



UNIVERSITÀ della CALABRIA
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Meccanica

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XXV Ciclo (2009-2012)

Scuola di Dottorato "Pitagora" in Scienze Ingegneristiche

SSD: ING-IND/11 FISICA TECNICA AMBIENTALE

Dissertazione finale sottomessa per il conseguimento il titolo di Dottore di Ricerca in
Ingegneria Meccanica

**STUDIO DI MODELLI DI CALCOLO DELLA
LUMINANZA DEL CIELO E CONFRONTO
CON DATI SPERIMENTALI**

Coordinatore

Prof. Sergio Rizzuti

Supervisore

Prof. Valerio Marinelli

Candidata

Ing. Marilena Mele

Anno Accademico 2011/2012

Introduzione	pag.5
1. PARAMETRI SOLARI E GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE	pag.8
1.1 Posizione del sole	pag.8
1.1.1 Latitudine.....	pag.8
1.1.2 Longitudine.....	pag.9
1.1.3 Declinazione solare δ	pag.10
1.1.4 Angolo orario h	pag.11
1.1.5 Altezza solare α	pag.13
1.1.6 Azimut solare γ	pag.14
1.2 Grandezze della luce	pag.15
1.2.1 Flusso luminoso.....	pag.17
1.2.2 Intensità luminosa.....	pag.17
1.2.3 Illuminamento.....	pag.17
1.2.4 Luminanza.....	pag.18
2. STRUMENTI DI MISURA DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE ESTERNO E DELLA LUMINANZA DEL CIELO	pag.19
2.1 Generalità	pag.19
2.2 Fotometro per la misura dell'illuminamento globale sul piano orizzontale e sui piani verticali	pag.19
2.3 Fotometro per la misura dell'illuminamento diretto proveniente dal Sole	pag.20
2.4 Inseguitore solare	pag.21
2.5 Fotometro per la misura dell'illuminamento diffuso sul piano orizzontale	pag.22
2.6 Fotometro per la misura della luminanza zenitale	pag.23
2.7 Sistema di acquisizione dati per l'illuminamento globale, diretto e diffuso	pag.24
2.7.1 Moduli di condizionamento del segnale.....	pag.25
2.7.2 Scheda di acquisizione dati (daq).....	pag.29

2.7.3	Acquisizione con utilizzo dei Field Points.....	pag.32
2.7.4	Computer.....	pag.33
2.7.5	Software.....	pag.34
2.8	Sky Scanner.....	pag.38
3.	DATI MISURATI E LORO CORREZIONE.....	pag.42
4.	MODELLI DI CALCOLO.....	pag.54
4.1	Modello di Perez.....	pag.54
4.2	Modello di Igawa.....	pag.58
4.3	Modelli CIE.....	pag.64
5.	CONFRONTO TRA I MODELLI DI CALCOLO ED I DATI SPERIMENTALI.....	pag.69
5.1	Metodologia di analisi.....	pag.69
5.2	Confronto con il modello di Perez.....	pag.70
5.3	Confronto con il modello di Igawa.....	pag.77
5.4	Confronto con il modello CIE.....	pag.85
5.5	Analisi luminanze assolute, relative e zenitali.....	pag.87
5.6	Confronto dati misurati corretti e non corretti – dati calcolati.....	pag.99
6.	RICERCA DEL TIPO DI CIELO CIE.....	pag.103
6.1	Funzione indicatrice e funzione gradiente.....	pag.103
6.1.1	Funzione indicatrice.....	pag.103
6.1.2	Funzione gradiente.....	pag.106
6.1.3	Confronto indicatrice-gradiente calcolati e standard.....	pag.110
6.2	Confronto tra L_z/D_v calcolato e standard.....	pag.128
6.2.1	Esempi.....	pag.130
6.3	Tregenza method.....	pag.133
6.3.1	Esempi.....	pag.136

6.4 Risultati	pag.137
7. NUOVO MODELLO DI CALCOLO A 20 CIELI	pag.138
7.1 Modello di Igawa a 20 tipi di cielo	pag.138
8. MODELLO CIE- S_i	pag.139
8.1 Modello CIE – S_i A	pag.139
8.2 Modello CIE – S_i B	pag.140
8.3 Modello CIE – S_i C	pag.145
9. NUOVA METODOLOGIA DI CONFRONTO DEI MODELLI	pag.146
9.1 Generalità	pag.146
9.2 Risultati	pag.147
10. NUOVA METODOLOGIA DI CORREZIONE DEI DATI SPERIMENTALI	pag.145
10.1 Generalità	pag.152
10.2 Risultati	pag.152
CONCLUSIONI	pag.165
APPENDICE	pag.168
BIBLIOGRAFIA	pag.183
RINGRAZIAMENTI	pag.187
PUBBLICAZIONI	pag.188

INTRODUZIONE.

La luce naturale deriva dall'energia luminosa di origine solare, che costituisce un'importante quota-parte dell'energia solare complessiva in arrivo sulla terra. L'energia luminosa costituisce un fattore essenziale nella percezione dell'ambiente da parte dell'uomo. La luce è un elemento strettamente connesso con il concetto di "spazio": tutte le attività che si svolgono negli spazi confinati e non, lavorare, studiare, camminare, mangiare, ecc., hanno bisogno di una specifica dimensione spaziale, e per poterla percepire e valutare la luce risulta un fattore centrale ed imprescindibile.

Attraverso la luce è possibile percepire e valutare dimensioni, profondità, distanze, colori, è possibile comprendere e valutare i rapporti tra gli oggetti e tutti gli elementi che strutturano l'assetto fisico dei luoghi, nonché i rapporti tra l'assetto stesso dei luoghi e l'uomo che li abita. Per questi motivi la luce è stata sempre un fattore centrale nella riflessione e nell'evoluzione culturale dell'architettura e dell'ingegneria, andando oltre la sua naturale vocazione di strumento cognitivo e divenendo spesso fattore e strumento di linguaggio e di comunicazione.

Inoltre, l'illuminazione naturale costituisce una risorsa importante per la progettazione e la realizzazione di edifici energeticamente sostenibili oltre che qualitativamente confortevoli. Un'adeguata illuminazione diurna ed una integrazione ottimale di luce naturale/artificiale possono contribuire in maniera significativa al risparmio energetico negli edifici derivante dalle minori spese per l'illuminazione elettrica. La presenza di luce naturale in un ambiente di lavoro influisce sulla soddisfazione, sulla prestazione e, quindi, anche sulla produttività dell'utente.

È quindi necessario individuare delle soluzioni ingegneristiche nell'energetica degli edifici il cui obiettivo sia quello di garantire un buon comfort visivo, il rispetto della natura ed un risparmio energetico.

Lo studio della luce del giorno dipende principalmente da due fattori: dalla sua disponibilità e dalla sua quantità. In termini di disponibilità essa dipende da latitudine e longitudine del luogo, dal giorno e dall'ora, dal tipo di cielo (overcast, sereno, intermedio); in termini di quantità essa dipende da orientazione della stanza, ostruzioni esterne, ombre e posizione del piano di lavoro.

Al fine di calcolare il livello di illuminamento interno sul piano di lavoro e quindi valutare il risparmio energetico all'interno degli edifici, è possibile applicare dei codici di illuminamento interno, come RADIANCE [1], SUPERLITE [2], ADELIN [3], DIALUX [4], RELUX [5],

ECOTECT [6], INLUX-DBR [7]. Il principale input per tali codici di calcolo è rappresentato dalla distribuzione di luminanza del cielo, la quale è misurabile per mezzo di uno strumento sperimentale (SKY SCANNER) oppure calcolabile per mezzo di un modello di calcolo.

I modelli più conosciuti ed utilizzati per il calcolo della luminanza del cielo, disponibili in letteratura, sono il modello di Perez [8], il modello di Igawa [9], ed il nuovo modello CIE [10], [11]. Durante lo sviluppo del presente lavoro sono stati aggiunti altri modelli: il modello di Igawa a 20 tipi di cieli [12] ed i modelli CIE-S_i [13].

Lo scopo di questo lavoro è quello di ottenere informazioni sull'accuratezza dei modelli di calcolo della luminanza del cielo, confrontando le loro previsioni con i dati di luminanza misurati. Gli studi condotti sono stati supportati da dati sperimentali misurati mediante uno Sky Scanner EKO, modello SM-321 LR prelevati in quattro diverse località: Osaka (Giappone), Arcavacata di Rende (Italia), Lione (Francia), Pamplona (Spagna).

Il primo capitolo, di carattere generale, riguarda principalmente la descrizione dei parametri caratterizzanti la posizione del sole nella volta celeste e le grandezze illuminotecniche necessarie per affrontare lo studio dei modelli di calcolo.

Nel secondo capitolo vengono dettagliatamente descritti gli strumenti di misura dell'illuminamento naturale esterno e della luminanza del cielo.

Nel terzo capitolo vengono riportati i dati sperimentali utilizzati nella prima parte del presente lavoro e viene descritta la metodologia con la quale i dati sperimentali devono essere corretti al fine di garantire l'uguaglianza tra il valore dell'illuminamento sul piano orizzontale ottenuto per integrazione della luminanza sulla volta celeste ed il valore dell'illuminamento diffuso orizzontale E_{vd} misurato attraverso i fotometri.

Nel quarto capitolo vengono dettagliatamente descritti i modelli più utilizzati per il calcolo della luminanza del cielo: il modello di Perez, il modello di Igawa ed il nuovo modello CIE.

Nel quinto capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dal confronto tra i dati calcolati con i modelli ed i dati sperimentali, affrontando tale analisi in termini di luminanze assolute, relative e zenitali. Inoltre, viene proposta una metodologia di confronto tra i dati anche nel caso in cui non sia possibile correggere i dati sperimentali perché non si hanno a disposizione i valori misurati di E_{vd} . Questo capitolo conclude la prima parte del lavoro di ricerca.

La seconda parte è stata caratterizzata dalla necessità di ricercare un metodo per individuare il tipo di cielo CIE in quanto l'applicazione del nuovo modello CIE non è possibile se a priori non si conosce il tipo di cielo.

Nel capitolo sei vengono descritte tre metodologie per individuare il tipo di cielo CIE: funzione indicatrice/funzione gradiente [14], [15], [16], confronto L_z/D_v calcolato e standard

[17], [18], metodo di Tregenza [19]. Lo studio condotto su queste metodologie è stato supportato dai Professori Kittler e Darula durante lo svolgimento dell'attività di ricerca all'estero (Bratislava, Slovacchia). Le metodologie proposte, necessitano, però, della conoscenza dei dati sperimentali di luminanza.

