							
Ago				2010				
Set				2010				
Ott	2006							
Nov							2012	
Dic								2013

Figura 43. Mesi scelti per la confezione dell'anno tipico

Mese	Egh [lx]	Edh [lx]	Ebn [lx]
Gen	7915	4552	8845
Feb	12403	6178	13529
Mar	17598	8532	16139
Apr	24173	10175	21450
Mag	29027	11295	25163
Giu	32208	11492	28721
Lug	32986	10283	31506
Ago	29267	9691	28671
Set	21024	9367	18689
Ott	14656	7863	13245
Nov	8994	5391	8687
Dic	7435	4490	8300
<b>anno</b>	<b>19843</b>	<b>8283</b>	<b>18608</b>

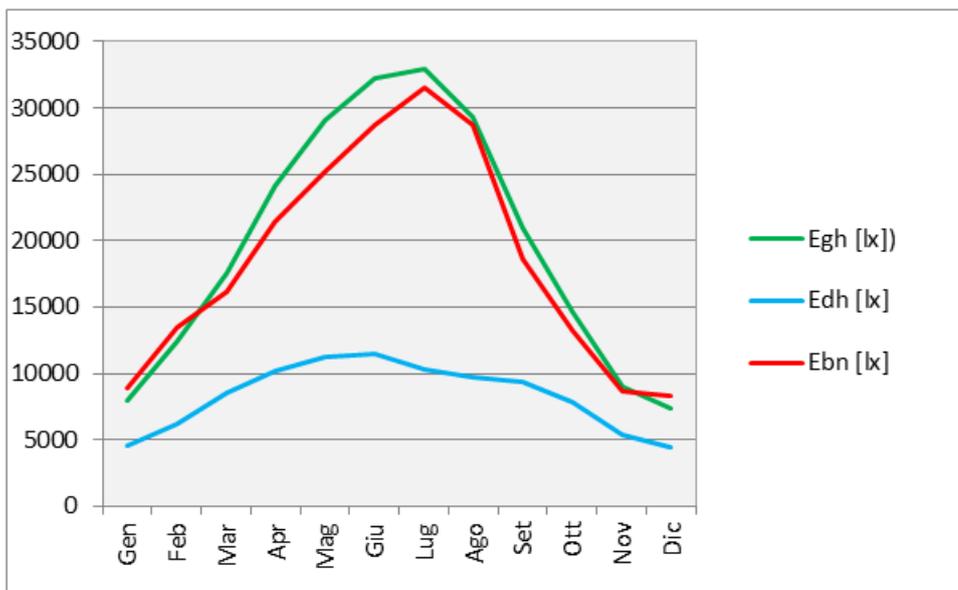


Figura 44. AMTIN: dDati giornalieri medi mensili e dato giornaliero medio annuo

### Grandezza: Illuminamento diretto normale (Ebn)

Tabella: Numero di ore Ebn sopra soglie

Soglie [Lux]	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
totale	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Ebn > 0	321	313	397	421	485	480	488	454	403	372	310	310	4754
Ebn > 4000	166	205	247	300	364	399	413	381	266	201	170	176	3288
Ebn > 8000	147	182	218	276	339	378	401	362	258	199	146	159	3065
Ebn > 12000	135	169	203	254	317	358	376	348	241	189	133	140	2863
Ebn > 16000	123	159	186	233	294	343	368	336	226	177	127	120	2692
Ebn > 20000	118	145	176	222	282	323	347	326	222	170	117	116	2564
Ebn > 24000	112	137	168	212	270	298	339	319	213	160	108	111	2447
Ebn > 28000	106	132	163	207	263	288	332	301	203	152	102	101	2350
Ebn > 32000	99	121	155	200	257	281	321	299	191	148	94	90	2256
Ebn > 36000	87	114	147	188	245	270	307	289	184	145	85	84	2145
Ebn > 40000	78	110	138	182	223	256	300	283	177	132	75	71	2025
Ebn > 44000	75	104	133	178	214	243	288	271	169	121	66	65	1927
Ebn > 48000	66	99	128	174	207	229	279	263	160	107	59	54	1825
Ebn > 52000	57	90	123	167	199	218	275	241	145	95	50	44	1704
Ebn > 56000	50	78	117	158	190	206	264	219	129	82	44	37	1574
Ebn > 60000	43	75	112	144	172	197	229	204	117	69	32	29	1423
Ebn > 64000	32	63	101	130	152	166	216	194	101	56	24	24	1259
Ebn > 68000	27	54	90	122	136	152	212	168	78	45	14	6	1104
Ebn > 72000	14	44	77	110	124	141	157	142	62	32	7	0	910
Ebn > 76000	7	35	63	91	105	106	139	114	38	17	1	0	716
Ebn > 80000	0	23	46	64	79	83	73	64	18	7	0	0	457

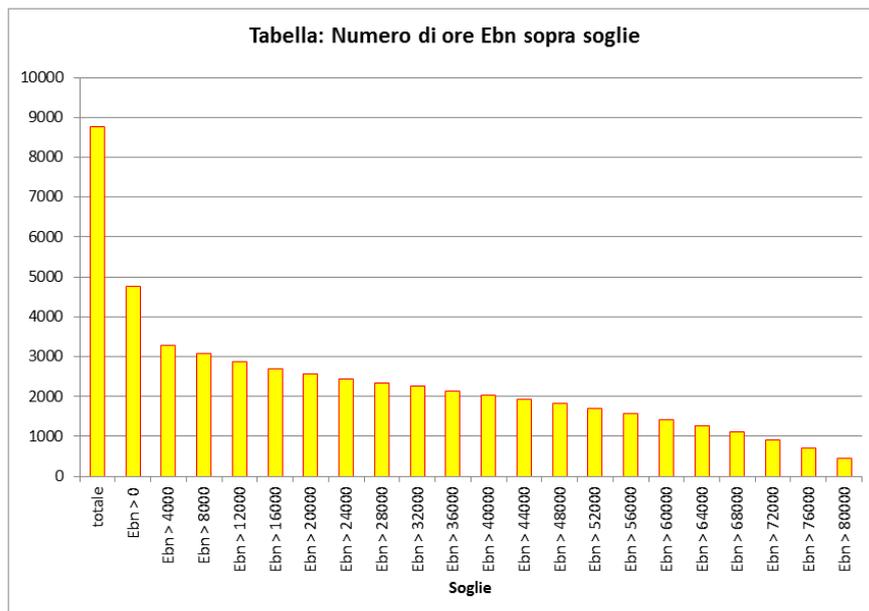


Figura 45. AMTIN: illuminamento diretto normale (Ebn) — distribuzione dei dati orari