L'individuazione di un modello di calcolo della luminanza del cielo attraverso il quale il tipo di cielo sia direttamente determinato per mezzo dei dati di irraggiamento a disposizione è descritto nel capitolo otto; di tale modello ne sono proposte tre varianti di cui una sviluppata dall'Unità di Ricerca del PRIN 2008 del dipartimento di Ingegneria Meccanica presso l'Università della Calabria. Mentre nel capitolo sette è descritto un nuovo modello proposto dal Prof. Igawa con il quale vengono introdotti 20 tipi di cielo.

Lo studio dei nuovi modelli è stato affrontato con diversa metodologia di confronto, opportunamente descritta nel capitolo nove ed anche una nuova metodologia di correzione dei dati sperimentali, opportunamente descritta nel capitolo dieci. L'analisi è stata svolta su un campione di dati sperimentali più ampio, oltre ai dati precedentemente analizzati sono stati aggiunti anche dati relativi alla città di Osaka per l'intero anno 2008, alla città di Pamplona (Spagna) per l'intero anno 2008 e alla città di Arcavacata di Rende per il mese di Giugno 2012.

1. PARAMETRI SOLARI E GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE.

La quantità di radiazione ed illuminazione proveniente dal sole incidente su una superficie, dipende, oltre che dal grado di copertura del cielo, dalla posizione del sole nella volta celeste. Si rende quindi necessaria una breve descrizione dei parametri atti ad individuare tale posizione.

Nel seguente capitolo vengono anche descritte le grandezze che rappresentano la luce.

1.1 Posizione del sole [20].

La posizione del sole nel cielo in un certo istante dell'anno, in una determinata località, può essere individuata mediante i seguenti angoli caratteristici:

- Declinazione Solare δ
- Angolo Orario h
- Altezza Solare sul piano orizzontale α
- Azimut Solare γ compiuto in senso orario partendo da sud

Prima di descrivere tali angoli, vengono definite le due grandezze utilizzate per individuare un punto sulla terra cioè la **latitudine** e la **longitudine**.

1.1.1 Latitudine.

La latitudine rappresenta la misura angolare dell'arco di meridiano compreso tra il piano dell'equatore e il parallelo passante per il punto considerato (Fig.1.1). Essa risulta positiva nell'emisfero settentrionale mentre risulta negativa in quello meridionale. Ovvero si misura da 0° a $+90^\circ$ verso Nord e da 0 a -90° verso Sud, fino ai poli.

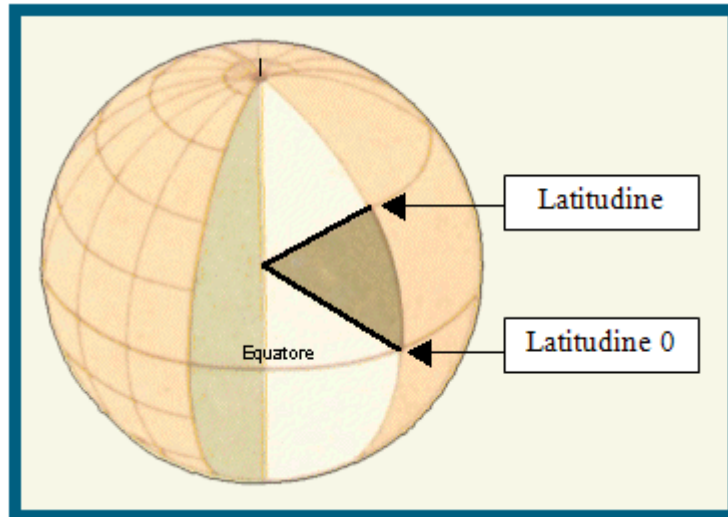


Fig.1.1 - Latitudine di un punto.

1.1.2 Longitudine.

L'altra coordinata sferica da definire è la longitudine che rappresenta la misura angolare dell'arco di equatore o parallelo compreso tra il meridiano passante per il punto considerato ed il meridiano di Greenwich (Fig.1.2). Essa si misura da 0° a $+180^\circ$ verso Est e da 0° a -180° verso Ovest, fino all'antimeridiano di Greenwich.

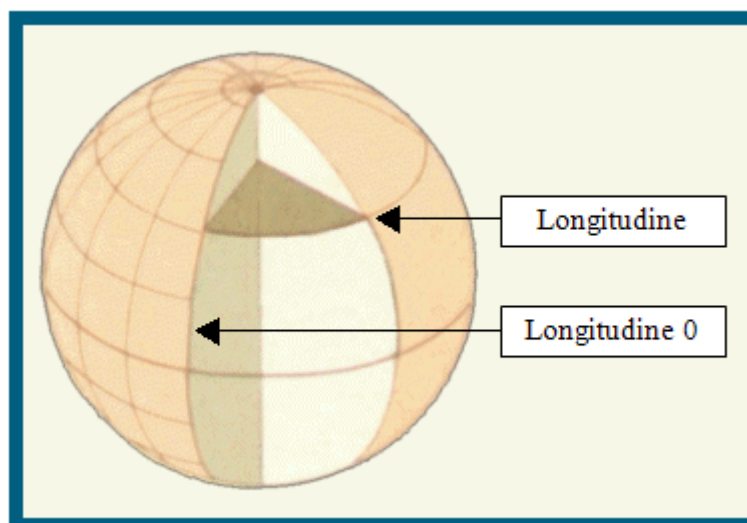


Fig.1.2 - Longitudine di un punto.

1.1.3 Declinazione solare δ .

E' l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, con il piano equatoriale (Fig.1.3); risulta anche pari all'angolo che i raggi solari formano a mezzogiorno con la direzione dello zenit sull'equatore e coincide inoltre con la latitudine geografica alla quale in un determinato giorno dell'anno il sole a mezzogiorno sta sullo zenit. E' positiva quando il sole sta al di sopra del piano equatoriale ed è negativa quando il sole è al di sotto di esso. Considerata l'elevata distanza tra sole e terra ed il fatto che il primo ha un diametro circa cento volte maggiore, i raggi solari investono il nostro pianeta tutti paralleli tra di loro ed alla linea immaginaria che congiunge i due centri.

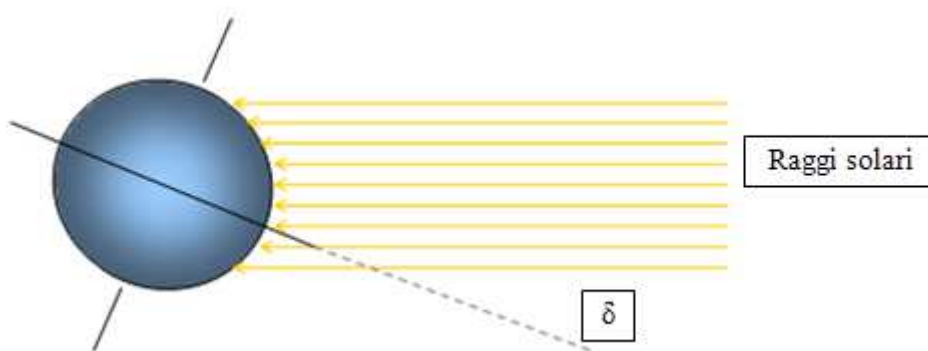


Fig.1.3 - Definizione della declinazione solare.

La declinazione solare (Fig.1.4) può essere valutata per mezzo della formula (1.1):

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos v_0 + 0.070257 \sin v_0 - 0.006758 \cos 2v_0 + 0.000908 \sin 2v_0 \quad (1.1)$$

dove:

$$v_0(\text{rad}) = \frac{2\pi n(t)}{365}, \text{ rappresenta il numero progressivo del giorno dell'anno partendo da 0, l'1}$$

Gennaio, a 364, il 31 Dicembre, per un anno normale o a 365 per un anno bisestile.

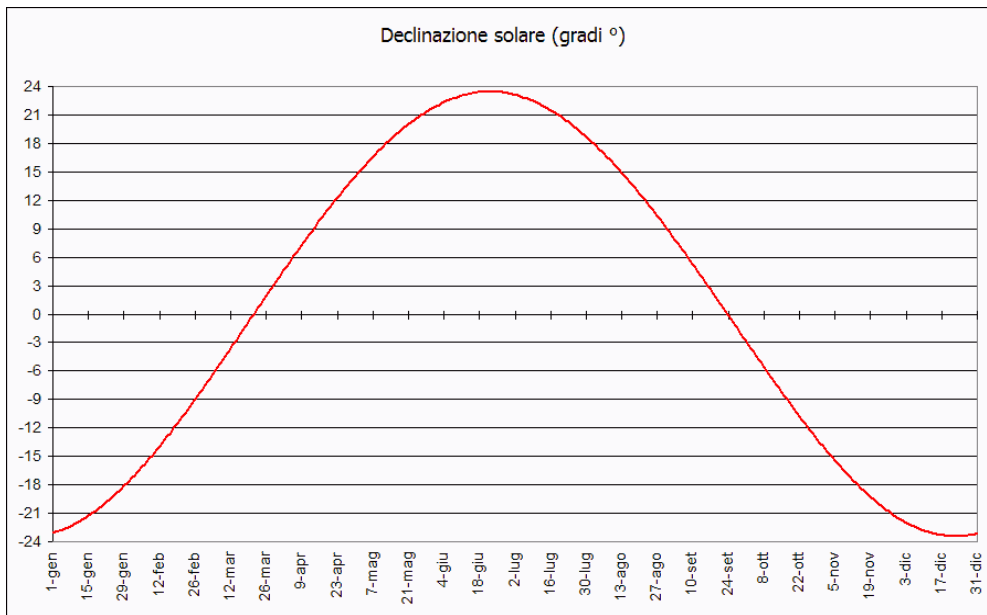


Fig.1.4 - Determinazione grafica della declinazione solare.

1.1.4 Angolo orario h .

L'angolo orario h rappresenta la distanza angolare tra il sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la terra affinché il sole si porti sopra il meridiano locale. Risulta nullo a mezzogiorno, positivo nelle ore antimeridiane e negativo nelle ore pomeridiane. Il mezzogiorno è, in generale, l'istante di culminazione del sole in meridiano, dove per culminazione si intende il passaggio di un corpo celeste attraverso il meridiano locale. Considerando che la terra ruota di 15° all'ora esso risulta pari al numero di ore di distanza dal mezzogiorno moltiplicato per 15 (poiché la terra ruota di 15 gradi all'ora alla velocità nominale di 360 gradi al giorno).

L'angolo orario si calcola con la seguente formula (1.2):

$$h = (12 - ora) \cdot 15 \quad (1.2)$$

Per quanto riguarda il valore dell'ora bisogna fare una differenziazione tra ora convenzionale ed ora solare vera.