## Grandezza: Illuminamento globale orizzontale (Egh)

Tabella: Numero di ore Egh sopra soglie

Soglie [Lux]	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
totale	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Egh > 0	323	313	397	421	485	480	488	454	404	372	312	310	4759
Egh > 4000	252	263	340	367	429	420	433	399	345	310	252	245	4055
Egh > 8000	220	241	316	349	397	414	404	382	318	288	225	228	3782
Egh > 12000	184	224	284	330	364	382	387	361	302	267	196	173	3454
Egh > 16000	155	195	267	306	348	354	362	345	286	242	165	147	3172
Egh > 20000	127	166	244	282	335	344	353	328	265	234	144	133	2955
Egh > 24000	103	151	226	271	311	332	330	318	254	215	125	107	2743
Egh > 28000	86	137	203	257	284	313	322	307	235	195	107	84	2530
Egh > 32000	73	119	183	238	276	291	306	297	218	170	84	67	2322
Egh > 36000	53	101	162	215	265	276	300	279	202	157	66	41	2117
Egh > 40000	41	90	153	200	258	272	293	261	190	127	49	12	1946
Egh > 44000	21	77	136	185	235	263	272	252	173	105	26	0	1745
Egh > 48000	10	63	121	175	214	242	263	240	156	80	14	0	1578
Egh > 52000	0	47	102	160	202	223	240	230	139	68	4	0	1415
Egh > 56000	0	26	91	146	196	206	237	210	120	45	0	0	1277
Egh > 60000	0	18	79	131	189	201	230	188	106	30	0	0	1172
Egh > 64000	0	9	64	120	169	191	206	174	94	18	0	0	1045
Egh > 68000	0	5	50	110	143	170	193	158	76	7	0	0	912
Egh > 72000	0	0	37	97	132	148	176	143	53	1	0	0	787
Egh > 76000	0	0	19	78	127	137	169	118	35	0	0	0	683
Egh > 80000	0	0	12	59	105	130	142	100	16	0	0	0	564

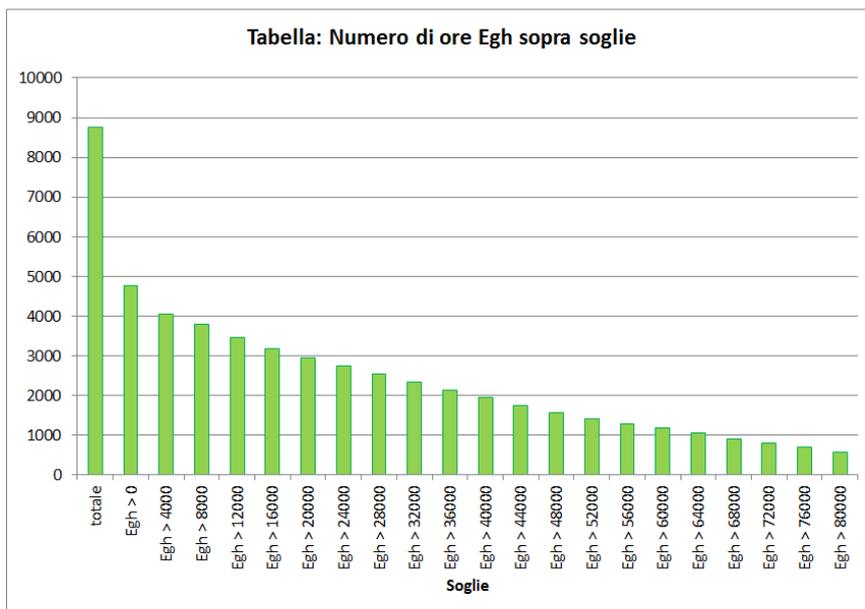


Figura 45. AMTIN: illuminamento globale orizzontale (Egh) — distribuzione dei dati orari

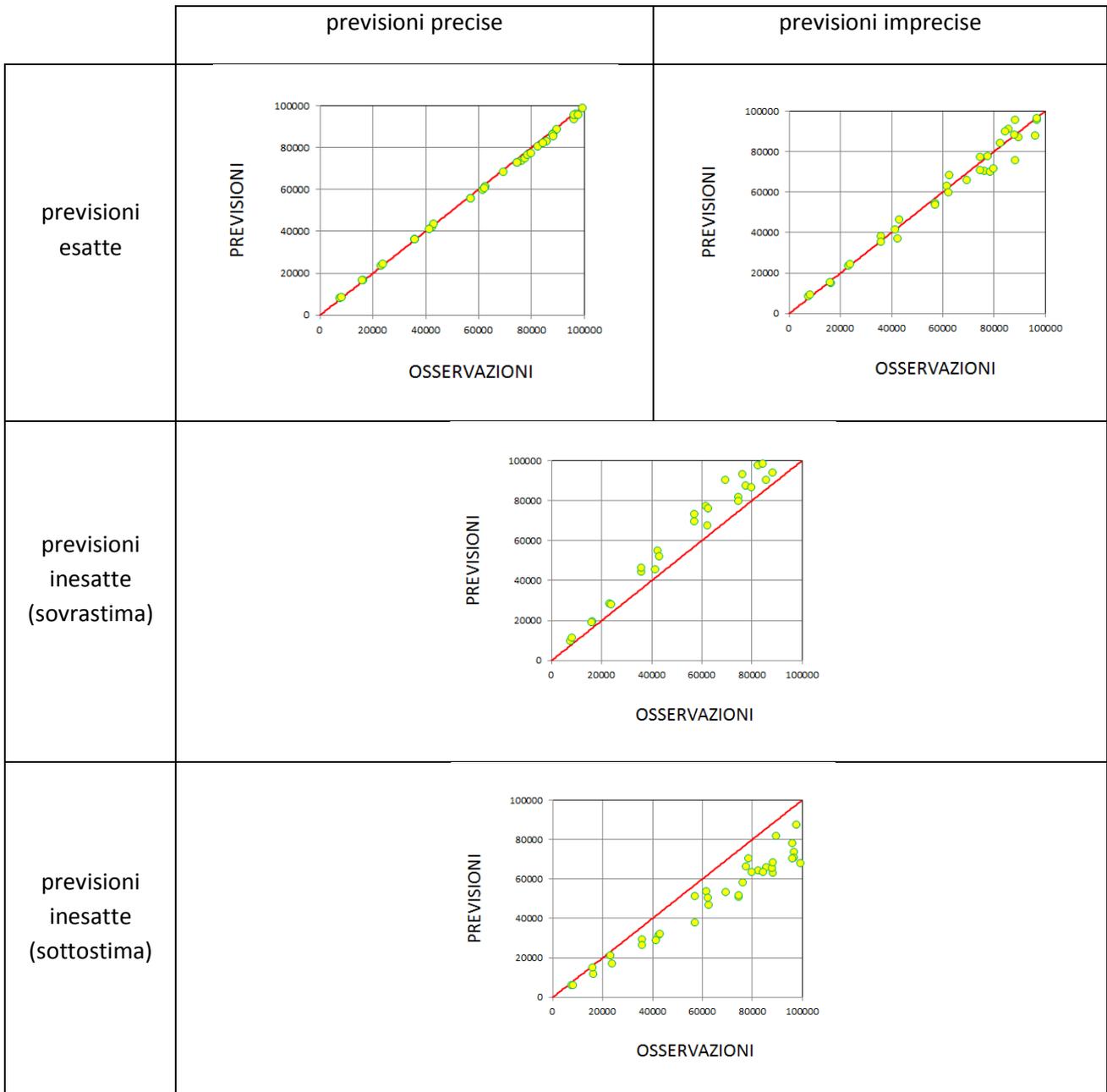
## Appendice 5 Parametri (o indici) statistici