L'ora solare vera (o true solar time, local apparent time) è l'ora definita in modo che segni (sempre) mezzogiorno quando il sole passa sul meridiano della località. L'ora solare vera differisce pertanto dall'ora convenzionale, che è la stessa per tutte le località di un fuso orario, anche se poste a longitudini differenti; inoltre, a causa del moto di rivoluzione della Terra

intorno al sole, il passaggio al meridiano non avviene a intervalli esattamente uguali di 24 ore, ma mostra dei ritardi o anticipi rispetto al valor medio convenzionale, che variano nel corso dell'anno.

Le differenze (ritardi o anticipi) sono calcolate mediante un'espressione detta Equazione del tempo (Fig.1.5). Quest'ultima è calcolabile con la seguente espressione (1.3):

$$ET = 0.0172 + 0.4281 \cos \vartheta_0 - 7.3515 \sin \vartheta_0 - 3.3495 \cos 2\vartheta_0 - 9.3619 \sin 2\vartheta_0 \quad (1.3)$$

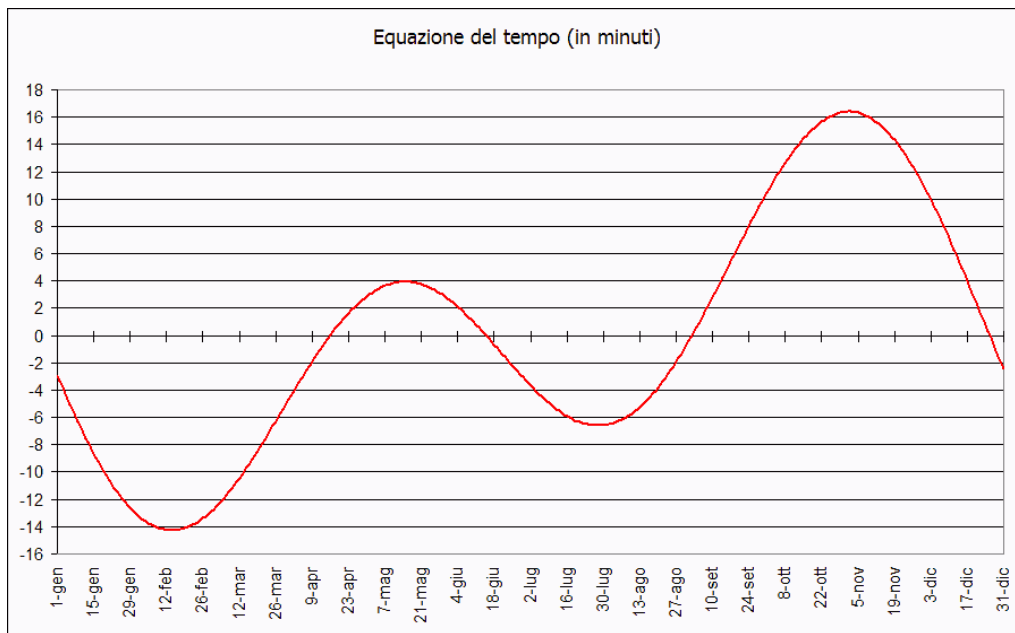


Fig.1.5 - Equation Time nei vari mesi dell'anno.

L'espressione per il calcolo dell'ora solare vera *OSV* è data infine dall'equazione (1.4):

$$OSV = OC + F \cdot Longitudine + ET \quad (1.4)$$

dove:

- *OC* rappresenta l'ora convenzionale;
- *Longitudine* rappresenta la differenza tra la longitudine del meridiano locale e quella del meridiano di riferimento;
- *F* rappresenta il fattore di conversione fra angoli (longitudini) e tempi (ore); se la longitudine è espressa in gradi e si vuole il risultato in minuti, si deve porre $F=4$;
- *ET* rappresenta la correzione dovuta all'equazione del tempo.

La latitudine, la longitudine ed ET sono espressi in radianti.

1.1.5 Altezza solare α .

L'altezza solare α rappresenta l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale (Fig.1.6).

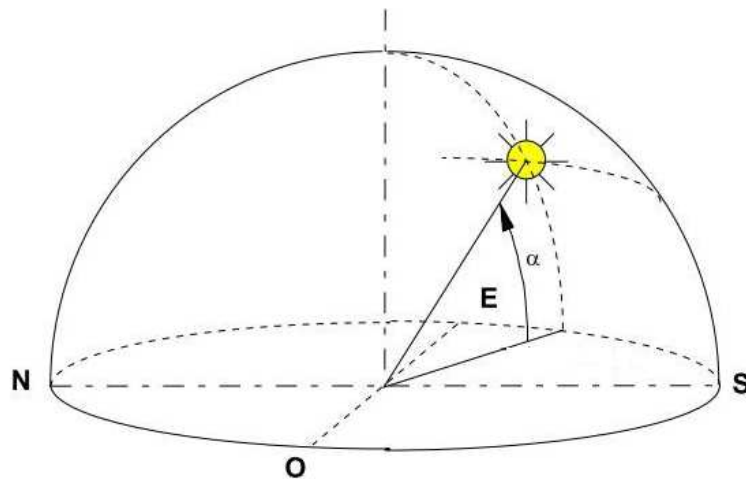


Fig.1.6 - Altezza solare α .

Il valore dell'altezza solare si ottiene applicando l'equazione (1.5):

$$\alpha = \arcsen(\sen\delta \cdot \sen L + \cos\delta \cdot \cos L \cdot \cosh) \quad (1.5)$$

dove:

- δ rappresenta la declinazione solare;
- L rappresenta la latitudine;
- h rappresenta l'angolo orario.

L'angolo complementare ad α è chiamato angolo zenitale Z ovvero l'angolo formato tra i raggi solari e la direzione dello zenit.

1.1.6 Azimut solare γ .

L'azimut solare γ rappresenta l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud; è positivo se la proiezione cade verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso ovest (dopo mezzogiorno) (Fig.1.7).

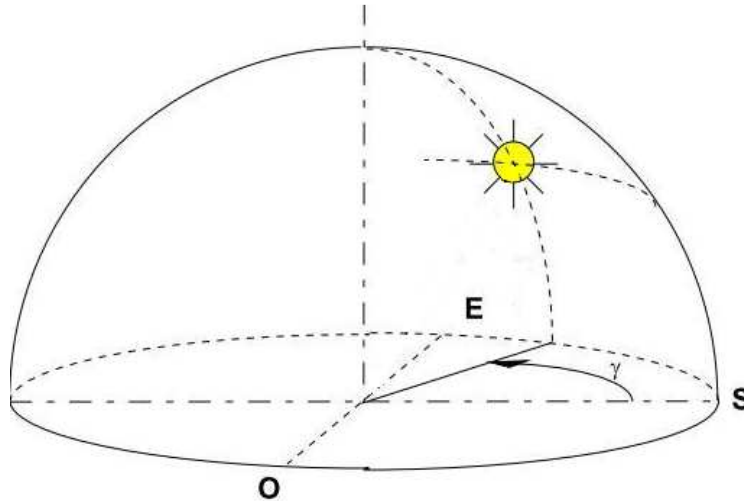


Fig.1.7 - Azimut Solare γ .

Il valore dell'azimut solare γ si ottiene applicando l'equazione (1.6):

$$\gamma = \arcsen\left(\frac{\cos \delta \cdot \sen h}{\cos \alpha}\right) \quad (1.6)$$

dove:

- δ rappresenta la declinazione solare;
- α rappresenta l'altezza solare;
- h rappresenta l'angolo orario.

L'azimut solare γ può assumere valori maggiori di 90° in senso assoluto mentre la funzione arcoseno fornisce valori compresi tra -90° e $+90^\circ$. E' necessario quindi in questi casi apporre delle correzioni ai valori calcolati. Se non sono verificate le seguenti condizioni:

$$\sen \alpha \geq \frac{\sen \delta}{\sen L} \quad \text{per } L \geq 0;$$

$$\operatorname{sen}\alpha < \frac{\operatorname{sen}\delta}{\operatorname{sen}L} \quad \text{per } L < 0;$$

il valore corretto dell'azimut γ_c si calcola applicando l'equazione (1.7):

$$\gamma_c = \operatorname{segno}(\gamma) \cdot (180 - |\gamma|) \quad (1.7)$$

Nel caso in cui la latitudine della località considerata dovesse essere al di fuori del range di $\pm 66.5^\circ$, la formula di calcolo dell'angolo orario non può più essere utilizzata. In particolare:

se $|L + \delta| > 90^\circ$ il sole non tramonta mai;

se $|L - \delta| > 90^\circ$ il sole non sorge mai.

L'angolo orario, indicato nell'equazione (1.2), relativo all'alba h_a o al tramonto h_t può essere calcolato per mezzo dell'equazione (1.5); infatti annullando il $\operatorname{sen}\alpha$ si ottiene l'equazione (1.8):

$$h_a = -h_t = \arccos(-\operatorname{tg}\delta \cdot \operatorname{tg}L) \quad (1.8)$$

1.2 Grandezze della luce [21].

L'occhio è l'organo del nostro corpo che ha il compito di raccogliere gli stimoli luminosi provenienti dal mondo esterno e di tradurli in impulsi nervosi da trasmettere al cervello.

Nel caso di un brusco aumento dello stimolo o di una sua rapida diminuzione, la retina impiega un certo tempo per adattarsi al nuovo livello energetico ed in questo periodo di tempo la visione risulta meno efficiente. Quando una persona passa da un ambiente normalmente illuminato ad uno quasi buio, inizialmente è quasi cieca, poi riacquista gradatamente la visione. Al principio l'adattamento è veloce ma il suo completamento richiede almeno 30 minuti. Passando dal buio alla luce viva, avvengono fenomeni inversi: si ha un primo periodo di abbagliamento, seguito da una perdita di sensibilità che consente, poco dopo, di riprendere la visione corretta. L'adattamento alla luce è più veloce di quello al buio: infatti si completa in pochi minuti.

Un ambiente illuminato in maniera costante può essere percepito come correttamente o scarsamente illuminato a seconda delle aspettative del fruitore, della sua motivazione, delle condizioni atmosferiche esterne, dell'epoca dell'anno, ecc.

L'occhio vede solo una piccola finestra delle infinite radiazioni elettromagnetiche (raggi gamma, ultravioletti, infrarossi, onde radio ecc.; l'insieme di queste radiazioni costituisce lo spettro elettromagnetico) ma, anche all'interno di questa finestra è più sensibile solo alle lunghezze d'onda comprese fra 380 e 780 nm (campo del visibile) che, a ben vedere, è una piccolissima parte dello spettro elettromagnetico (Fig.1.8).