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:

$$e_i = P_i - O_i \quad (38)$$

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 46. 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:

$$MBE = \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (39)$$

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

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i|}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad (40)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (41)$$

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 3). 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*):

$$MBE\% = \frac{\bar{e}}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N e_i / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i) / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (42)$$

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

$$MAE\% = \frac{MAE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |e_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i| / N}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (43)$$

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

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2 / N}}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 / N}}{\sum_{i=1}^N O_i / N} \times 100 \quad (44)$$

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:

$$MAE_p = \left( \frac{\sum_{i=1}^N |e_i|^p}{N} \right)^{1/p} = \left( \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|^p}{N} \right)^{1/p} \quad (45)$$

E' 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)*

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{e_i}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (46)$$

*Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|e_i|}{O_i} \right) \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \right) \times 100 \quad (47)$$

*Root Mean Squared Percentage Error (RSMPE)*

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{e_i}{O_i} \right)^2} \times 100 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \right)^2} \quad (48)$$

	<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 <sub>p</sub>
<i>Indici "relativi" (espressi in per cento, adimensionali)</i>	MBE%, MBPE	MAE%, RMSE%, MAPE, RMSPE

**Tabella 10.** 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, irradiazioni, 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 irradiazioni e gli illuminamenti, i quali sono teoricamente nulli nelle ore notturne e potrebbero azzerarsi, in condizioni particolari, anche in brevi intervalli diurni.

## Appendice 6 Ulteriori elaborazioni di dati di illuminamento naturale

L'analisi dei dati d'illuminamento basati sul modello Robledo & Soler, descritta nei precedenti capitoli, consente di individuare i valori orari medi mensili e le curve di disponibilità di luce naturale in funzione di diverse finestre temporali giornaliere. Proponiamo ora tre altre finestre temporali corrispondenti a profili di utilizzo tipici di edifici ad uso ufficio:

- 8-18
- 8-17
- 8-16

Per le tre città in esame, Roma Milano e Palermo, vengono di seguito riportate le tabelle di riepilogo dei valori medi mensili di  $E_{dh}$  e di seguito, gli istogrammi di confronto e le curve di disponibilità.

Illuminamento diffuso $E_{dh,omm}$ (lx)			
Orario 8-18	RM	MI	PA
gennaio	9933	8851	12388
febbraio	13426	12204	16532
marzo	18164	16253	18270
aprile	21136	20161	22114
maggio	22414	22897	21674
giugno	22059	23576	21172
luglio	19710	22235	21539
agosto	19473	21192	20713
settembre	19996	19047	21244
ottobre	17105	14479	18359
novembre	11685	9720	13826
dicembre	9796	7921	11674
TOTALE	17087	16563	18292

Tabella 11 valori orari medi mensili di  $E_{dh}$

Illuminamento diffuso $E_{dh}$ (lx)			
Orario 8-17	RM	MI	PA
gennaio	10926	9736	13627
febbraio	14752	13391	18164
marzo	19653	17464	19736
aprile	21843	20761	22907
maggio	23085	23453	22321
giugno	22535	24153	21556
luglio	20017	22576	21924
agosto	19909	21685	21198
settembre	20897	19752	22235
ottobre	18434	15535	19814
novembre	12853	10692	15208
dicembre	10776	8714	12842
TOTALE	17983	17342	19290

Tabella 12 valori orari medi mensili di  $E_{dh}$

Illuminamento diffuso $E_{dh}$ (lx)			
Orario 8-16	RM	MI	PA
gennaio	12025	10697	14962
febbraio	15791	14262	19496
marzo	20614	18192	20649
aprile	22147	21117	23282
maggio	23273	23735	22648
giugno	22800	24512	21706
luglio	20071	22658	22105
agosto	20060	21841	21349
settembre	21458	20003	22709
ottobre	19240	16134	20723
novembre	14240	11827	16822
dicembre	11967	9675	14238
TOTALE	18647	17901	20050

Tabella 13 valori orari medi mensili di  $E_{dh}$

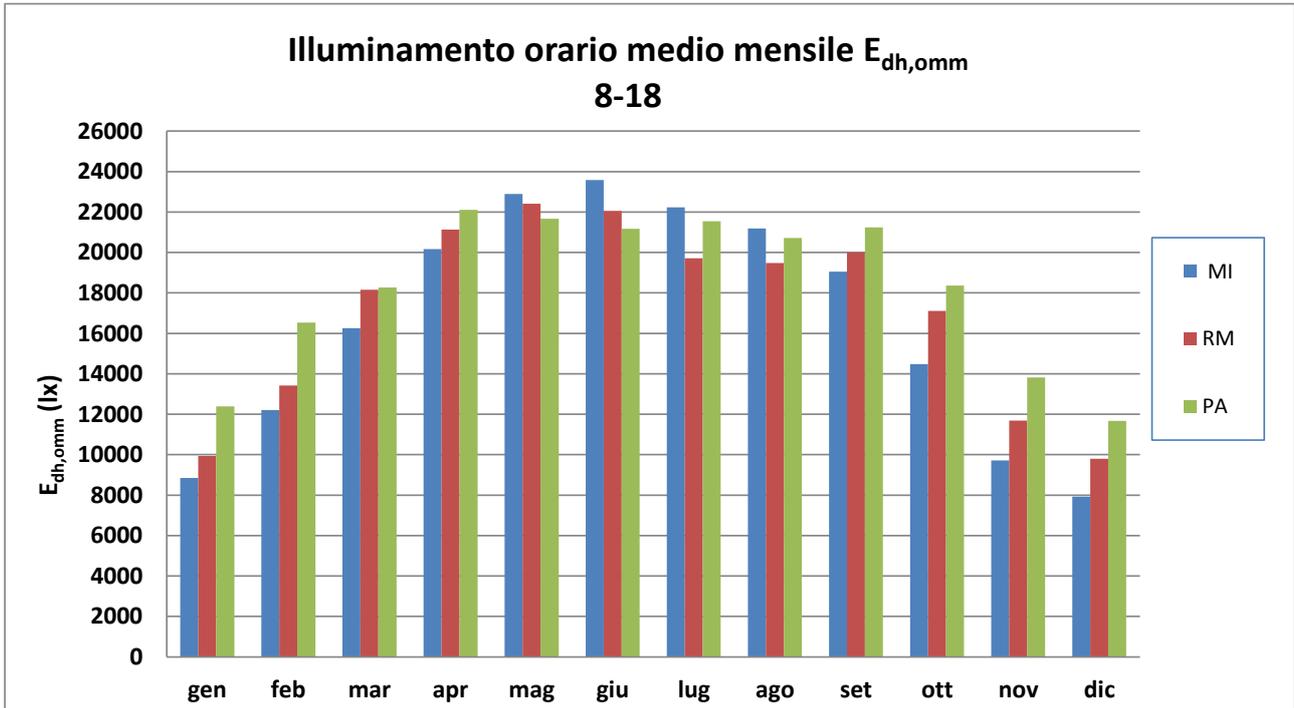


Figura 47.  $E_{dh,omm}$  tra le 8 e le 18 MI-RM-PA.

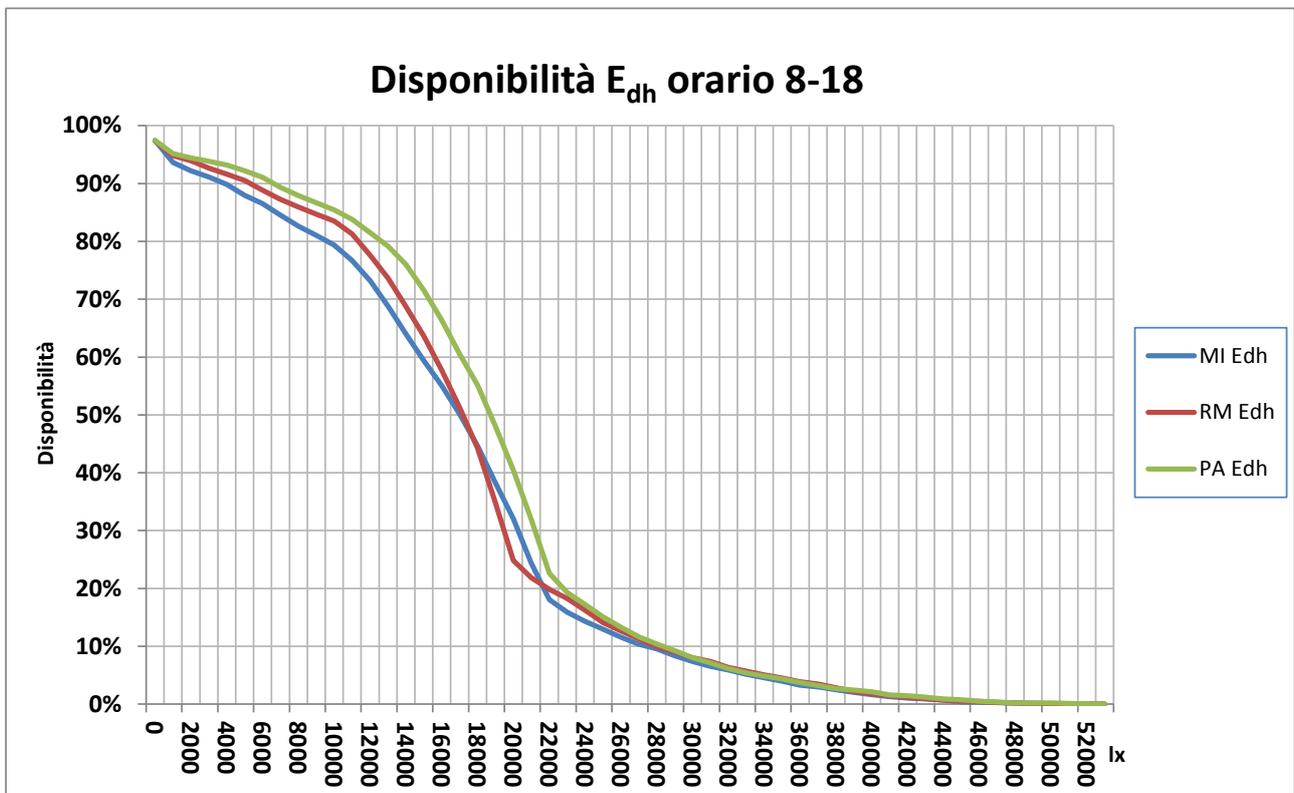


Figura 48. Curve di disponibilità  $E_{dh}$  MI-RM-PA.