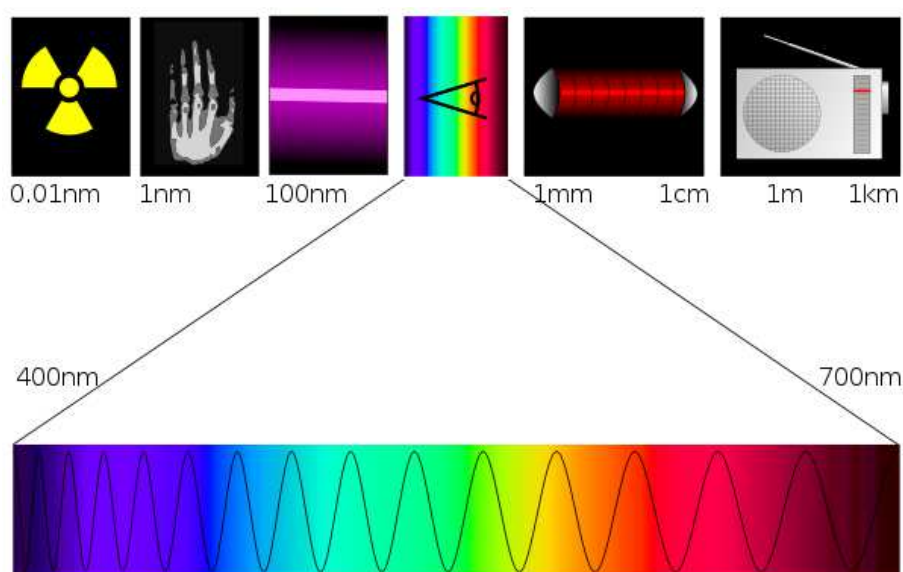


Fig.1.8 – Spettro elettromagnetico.

La lunghezza d'onda, simbolizzata convenzionalmente dalla lettera greca λ (lambda), indica la distanza tra due creste d'onda in un completo ciclo di oscillazione e, nel sistema metrico internazionale è espressa in metri o nanometri ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

L'occhio risulta essere più sensibile ad alcune radiazioni, verso il centro del campo visibile, piuttosto che ad altre. La curva media di comportamento dell'occhio umano è mostrata in Fig.1.9 dove si può vedere che, nella visione diurna, la sensibilità massima corrisponde a radiazioni di lunghezza d'onda pari a 555 nm (*visione fotopica*) (colore verde-giallo) e di 507 nm per quella notturna (*visione scotopica*) (colore verde-blu). L'area racchiusa dalla curva corrisponde al flusso luminoso.

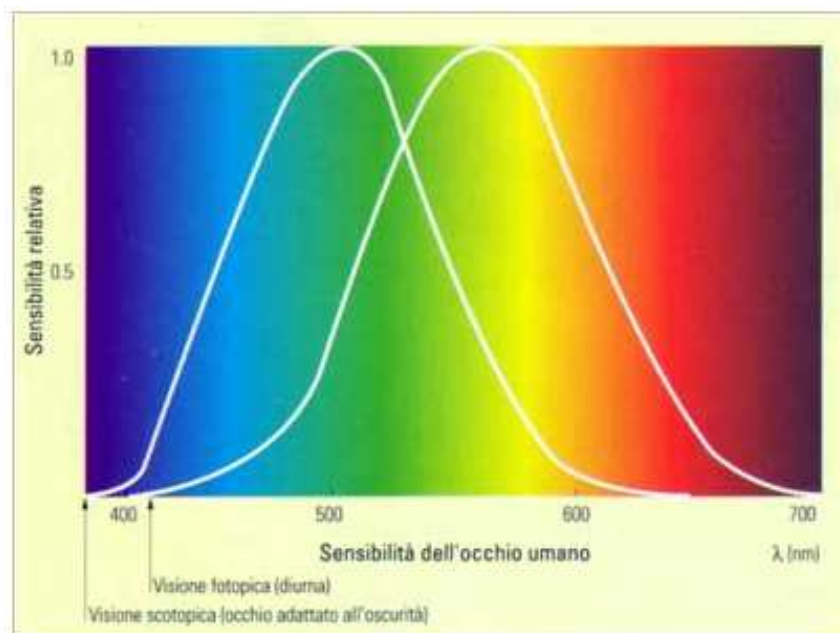


Fig.1.9 – Curva media di comportamento dell'occhio umano.

1.2.1 Flusso luminoso.

Il flusso luminoso è la quantità di luce emessa da una sorgente nell'unità di tempo. Il simbolo è $F(\Phi)$ ed è misurato in lm (lumen). Il lumen è il flusso luminoso emesso nell'angolo solido unitario da una sorgente puntiforme, posta al centro di una sfera di raggio unitario, di intensità luminosa pari ad 1 cd .

1.2.2 Intensità luminosa.

L'intensità luminosa è una parte infinitesima del flusso luminoso ed è definibile come la quantità di luce emessa da una sorgente in una determinata direzione all'interno di un cono, avente dimensioni molto piccole, il vertice posto nella sorgente e come asse longitudinale la direzione di propagazione. Il simbolo è I ed è misurato in cd (candela).

1.2.3 Illuminamento.

L'illuminamento è la quantità di luce (flusso luminoso) che investe una determinata superficie. Il simbolo è E ed è misurato in lx (lux). Il lux equivale al flusso di $1lm$ ricevuto da una superficie dell'estensione di $1m^2$ (Fig.1.10). Se la sorgente è puntiforme l'illuminamento

assume valori inversamente proporzionali alla distanza, regola non applicabile nel caso di sorgenti estese (soffitti luminosi ecc.).

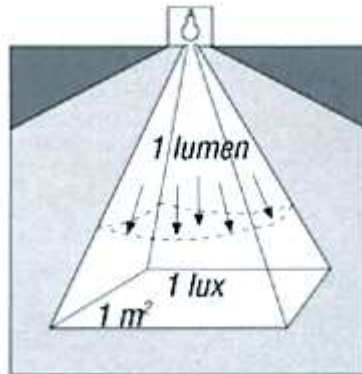


Fig.1.10 – Rappresentazione dell'illuminamento.

1.2.4 Luminanza.

La luminanza rappresenta la sensazione visiva percepita dall'occhio umano, se colpito dalla luce direttamente prodotta da una sorgente luminosa o riflessa da una superficie apparente; è perciò definibile come l'intensità luminosa riferibile ad una superficie. Il simbolo è L ed è misurato in cd/m^2 . La luminanza di una superficie (Fig.1.11) è data dal rapporto tra l'intensità luminosa I emessa, riflessa o trasmessa dalla superficie S secondo la direzione di osservazione e l'area apparente S_a della superficie stessa (l'area apparente è la proiezione della superficie S sul piano normale alla direzione dell'intensità I).

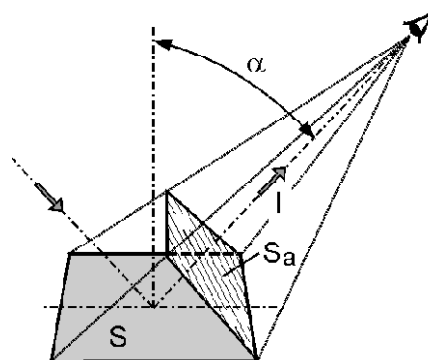


Fig.1.11 – Rappresentazione della luminanza.

2. STRUMENTI DI MISURA DELL'ILLUMINAMENTO NATURALE ESTERNO E DELLA LUMINANZA DEL CIELO.

2.1 Generalità.

Gli strumenti capaci di misurare l'illuminamento di una superficie sono detti fotometri o luxmetri. La parte sensibile dello strumento è costituita da una cellula fotoelettrica, generalmente al silicio, munita di un filtro ottico avente un coefficiente di trasmissione monocromatico $\tau(\lambda)$ sovrapponibile con la curva di visibilità relativa dell'occhio umano $V(\lambda)$. L'errore rispetto alla curva di visibilità è individuato dal parametro $f_1\%$ (vedi DIN 5032/6 e pubblicazioni CIE n°53 e n°69).

La risposta dello strumento, al variare della direzione della radiazione incidente, deve essere in accordo con la legge del coseno. I fotometri sono muniti di una copertura emisferica che diffonde all'interno la radiazione incidente con l'effetto di correggere le deviazioni dalla legge del coseno. L'errore rispetto alla legge del coseno è individuato dal parametro $f_2\%$.

Lo strumento è dotato di un amplificatore con risposta in Volts o di un amplificatore con risposta in mA (0-20 mA).

L'intervallo della risposta varia tra 100 μ V e 10 V. Il fattore di conversione tra Volts e lux è di generalmente pari a circa 50 μ V/lux.

Per applicazioni outdoors i fotometri sono alloggiati in contenitori a prova d'acqua.

Poiché la risposta del filtro ottico varia al variare della temperatura ambiente, i fotometri sono corredati di un controllo termostatico capace di mantenere costante la temperatura del filtro (normalmente a 35 °C), mediante un riscaldatore elettrico.

Affinché le misure siano corrette la copertura di vetro deve essere mantenuta pulita. Per prevenire il deposito di umidità sul sensore, vi è una sostanza igroscopica contenuta nel corpo del fotometro.

2.2 Fotometro per la misura dell'illuminamento globale sul piano orizzontale e sui piani verticali.

Alcune ditte costruttrici, tra cui la PRC Krochmann GmbH di Berlino, forniscono uno strumento provvisto di 5 fotometri per la misura dell'illuminamento globale sul piano orizzontale e su quattro piani verticali, alloggiati su un supporto cubico. Lo strumento è

provvisto di schermi che intercettano la luce riflessa dal terreno. Ciascun fotometro è provvisto di controllo termostatico e convertitore della fotocorrente in Volts.

La deviazione dalla curva di visibilità $V(\lambda)$ presenta un valore $f_1' < 3\%$; il parametro di correzione per la deviazione dalla legge del coseno $f_2 < 1.5\%$. Lo strumento è adatto per uso esterno permanente.

Il modello della Krochmann è denominato FET -GV; i cinque fotometri sono del tipo FET 30 C 15 0U D8 (Fig.2.1).



Fig.2.1 - Fotometro per la misura dell'illuminamento globale sul piano orizzontale e su quattro piani verticali.

2.3 Fotometro per la misura dell'illuminamento diretto proveniente dal sole.

Questo strumento deve essere montato su un inseguitore solare; è adatto per uso esterno permanente; è dotato di controllo termostatico e di convertitore della fotocorrente in Volts. La risposta del sensore si sovrappone alla curva di visibilità $V(\lambda)$ con $f_1' < 3\%$.

Il semiangolo del campo visivo dello strumento, costituito da un tubo rivolto verso il sole, è pari a 2.85° .

Il diametro dell'area sulla superficie sensibile dello strumento è di 8 mm (Fig.2.2).