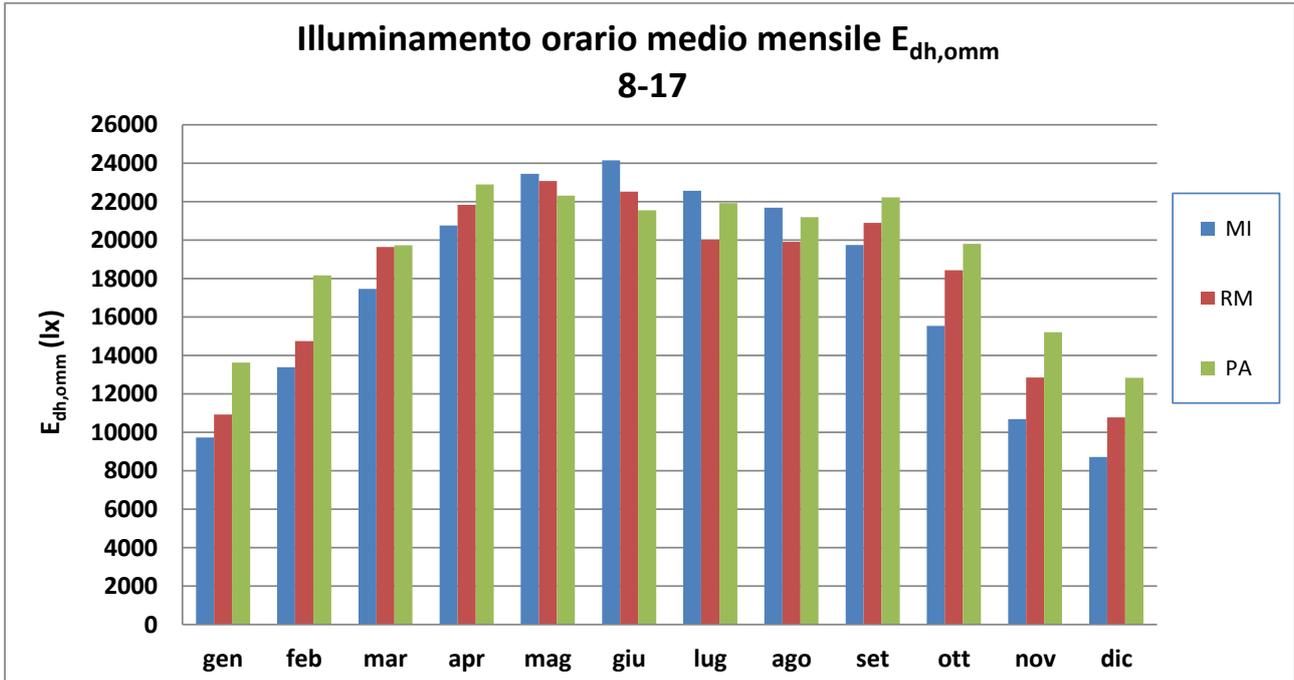


Figura 49.  $E_{dh,omm}$  tra le 8 e le 17 MI-RM-PA.

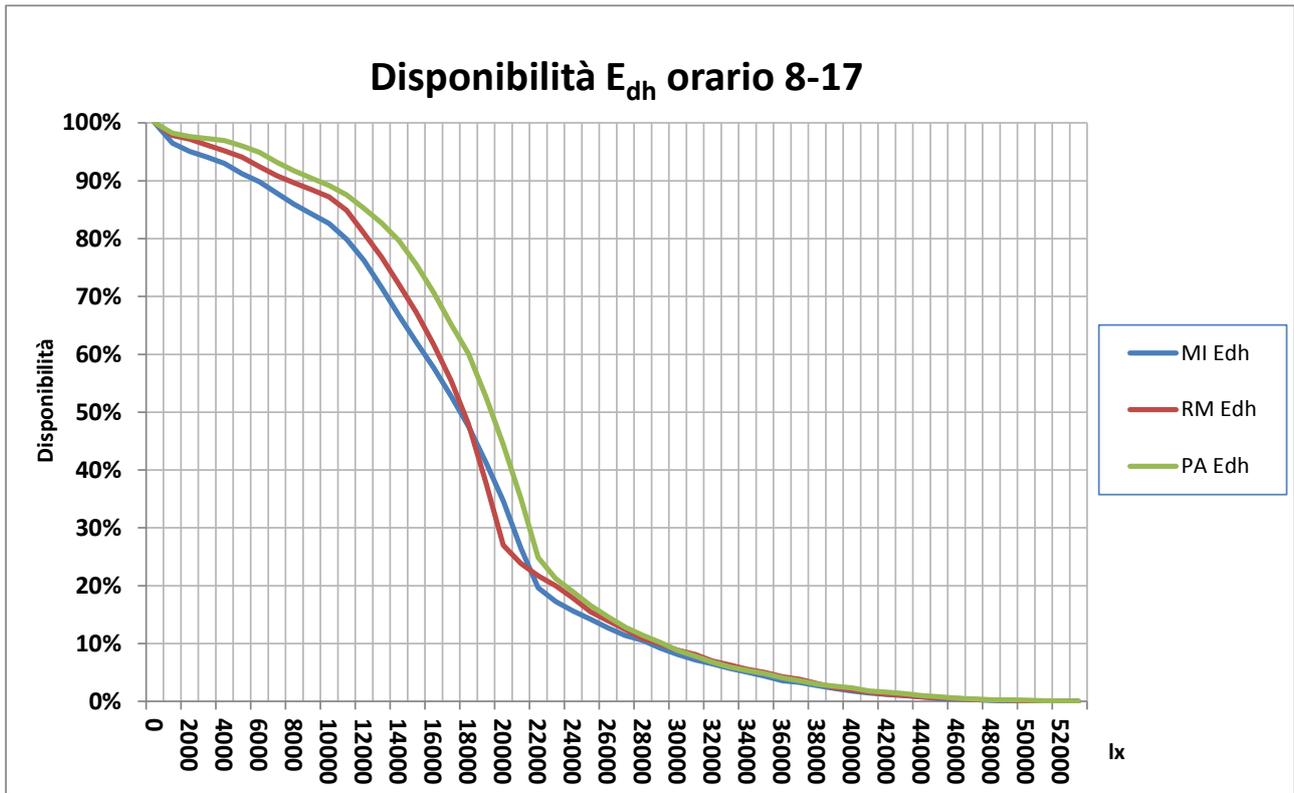


Figura 52. Curve di disponibilità  $E_{dh}$  MI-RM-PA.