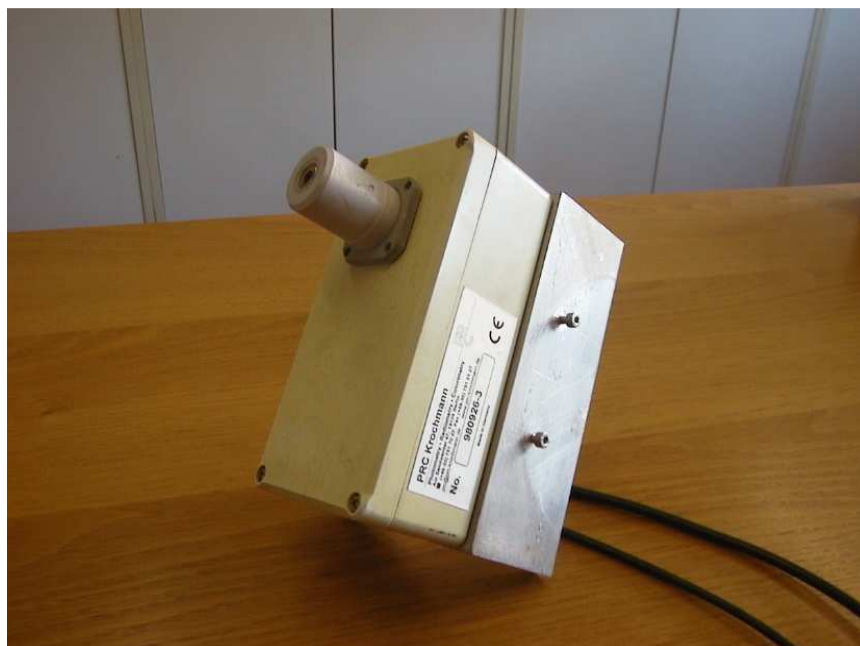


Fig.2.2 - Fotometro per la misura dell'illuminamento diretto.

2.4 Inseguitore solare.

Gli inseguitori solari (Fig.2.3) sono delle apparecchiature capaci di allineare i pireliometri e/o i fotometri per la misura della luce diretta con i raggi solari. L'inseguitore è provvisto di un micro computer in grado di determinare ad ogni istante l'angolo azimutale e l'angolo zenitale del sole, e di un motore elettrico capace di far ruotare i supporti degli strumenti attorno a due assi, in modo da puntarli verso il sole. In condizioni climatiche non particolarmente severe (come le regioni polari), è possibile usare un inseguitore a due assi con trasmissione a cinghia. Nel caso di climi molto severi o di necessità di misure più accurate, viene usato un inseguitore con trasmissione ad ingranaggi. Il motore elettrico è generalmente alimentato da corrente alternata con 115/230 Volts e frequenza 60/50 Hz con potenza standard da 50 VA.

La Kipp & Zonen fornisce i due tipi di inseguitore, denominati rispettivamente 2AP BD (Belte Drive) e 2AP GD (Gear Drive).

L'accuratezza del posizionamento angolare del tipo 2AP BD è $<0.1^\circ$, mentre l'accuratezza del tipo 2AP GD è $<0.05^\circ$; la risoluzione del primo strumento è di 0.036° quella del secondo strumento di 0.0025° .

Per il suo posizionamento iniziale, è indispensabile fornire al software di controllo la latitudine e la longitudine esatta del luogo di installazione dell'inseguitore.

Una volta inserita l'ora esatta, l'inseguitore funziona in modalità stand-alone ed insegue il sole calcolando la sua traiettoria mediante il calcolo dell'angolo azimutale e dell'angolo zenitale con algoritmi memorizzati nella sua scheda madre.



Fig.2.3 - Inseguitore solare.

2.5 Fotometro per la misura dell'illuminamento diffuso orizzontale.

Si tratta di un fotometro posto sul piano orizzontale, provvisto di un anello di guardia capace di intercettare la luce solare diretta (Fig.2.4). In tal modo il sensore viene illuminato dalla sola luce diffusa. L'anello deve essere periodicamente posizionato in modo da schermare continuamente il sensore dalla luce diretta, al variare della posizione del sole.

Lo strumento della Krochmann è denominato modello FET-S. L'anello di guardia di cui è provvisto è del tipo CM 121B.

Lo strumento è provvisto di controllo termostatico, amplificatore con output in Volts, o, a richiesta, amplificatore con output in corrente da 0-20 mA. L'output in Volts può variare tra 200 μ V e 10 V, il fattore di conversione è generalmente 58,8 μ V/lux.

Il fotometro richiede un alimentatore in corrente continua da ± 15 V, 0.3 mA DC.

Naturalmente, l'anello di guardia intercetta anche una parte della radiazione diffusa del cielo, pertanto si deve effettuare una correzione delle misure, moltiplicando i dati sperimentali per un coefficiente di correzione.

Il fattore di correzione C risulta pari a:

$$C = \frac{1}{1 - S} \quad (2.1)$$

dove S , pari alla frazione della radiazione diffusa dal cielo intercettata dall'anello di guardia, nell'ipotesi di luminanza uniforme del cielo, è calcolabile con l'espressione (2.2):

$$S = \frac{2V \cdot \cos D \cdot (U_0 \cdot \sin B \cdot \sin D + \sin U_0 \cdot \cos B \cdot \cos D)}{\pi} \quad (2.2)$$

Nell'equazione (2.2) V rappresenta l'angolo sotto il quale il centro dell'anello vede la larghezza dell'anello stesso. Esso è pari a 0.185 rad per lo strumento della PRC Krochmann. D rappresenta la declinazione del sole, B la latitudine della località, ed U_0 è calcolabile con la formula (2.3):

$$\cos U_0 = -\tan B \cdot \tan D \quad (2.3)$$

Alla latitudine di 40° il fattore correttivo varia tra 1.04 nella prima metà del mese di Gennaio ed 1.14 nel mese di Giugno e Luglio.



Fig.2.4 - Fotometro con anello di guardia per la misura dell'illuminamento diffuso.

2.6 Fotometro per la misura della luminanza zenitale.

Lo strumento è provvisto di controllo termostatico e convertitore della fotocorrente in Volts. La deviazione dalla curva di visibilità $V(\lambda)$ presenta un valore $f_1' < 3\%$. Lo strumento è adatto per uso esterno permanente.

Il semiangolo del campo visivo dello strumento è di 5.5° , pari alla metà dell'angolo piano con cui sono viste dalla terra le 145 aree di cielo circolari del modello Tregenza.

Lo strumento della Krochmann è denominato modello FET 30 L11 0U Dx (Fig.2.5).



Fig.2.5 - Fotometro per le misura della luminanza zenitale.

2.7 Sistema di acquisizione dati per l'illuminamento globale, diretto e diffuso.

Il sistema di acquisizione dati più semplice prevede l'utilizzo dei Data Loggers. Un Data Logger è un sistema di acquisizione indipendente ed è in grado di acquisire un certo numero di ingressi, registrare i valori ed eventualmente elaborarli. Il pregio dei Data Loggers è quello di un sistema autonomo e dedicato al tipo di utilizzo. I difetti di tali sistemi sono la poca flessibilità, nel caso in cui nasca l'esigenza di aggiungere altri punti di misura non previsti inizialmente, e la dipendenza da software dedicati memorizzati sulla EPROM.

Con la nuova generazione di hardware e software è possibile utilizzare gli "strumenti virtuali" per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati sperimentali. Per "strumento virtuale" si intende l'interfaccia grafica sul monitor del computer, una scheda di acquisizione (DAQ), che permette di gestire e configurare uno strumento e lo strumento stesso. I pregi di questi sistemi sono la flessibilità, essendo possibile espandere il sistema, e l'indipendenza dell'utente da software dedicati che richiedono alti costi di aggiornamento.

La catena dei componenti per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali provenienti dai sensori della luce (Fig.2.6) è la seguente:

- SENSORE
- MODULO DI CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE
- SCHEDA DI ACQUISIZIONE
- COMPUTER
- SOFTWARE

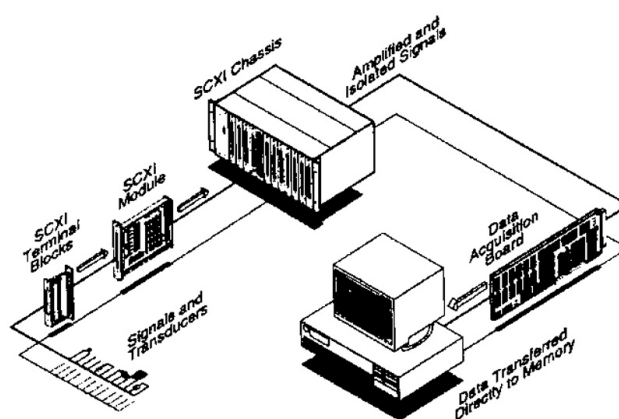


Fig.2.6 – Sistema di acquisizione dati.

2.7.1 Moduli di condizionamento del segnale.

Lo scopo principale dei Moduli di Condizionamento del Segnale è quello di filtrare il segnale proveniente dal sensore da frequenze che possono generare errori di misura, amplificarlo, linearizzarlo, isolarlo e prepararlo per essere inviato alla scheda di acquisizione dati.

I moduli di condizionamento sono contenuti in un chassis del tipo SCXI-1001 a 12 slot della National Instruments (Fig.2.7). Lo chassis è collegato con la scheda acquisizione dati del tipo PCI posta nel computer.



Fig.2.7 - CHASSIS SCXI 1001.

I moduli usati sono del tipo SCXI-1100 1100 con terminal block SCXI-1300, a 32 canali multiplexati per l'acquisizione di segnali analogici in volt o in ampere.

Il modulo permette di impostare un filtraggio al segnale di 4 Hz o di 10 kHz a seconda se il segnale varia lentamente oppure velocemente, eliminando così il rumore indesiderato.

Un parametro importante nelle impostazioni del modulo è il guadagno che può essere posto pari a 1 oppure a 1000.

Il modulo effettua l'amplificazione del segnale del sensore per poter essere paragonabile a quello elaborato dalla scheda che varia da 0 a 10 volt.

All'interno dei moduli SCXI 1100 sono posizionati una serie di jumpers per la configurazione del modulo (Fig.2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12).



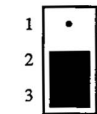







Jumper	Description	Configuration
 W5	Connects MISO to SERDATOUT; factory-default setting	
W5	Parking position	
 W6	Factory setting; do not remove this jumper	
W9	Connects pullup to SERDATOUT (Revision C and higher modules only); factory-default setting	
 W9	Parking position (not connected on Revision A and B modules)	
 W11	Factory default (Revision A and B modules only)	

Fig.2.8 - Configurazione dei jumpers W5, W6, W9 e W11 per la connessione dei segnali digitali.

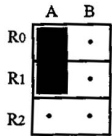
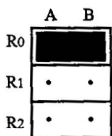
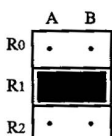
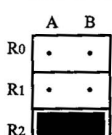
Jumper	Description	Configuration
W10	Factory setting; parking position (used with MIO boards in differential mode)	
W10	Connects the data acquisition analog ground (pins 1 and 2 on the rear signal connector) to the PGIA reference (used with single-ended boards)	
W10	Connects the PGIA reference to the SCXibus guard	
→ W10	Enables the Pseudodifferential Output mode (connects pin 19 of the PGIA output reference to the rear signal connector)	

Fig.2.9 - Configurazione del jumper W10.

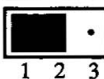
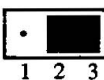
Jumper	Description	Configuration
W1	Factory setting; parking position (used for ground-referenced sources)	 1 2 3
→ W1	Floating source connection	 1 2 3

Fig.2.10 - Configurazione del jumper W1.

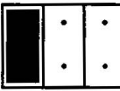
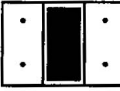

Jumper	Description	Configuration
W2	Factory setting is full bandwidth (FBW) and no filtering	 W2 W3 W4
W3	10 kHz lowpass filter	 W2 W3 W4
→ W4	4 Hz lowpass filter	 W2 W3 W4

Fig.2.11 - Configurazione dei jumper W2, W3 e W4.


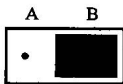

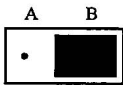
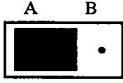
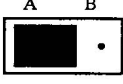
Jumper	Description	Configuration
 W7	Factory setting; parking position. Disconnects the front connector from the module output	
 W8	Factory setting; parking position	
W7	Amplifier Output is connected to the front connector OUTPUT pin	
W8	Amplifier Reference is connected to the front connector AOREF pin	

Fig.2.12 - Configurazione dei jumpers W7 e W8.

Le frecce indicano la configurazione attuale del modulo.

Le specifiche dei moduli SCXI 1100 (Fig.2.13) sono le seguenti:

- Numero di canali: 32
- Range di input analogico: ± 10 V
- Guadagno (selezionabile via software): 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000
- Impedenza di input: > 1 GW
- Filtri: 4 Hz e 10 kHz
- Errore del guadagno con DC:
 - Guadagno 1 – errore 0,01%
 - Guadagno 2÷2000 – errore 0,1%



Fig.2.13 - MODULO SCXI 1100.



Fig.2.14 - TERMINAL BLOCK SCXI 1300.

Per la misura di segnali provenienti da termoresistenze si utilizzano moduli del tipo SCXI-1122 (Fig.2.15) con terminal block SCXI-1300, a 16 canali multiplexer.



Fig.2.15 - MODULO SCXI 1122.

2.7.2 Scheda di acquisizione dati (daq).

La scheda di acquisizione dati è una scheda multifunzione provvista di un convertitore analogico/digitale (ADC) con ingressi ed uscite sincronizzate per bus PCI. Lo scopo della scheda di acquisizione dati è quello di convertire il segnale analogico proveniente dai moduli in segnale digitale. Il parametro fondamentale di un ADC è il numero di bit. Il numero di bits determina il range di valori per la conversione binaria in output dal convertitore. Più alta è il numero di bit, più alto sarà il numero di suddivisioni del range e più piccola sarà la variazione di voltaggio letta del convertitore. Per esempio, le schede a 12 bit, effettuano una suddivisione

del campo di misura in $2^{12}=4096$ parti, mentre quelle a 16 bit effettuano $2^{16}=65536$ suddivisioni..

Un parametro importante nelle impostazioni della scheda è il guadagno che può essere settato per valori che vanno da 1 a 2000. Il guadagno produce l'amplificazione dei bassi segnali provenienti dai sensori per migliorare l'accuratezza di lettura.

Per esempio supponiamo di dover misurare un segnale di basso livello, +30mV, con una scheda da 12 bit con voltaggio di input 0-10V, con guadagno 100, la risoluzione di misura sarà pari a:

$$\frac{\text{voltaggio in input all' ADC}}{\text{guadagno} \cdot 2^n} = \frac{10}{100 \cdot 2^n} = 0,0244 \text{ mV} \quad (2.4)$$

Le impostazioni della scheda NI-DAQ del tipo PCI 1200 sono le seguenti:

- 8 canali di ingresso configurabili via software, a 8 ingressi singoli o a 4 ingressi differenziali
- convertitore analogico/digitale (ADC) a 12 bit
- 2 convertitori digitali/analogici (DAC) con uscite in volt
- 24 linee di I/O digitali TTL (Transistor Transistor-Logic) compatibili
- 3 canali a 16 bit, atti a generare i clock di acquisizione e di generazione I/O
- I/O subsystem: ADC 0
- Polarità: unipolare o bipolare
- Mode: Referente single-Ended
- Range: bipolare: $\pm 5 \text{ V}$ – unipolare 0-10 V
- Coupling: DC
- Guadagno: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
- Velocità di campionamento è funzione del guadagno ed è pari a:
 - per singolo canale: guadagno: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 - Velocità:100 kS/s
 - per canali multipli:
 - guadagno: 1
 - Velocità: 100 kS/s

- guadagno: 2, 5, 10	Velocità: 77 kS/s
- guadagno: 20	Velocità: 66,6 kS/s
- guadagno: 50	Velocità: 37 kS/s
- guadagno: 100	Velocità: 16,6 kS/s

- Errore di offset:
 - Prima della calibrazione: $\pm 2\%$ max
 - Dopo della calibrazione: 10 mV max
- Errore di guadagno:
 - Prima della calibrazione: pari $\pm 2\%$ del massimo valore letto
 - Dopo della calibrazione: pari $\pm 0,02\%$ del massimo valore letto

L'accuratezza assoluta dell'errore del sistema si può calcolare come segue:

$$E_{AA} = E_{SCXI} + E_{DAQ}$$

$$E_{SCXI} = SCXI_{offset\ error} + SCXI_{gain\ error} + SCXI_{non\ linearity}$$

$$E_{DAQ} = DAQ_{offset\ error} + DAQ_{gain\ error} + DAQ_{non\ linearity}$$

Esempio:

- ✓ Specifiche del SCXI-1100:

input offset: 5 mV

output offset: 40 mV

$$SCXI_{offset\ error} = 5,04\ mV$$

gain error: 0,1% della lettura

non linearità; 0,008% del fondo scala o 1,6 mV

- ✓ Specifiche della DAQ:

errore di offset dopo la calibrazione: 10 mV

$$DAQ_{offset\ error} = 10\ mV$$

gain error dopo la calibrazione: $\pm 0,02\%$ del massimo valore letto

non linearità; $0,002\%$ del fondo scala o $0,4 \text{ mV}$

$$E_{\text{SCXI}} = 5,04 \text{ } \mu\text{V} + 0,10\% \text{ della lettura} + 1,6 \text{ } \mu\text{V} = 0,10\% \text{ della lettura} + 6,64 \text{ } \mu\text{V}$$

$$E_{\text{DAQ}} = 10 \text{ } \mu\text{V} + 0,02\% \text{ della lettura} + 0,4 \text{ } \mu\text{V} = 0,02\% \text{ della lettura} + 10,4 \text{ } \mu\text{V}$$

$$E_{\text{AA}} = E_{\text{SCXI}} + E_{\text{DAQ}} = 0,12\% \text{ della lettura} + 17,04 \text{ } \mu\text{V}$$

Per esempio, il voltaggio misurato da un fotometro per un illuminamento di 5000 lux è pari a :

$$\frac{5000}{17006,8} = 0,294 \text{ volt.}$$

$$\text{Quindi: } E_{\text{AA}} = \frac{0,12}{100 \cdot 0,294} + 17,04 \cdot 10^{-6} = 0,000369 \text{ V}$$

Che in termini di illuminamento corrisponde a $0,000369 \cdot 17006,8 = 6,3 \text{ lux}$.

L'errore di misura dovuto al sistema di acquisizione è pari allo $0,12\%$.

2.7.3 Acquisizione con utilizzo dei Field Points.

Un altro sistema, che può essere utilizzato per l'acquisizione dei segnali provenienti da fotometri, è quello dei Field Points della National Instruments. Sono moduli a 8 ingressi a 16 bit, quindi con buona risoluzione, ma con una dinamica di inseguimento del segnale non molto elevata.

Il sistema di acquisizione con Field Pointes può essere configurato come viene indicato in seguito:

- Un modulo Field Point di collegamento al Network NI FP-1601, TCP/IP 100 Base TX (Fig.2.16).



Fig.2.16 - MODULO FP 1601.

- Un modulo Field Point FP-AI-100 per 8 ingressi analogici (Fig.2.17).



Fig.2.17- MODULO FP -AI -100.

- Un computer con porta ethernet.

2.7.4 Computer.

E' sufficiente un PC con slot PCI libero, per l'inserimento della scheda di acquisizione dati, oppure dotato di porta ethernet per il collegamento del modulo FP 1601, nel caso in cui si adottasse la soluzione dei Field Points per l'acquisizione dei dati.

2.7.5 Software.

Il pacchetto software utilizzato per l'acquisizione, l'analisi e la presentazione dei dati è il LabVIEW™ della National Instruments Corporation.

Il LabVIEW™ è stato progettato per misurare, controllare, monitorare processi ed applicazioni. Esso consente di operare in un ambiente di programmazione grafica. Il software dispone di un compilatore grafico in grado di convertire il codice sorgente, costituito da diagrammi a blocchi, direttamente in codice macchina.

Utilizzando il LabVIEW™ si possono strutturare i programmi in forma modulare sviluppando una gerarchia di sottoprogrammi chiamati VIs (strumenti virtuali).

La definizione dei sottoprogrammi (VIs), consente al programmatore di gestire una intera sezione di codice, mediante la semplice gestione di una icona precedentemente definita, la quale definirà le connessioni di ingresso e di uscita (diagramma di flusso) alle restanti sezioni che costituiscono il diagramma completo.

Il LabVIEW™ utilizza il modello di programmazione DATAFLOW, cioè le icone (sottoprogrammi "VIs") che compongono il diagramma a blocchi, non vanno in esecuzione fin quando su di esse non arriva il flusso di dati necessario per l'esecuzione. La programmazione di tipo DATAFLOW, rispetto ai linguaggi che utilizzano una programmazione di tipo convenzionale, non ha vincoli per quanto riguarda l'ordine di creazione dei sottoprogrammi. L'ordine di esecuzione dei VIs in LabVIEW™ è stabilita dal flusso di dati tra i nodi e non dalle linee sequenziali di testo. Inoltre si possono creare diagrammi che hanno flussi di dati multipli ed eseguire più operazioni contemporaneamente.