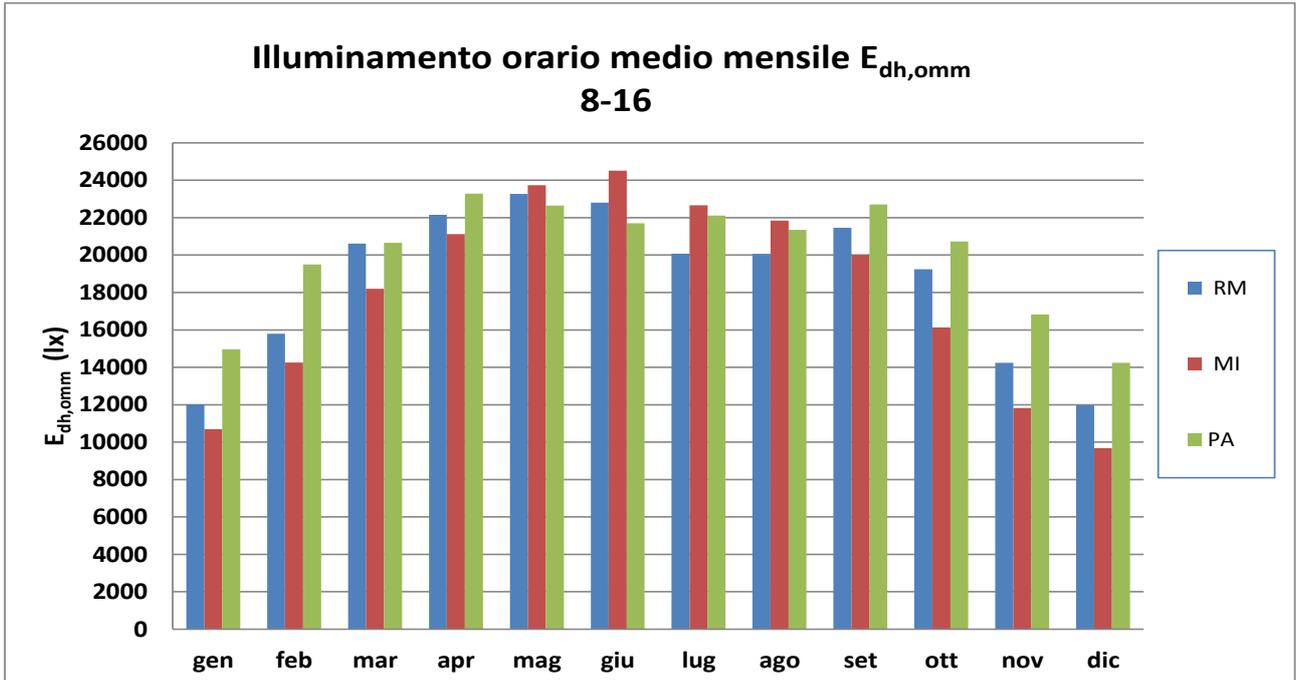


Figura 51.  $E_{dh,omm}$  tra le 8 e le 16 MI-RM-PA.

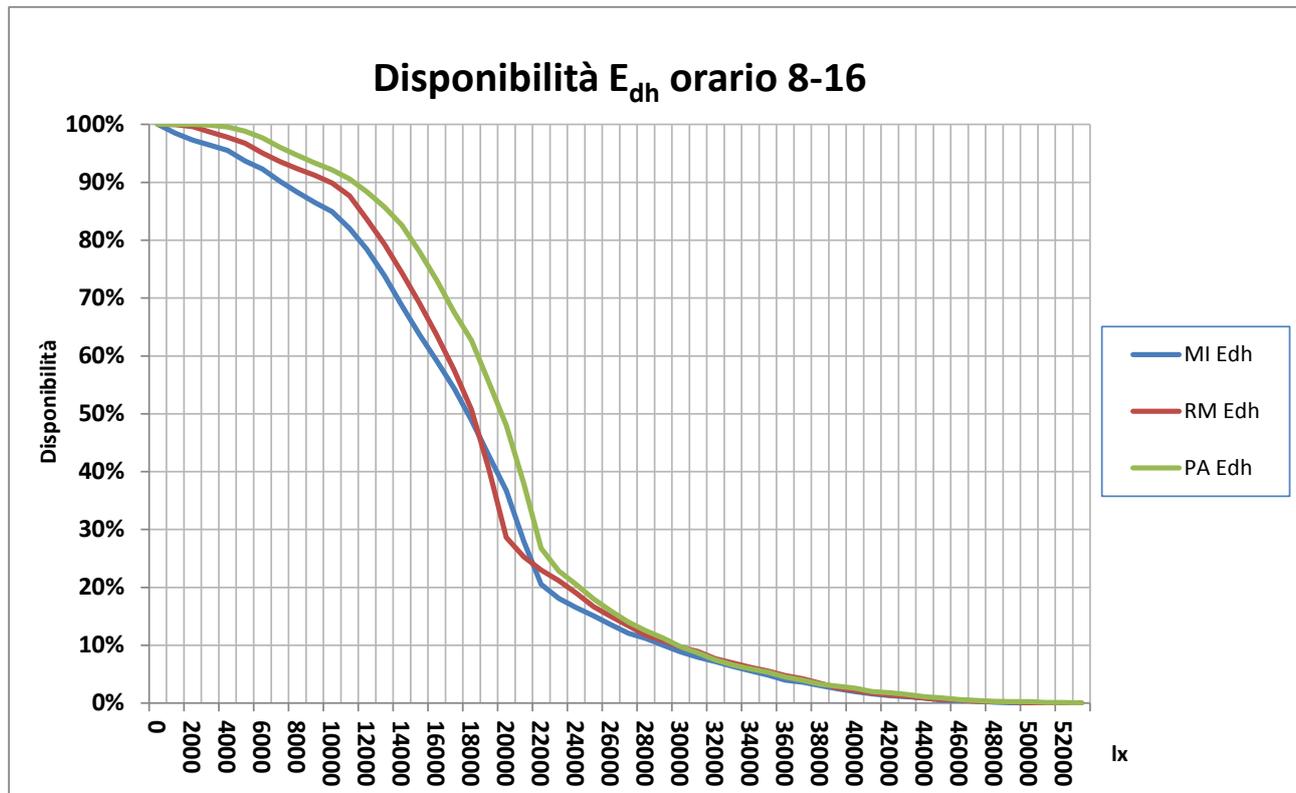


Figura 53 Curve di disponibilità  $E_{dh}$  MI-RM-PA.

### Confronto tra la componente diffusa $E_{dh}$ e quella globale $E_{gh}$

E' interessante evidenziare le differenze in termini di distribuzione in frequenza, assoluta e cumulata, tra la componente diffusa  $E_{dh}$  e quella globale  $E_{gh}$  dell'illuminamento, che influenzano le curve di disponibilità.

Di seguito, a titolo d'esempio, le curve relative all'orario 8-16, per le tre città in esame.