Nella libreria del LabVIEW™ sono presenti una serie di procedure (VI) con le seguenti funzioni:

- acquisizione, analisi ed elaborazione dei dati;
- gestione dei file.

Un VI di LabVIEW consiste in un pannello frontale (front panel) e di un diagramma a blocchi (block diagram), dove quest'ultimo è composto da icone opportunamente connesse tramite il diagramma di flusso.

Il LabVIEW ha la capacità di poter lavorare in multitasking. Si possono mandare contemporaneamente in esecuzione più Vis indipendenti. In particolare modo può eseguire altre applicazioni senza interrompere controllo dei dati.

Il pannello frontale costituisce l'interfaccia per l'utente mentre il diagramma a blocchi interfaccia il codice attraverso le icone (Fig.2.18).

Nel pannello frontale vengono inserite le informazioni che necessitano al VI e vengono visualizzate le informazioni di uscita dal diagramma a blocchi.

Il pannello frontale emula perfettamente il pannello fisico degli strumenti, da qui il nome di VI. Esso può contenere tutta la strumentazione virtuale inerente al controllo ed all'indicazione delle grandezze fisiche in esame.

Infatti si possono inserire interruttori di diverse forme (variabili logiche), indicatori digitali, indicatori analogici, grafici, ecc. proprio come in uno strumento reale. Inoltre selezionando questi simboli si attiva la funzione corrispondente nel diagramma a blocchi senza scrivere alcuna istruzione.

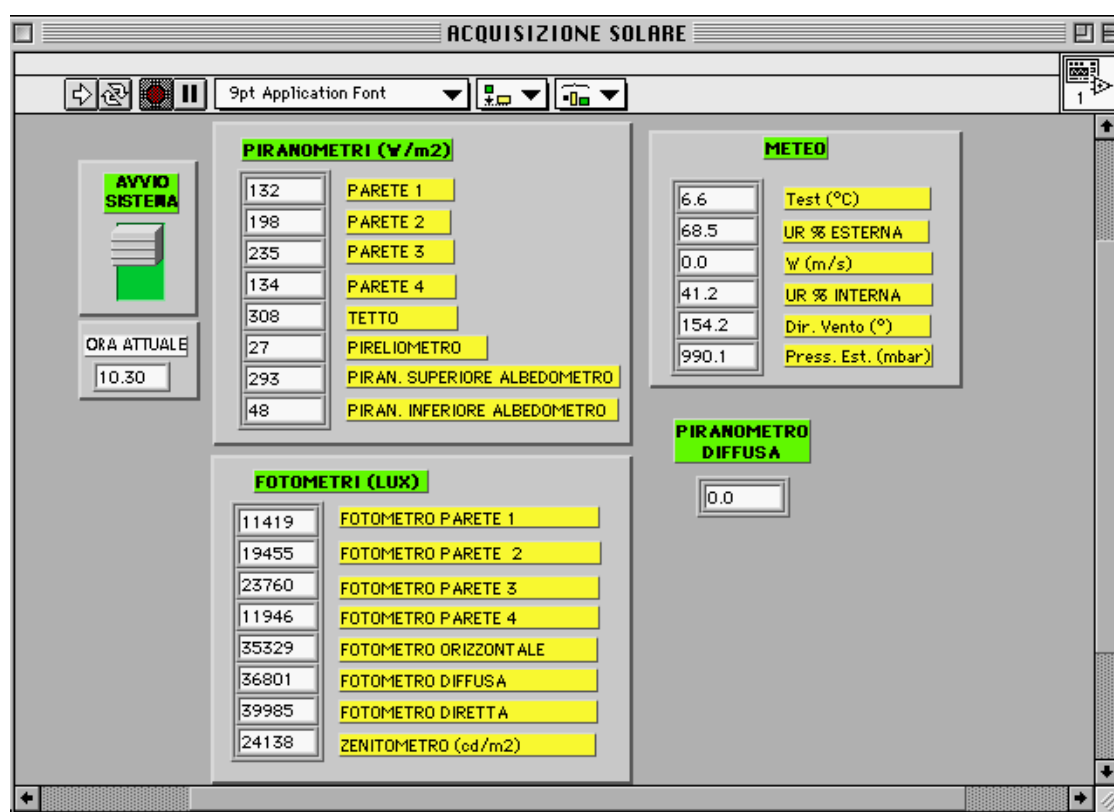


Fig.2.18 - Pannello frontale del sistema acquisizione dati.

Il diagramma a blocchi (Fig.2.19) viene creato collegando i vari blocchi funzionali presenti nella libreria del LabVIEW, con i terminali degli oggetti definiti nel pannello frontale, oppure nel caso di acquisizione e controllo di dati, con i terminali che interfacciano l'hardware esterno. Il collegamento avviene per mezzo di fili (wires) virtuali.

La manipolazione degli oggetti presenti sia nel pannello frontale che nel diagramma a blocchi, avviene utilizzando gli attrezzi di posizionamento presenti sulla tavolozza del pannello frontale o del diagramma a blocchi. Una volta selezionato un oggetto sul diagramma a blocchi o sul pannello frontale, lo si può cancellare, tagliare, copiare o muovere. Nel diagramma a blocchi, non si possono cancellare terminali creati dal pannello frontale. Per rimuovere il terminale bisogna cancellare il controllore dal pannello frontale.

I blocchi funzionali presenti nella libreria del Lab VIEW sono accessibili dalla finestra delle funzioni del menù del block diagram.

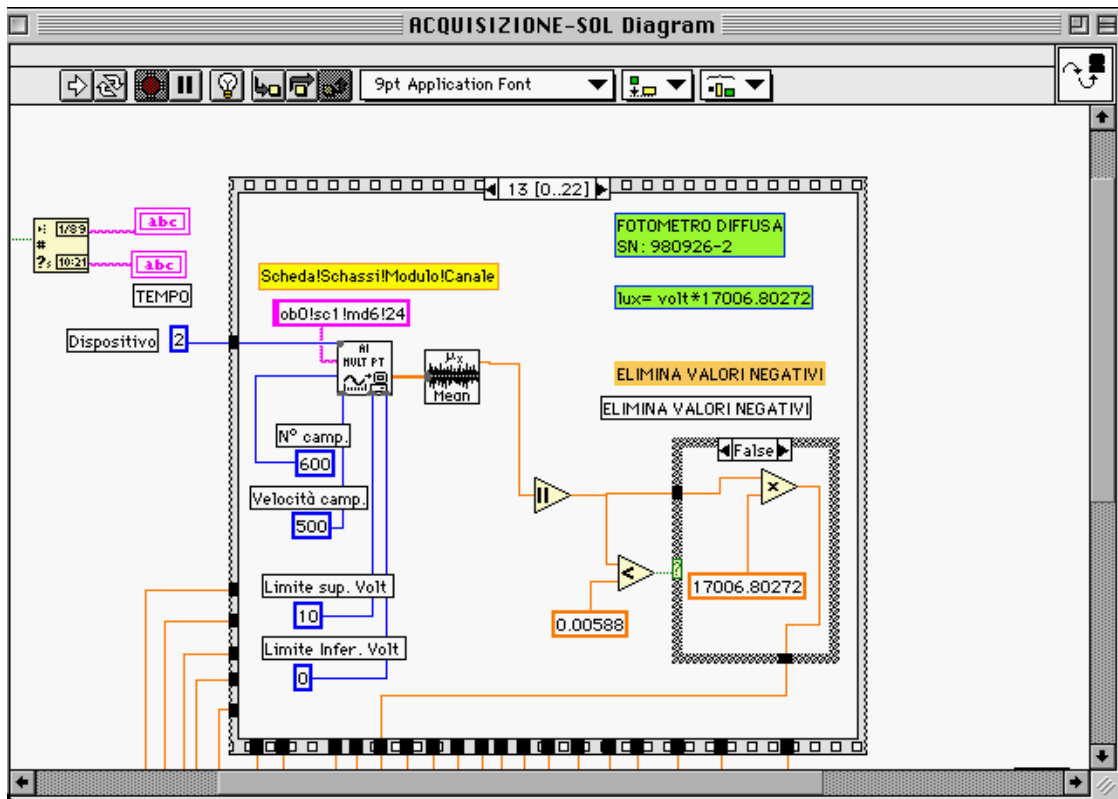


Fig.2.19 - Diagramma a blocchi di un fotometro.

Il LabVIEW offre la possibilità di poter vedere esattamente quello che accade durante l'esecuzione di un VI. Dal diagramma a blocchi è possibile abilitare un comando contrassegnato da una lampadina (virtuale); abilitando la lampadina, si abilita il comando che permette di osservare il flusso di dati. Quando parte l'esecuzione del VI, piccole palline scorrono lungo i fili di collegamento che rappresentano il flusso di dati. Quando le

informazioni arrivano alle icone (subVIs) del diagramma, il nodo mostra il dato effettivamente arrivato all'interno di un riquadro.

Questo modo di operare è molto utile, in quanto si possono analizzare i singoli VI punto per punto ed è possibile vedere esattamente cosa succede all'interno dei subVI ed eventualmente trovare errori con molta facilità.

Diagramma a blocchi si individuano i seguenti oggetti.

- Dispositivo: questo è un numero intero e sta' ad indicare lo slot di alloggiamento del dispositivo (scheda acquisizione);
- Canale: è una stringa, ed indica l'indirizzo del canale su cui si vuole acquisire; ad esempio la stringa ob0!scl!md6!24 indica l'indirizzo del canale 24 del modulo alloggiato nello slot numero 6 dello chassis numero 1, connesso al canale 0 della scheda acquisizione.
- Numero di campionamenti: è un numero intero ed indica quanti campionamenti si devono effettuare.
- Velocità di campionamento: indica la velocità con cui si devono effettuare i campionamenti;
- Limite superiore ed inferiore: rappresentano rispettivamente la massima e minima tensione del segnale analogico in ingresso; il LabVIEW usa questi valori per calcolare il guadagno.
- Mean: calcola la media dei campionamenti effettuati.

Inoltre sul diagramma a blocchi sono riportati una serie di operatori matematici e booleani.

Le acquisizioni avvengono in modo sequenziale; cioè il VI inizia l'acquisizione dal primo canale del primo modulo e termina l'acquisizione sull'ultimo canale dell'ultimo. Si utilizza questa metodologia perché i moduli operano in modo multiplex.

Le acquisizioni vengono fatte ogni 4 minuti; per far ciò all'interno del VI è presente un contatore di tempo che detta i tempi di acquisizione ed i dati acquisiti vengono conservati in un array temporaneo. All'uscita del subVI di acquisizione i dati contenuti nell'array vengono convertiti in formato stringa. Successivamente, viene inserita un'altra stringa contenente l'orario di acquisizione.