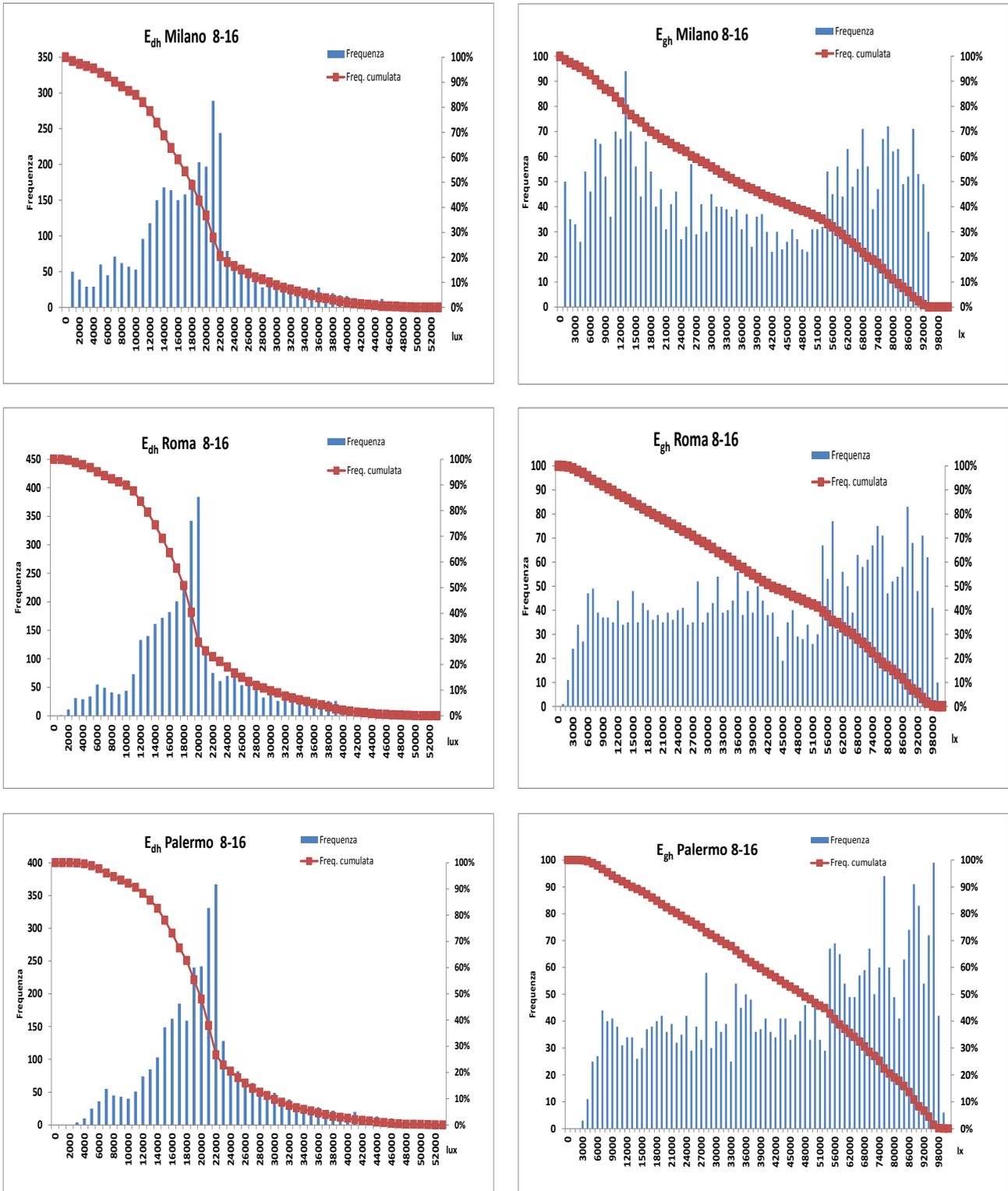


Figura 54 Distribuzioni in frequenza  $E_{dh}$ ,  $E_{gh}$

## Sigle, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

AMT	Anno meteorologico tipico
AMTIN	Anno meteorologico tipico per l'illuminamento naturale
DNI	Irradia[nza   zione] diretta normale (Direct Normal Irradia[nce   tion])
EHI	Irradia[nza   zione] extraatmosferica su piano orizzontale
EL	Efficaci[a   e] luminos[a   e]
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
ENI	Irradia[nza   zione] extraatmosferica su piano normale
EU	European Union (Unione europea)
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GHI	Irradia[nza   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
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
SI	Sistema internazionale delle unità di misura
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Test Reference Year
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
USA	United States of America

<b>Simbolo</b>	<b>Grandezza</b>	<b>Acronimo</b>	<b>Unità di misura</b>
$D$	Fattore di luce diurna <i>Daylight Factor</i>	FLD DF	adimensionale
$D_E$	Disponibilità di un livello d'illuminamento		adimensionale
$E$	Illuminamento		$lx$
$E, E_{gh}$	Illuminamento naturale globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Illuminance</i>		$lx$
$E_b, E_{bh}$	Illuminamento naturale diretto (su piano) orizzontale		$lx$
$E_{bn}$	Illuminamento naturale diretto (su piano) normale <i>Direct Normal Illuminance</i>		$lx$
$E_d, E_{dh}$	Illuminamento naturale diffuso (su piano) orizzontale		$lx$
$E_0$	Fattore di eccentricità dell'orbita terrestre		adimensionale
$h$	Altitudine		$m$
$h_s$	Altezza del Sole		grado ( $^{\circ}$ ), $rad$
$H$	Irradiazione		$J m^{-2}, kWh m^{-2}$
$I$	Irradianza		$W m^{-2}$
$I, I_{gh}$	Irradianza solare globale (su piano) orizzontale <i>Global Horizontal Irradiance</i>	GHI	$W m^{-2}$
$I_b, I_{bh}$	Irradianza solare diretta (su piano) orizzontale		$W m^{-2}$
$I_{bn}$	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		$W m^{-2}$
$I_0$	Irradianza extraatmosferica (su piano) orizzontale <i>Extraterrestrial Horizontal Irradiance</i>	EHI	$W m^{-2}$
$I_{0n}$	Irradianza extraatmosferica (su piano) normale <i>Extraterrestrial Normal Irradiance</i>	ENI	$W m^{-2}$
$I_{sc}$	Costante solare		$1367 W m^{-2}$
$k$	Frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale (orizz.)		adimensionale
$K_c$	Indice di cielo sereno <i>clear-sky index</i>		adimensionale
$K_T$	Coefficiente di trasmissione globale <i>Clearness index</i>		adimensionale
$K_{Tc}$	Coefficiente di trasmissione globale per cielo sereno (anche: Indice di chiarezza) <i>Clear-sky transmittance</i>		adimensionale
$i$	Indice di copertura nuvolosa		adimensionale
$I_v$	Intensità luminosa		$lm / sr = cd$

$L_v$	Luminanza		$cd / m^2$
$m$	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
$r, r_0$	Distanza Sole-Terra (corrente e media)		$km$
$T_d$	Temperatura del punto di rugiada <i>Dew point</i>		$^{\circ}C$
$W$	Contenuto di vapore acqueo in atmosfera (anche: Altezza dell'acqua precipitabile) <i>Atmospheric precipitable water</i>		$cm$
$\alpha, \beta$	Parametri del modello di Boland-Ridley		adimensionali
$\varepsilon'$	Indice di serenità di Perez <i>Sky's clearness index</i> <sup>8</sup>		adimensionale
$\Delta$	Indice di brillantezza del cielo <i>Sky's brightness index</i> <sup>9</sup>		adimensionale
$\eta_{bn}$	Efficacia luminosa diretta <i>Direct luminous efficacy</i>		$lm / W$
$\eta_{dh}$	Efficacia luminosa diffusa (su piano orizzontale) <i>Diffuse luminous efficacy</i>		$lm / W$
$\eta_{gh}$	Efficacia luminosa globale (su piano orizzontale) <i>Global luminous efficacy</i>		$lm / W$
$\vartheta_z$	Angolo zenitale		grado ( $^{\circ}$ ), $rad$
$\lambda$	Lunghezza d'onda		$m, nm, \mu m$
$\Phi_v$	Flusso luminoso		$lm$

**Nota** Tutte le irradianze e gli illuminamenti sono affetti da due pedici, il primo dei quali si riferisce al tipo:

- 0 : extraatmosferico
- g : globale
- b : diretto (b = beam)
- d : diffuso

e il secondo all'orientazione della superficie "incisa":

- n : normale
- h : orizzontale.

<sup>8</sup> Nell'articolo di Perez, 1990, /24/: *Atmospheric Clearness Parameter*.

<sup>9</sup> Nell'articolo di Perez, 1990: *Atmospheric Brightness Parameter*.

Così, ad esempio, il simbolo  $I_{bn}$  sta per irradianza diretta normale. Comunque, per alleggerire la scrittura delle grandezze, si conviene di poter omettere senza pericolo di ambiguità interpretative i soli pedici per 'globale' e 'orizzontale'. Così, in base a questa convenzione, il (nudo) simbolo  $I$  sta semplicemente per irradianza globale orizzontale ( $I_{gh}$ ), mentre  $E_d$  indica illuminamento diffuso orizzontale ( $E_{dh}$ ).

#### Simboli per unità di misura:

<b>Unità di misura</b>	<b>Simbolo</b>	
metro	$m$	Lunghezza
metro quadro	$m^2$	Area
ora *	$h$	Tempo
grado Celsius *	$^{\circ}C$	Temperatura
kelvin	$K$	Temperatura
grado *	$^{\circ}$	Angolo piano
radiante	$rad$	Angolo piano
steradiane	$sr$	Angolo solido
joule	$J$	Energia
watt	$W$	Potenza
lumen	$lm$	Flusso luminoso
candela	$cd$	Intensità luminosa
lux	$lx$	Illuminamento

(\*) Unità non SI

<b>Prefissi (nelle unità di misura)</b>	<b>Nome</b>	<b>Valore</b>
$n$	nano-	$10^{-9}$
$\mu$	micro-	$10^{-6}$
$c$	centi-	$10^{-2}$
$k$	kilo-	$10^3$
$M$	mega-	$10^6$

<b>Altri simboli</b>	<b>Significato</b>
$\div$	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](http://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](http://www.satel-light.com)
- [13] *SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare*, sito ENEA per il calcolo e la previsione della radiazione solare , <http://www.solaritaly.enea.it>.
- [14] *Clisun - Archivio Climatico ENEA-DBT*, sito Internet (<http://clisun.casaccia.enea.it>); contiene – tra l’altro – le mappe della radiazione globale giornaliera media mensile 1994-1999 ed i valori stimati per 1614 localit  uniformemente distribuite sul territorio italiano. Tutto il materiale   liberamente ‘scaricabile’.

- [15] 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.
- [16] 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>
- [17] 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.
- [18] European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT),  
<http://www.eumetsat.int>.
- [19] *The Meteosat Archive 1978-2000*, EUMETSAT, Darmstadt (Germania), Febbraio 2000, EUM TD 06.
- [20] J. Boland and B. Ridley (2008), *Models of Diffuse Solar Fraction*, in *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 8, p. 193-219.
- [21] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie (1982), *Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation*, *Solar Energy*, vol. 28, 1982, p.13
- [22] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferrero, D. Kaliakatsos e V. Marinelli (2004), *Correlazioni sperimentali dell'efficacia luminosa della radiazione globale, diretta e diffusa*, 59° Congresso ATI, Genova, Settembre 2004.
- [23] T. Muneer e D. Kinghorn (1998), *Luminous efficacy models: evaluation against UK data*, *Journal of the IES* 1998; **27**(1):163-70.
- [24] R.R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart (1990), *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, *Solar Energy* **44**, 5 (1990), pp. 271-289.
- [25] L. Robledo e A. Soler (2000), *Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies*, *Energy Conversion & Management*, **41** (2000):1769-1779.
- [26] L. Robledo e A. Soler (2001), *Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types*, *Energy*, **26** (2001):669-677.
- [27] L. Robledo e A. Soler (2001), *On the luminous efficacy of diffuse solar radiation*, *Energy Conversion & Management*, **42** (2001):1181-1190.
- [28] *Comitato Termotecnico Italiano*. Pagina dedicata agli Anni climatici tipici dell'Italia:  
<http://www.cti2000.it/index.php?controller=news&action=show&newsid=34985>
- [29] 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.
- [30] F. Kasten (1993), *Discussion on the relative air mass*, *Light. Res. Tech.* **25**, 129.

- [31] P.J. Lunde (1980), *Solar Thermal Engineering*, Wiley, New York, 1980.
- [32] M. Iqbal (1983), *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Canada, Don Mills (Ontario, Canada), 1983. ISBN: 0-12-373750-8. Pagine 390.
- [33] Danish Building Research Institute, *Daylight calculation in practice*, Aalborg University Copenhagen, SBI 2013:26.
- [34] J. Mardaljevic (1995), *Validation of a lighting simulation program under real sky conditions*. *Lighting Research and Technology*, 27.
- [35] C.F. Reinhart (2010), *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*.
- [36] C.F. Reinhart e M. Andersen (2006), *Development and validation of a Radiance model for a translucent panel*. *Energy and Buildings*, 38, 890–904.
- [37] C.F. Reinhart e O. Walkenhorst (2001), *Validation of dynamic RADIANCE based daylight simulations for a test office with external blinds*. *Energy and Buildings*, 33, 683–697.