Il VI crea automaticamente un file ogni giorno, etichettato con la data del giorno corrispondente. I dati vengono scaricati su un file di tipo testo; nella prima colonna è riportato l'orario di acquisizione e nelle colonne successive i dati di ogni sensore.

2.8 Lo Sky Scanner.

Il Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria è dotato di uno Sky Scanner (Fig.2.20). Lo Sky Scanner [22] è uno strumento progettato per misurare la luminanza e la radianza del cielo. I due sensori, i quali misurano rispettivamente la luminanza e la radianza, hanno un angolo di apertura di 11° . La misura delle due grandezze avviene ogni 4,5 minuti. Un'intera scansione del cielo viene effettuata in circa 10 minuti. Il valore della luminanza è misurato in kcd/m^2 mentre quello della radianza in W/m^2 .



Fig.2.20 - Sky Scanner.

Lo strumento è composto dai seguenti elementi:

- optical sensor: misura sia la luminanza sia la radianza ad ogni punto;
- luminance sensor: misura la luminanza;
- radiance sensor: misura la radianza;
- tracker: dirige il sensore ottico verso i 145 punti di misura che sono definiti dall'altezza e dall'angolo azimutale dell'emisfero del cielo;
- communicator connector: è un connettore per cavo necessario per collegare i dati di comunicazione con il computer;
- sensor connector on the sensor's side and on the tracker's side: sono connettori per cavo per collegare i dati di comunicazione tra sensore ottico e tracker;
- parti per l'installazione.

Lo Sky Scanner traccia 145 punti dell'emisfero del cielo [23]. La misura di 145 punti è raccomandata dalla CIE 108-1994 (International Lighting Commission) (Tab.2.1).

Tab.2.1 – Coordinate dei 145 punti della volta celeste.

Elevation angle θ	Angular step of the azimuth	Number of points	Description
6°	12°	30	From azimuth angle 0° (South) of point 1 to point 30, clockwise direction
18°	12°	30	From azimuth angle -12° of point 31 to point 60, counterclockwise direction
30°	15°	24	From azimuth angle 0° of point 61 to point 84, clockwise direction
42°	15°	24	From azimuth angle -15° of point 85 to point 108, counterclockwise direction
54°	20°	18	From azimuth angle 0° of point 109 to point 126, clockwise direction
66°	30°	12	From azimuth angle -30° of point 127 to point 138, counterclockwise direction
78°	60°	6	From azimuth angle 0° of point 139 to point 144, clockwise direction
90°	-	1	Point 145 of the zenith
Total		145	

Lo strumento è corredato di un opportuno software capace di fornire colori e testi dei valori di luminanza e radianza (Fig.2.21). I data files della misurazione creati dal software sono memorizzati in CSV (Comma Separated Value) formato dell'ASCII form. Questo formato può facilmente essere caricato da fogli di calcolo come EXCEL di Microsoft.

Dalla measurement window, nel display dei measurement data si può scegliere tra “solo luminanza”, “solo radianza” e “luminanza e radianza”. Inoltre si può scegliere tra “solo distribuzione di calore”, “solo distribuzione di testo” e “distribuzione di calore e testo”.

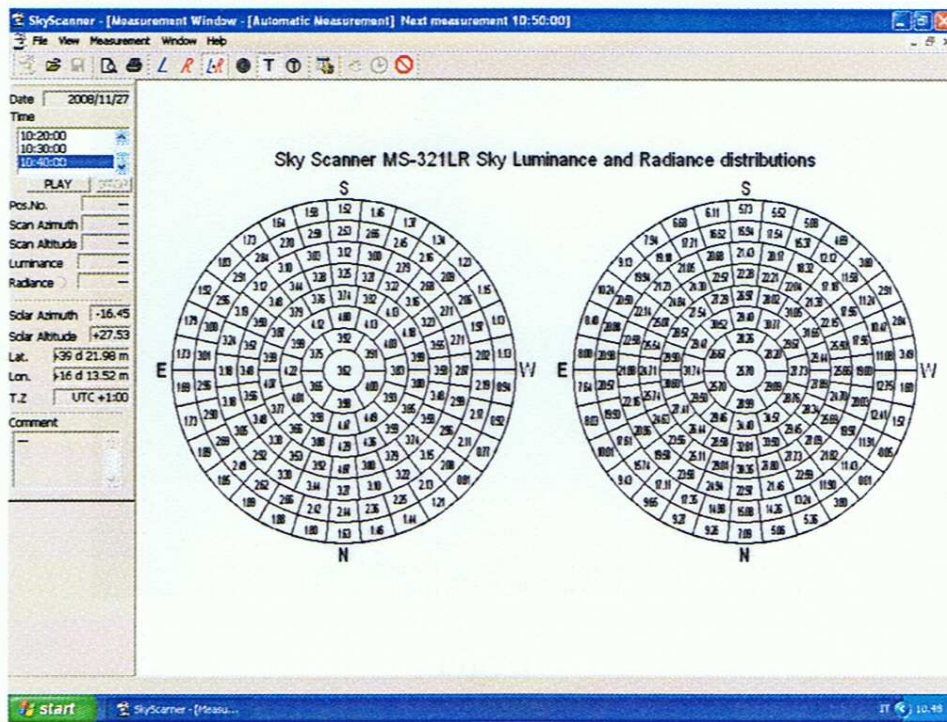


Fig.2.21 – Schermata monitor dati Sky Scanner.

Si può inoltre scegliere tra “Manual measurement” e “Automatic measurement”, (quest’ultimo modo memorizza automaticamente i dati nel nome del data file e performa misure automatiche dal tempo di start al tempo di stop), i valori misurati sono mostrati in tempo reale. I dati memorizzati vengono mostrati in Fig.2.22.

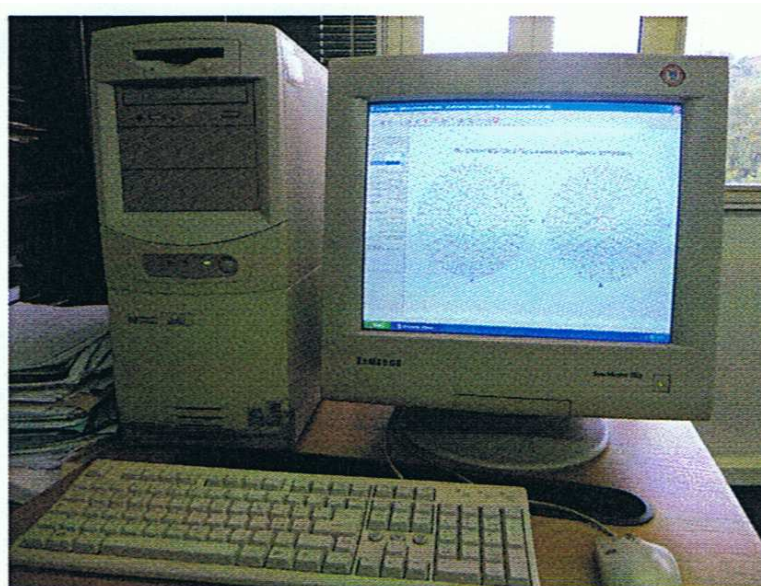


Fig.2.22 – Memorizzazione dati su computer.

Alcune caratteristiche tecniche:

- total weight: 14 kg;
- motor: stepping motor;
- accuracy: $< 0,01^\circ$;
- resolution: $0,009^\circ$;
- torque: 12Nm;
- temperature range: $-40\sim + 50^\circ\text{C}$;
- A/D conversion: 16 bit;
- aperture angle: 11° ;
- linearity f3: 0,3%;
- measurement range: $0\sim 50\text{kcd/m}^2$;

3. DATI MISURATI E LORO CORREZIONE.

La luminanza del cielo è stata misurata in alcune Stazioni di Prova situate in Europa, nel Nord America, nel Giappone e nella Cina. Recenti lavori apparsi in letteratura si riferiscono ad analisi di dati di luminanza misurati ad Hong Kong [24], [25], Singapore [26], Bangkok [27], Inghilterra [28], Francia [29], e Spagna [30], [31]. Attualmente, queste misure sono effettuate in pochissimi posti nel mondo.

I dati di luminanza analizzati in questo lavoro sono stati misurati ad Osaka (Giappone, Lat=34°36' N, Long=135°30' E) nel 2007, ad Arcavacata di Rende (Italia, Lat=39°21' N, Long=16°13' E) nel 2008 e nel 2011, a Lione (Francia, Lat= 45°45' N, Long= 4°51' E) nel 2005, per mezzo dello Sky Scanner EKO, modello MS-321 LR. Il numero dei dati sperimentali di luminanza considerati in questa prima fase di analisi è riportato nelle Tab.3.1, 3.2, 3.3. Si può osservare che le misure ottenute ad Osaka si riferiscono a tutti i mesi dell'anno 2007. Per i dati di Arcavacata, rilevati nel 2008, a causa di alcuni malfunzionamenti della strumentazione, non sono state effettuate misure nei mesi di marzo, aprile ed agosto; sono stati altresì considerati i dati misurati nei mesi di marzo e di aprile 2011.

Tab.3.1- Dati di Osaka 2007(Giappone).

Mese (2007)	N
Gennaio	202311
Febbraio	197696
Marzo	239705
Aprile	254624
Maggio	281001
Giugno	283899
Luglio	287297
Agosto	271663
Settembre	230680
Ottobre	220230
Novembre	192690
Dicembre	192356
Totale	2854152

Tab.3.2 - Dati di Arcavacata (Italia).

Mese (2008)	N
Gennaio	147317
Febbraio	119772
mar-11	190941
apr-11	142388
Maggio	262756
Giugno	146679
Luglio	74631
Agosto	-
Settembre	139472
Ottobre	125155
Novembre	96525
Dicembre	51321
Totale	1496957

Tab.3.3 - Dati di Lione (Francia).

Mese (2005)	N
Settembre	33003
Ottobre	6426
Novembre	5157
Dicembre	13934
Totale	58520

Poiché durante le analisi fatte spesso si riportano esempi relativi a giorni sereni, giorni overcast e giorni intermedi, è necessario descrivere brevemente le caratteristiche di queste tre tipologie di cielo.

- Giorni sereni: lo studio dei giorni sereni è fondamentale al fine di valutare il carico termico massimo da abbattere per il raffreddamento degli edifici. Questi giorni sono caratterizzati da un valore di luminanza massimo in prossimità del sole, mentre all'orizzonte i valori di luminanza sono più bassi; inoltre, a parità di altezza solare, sull'orizzonte, i valori di luminanza sono più alti in direzione sud (Fig.3.1). In Fig.3.2 si riporta un esempio di giorno sereno espresso in funzione dell'irraggiamento diretto normale E_{es} .

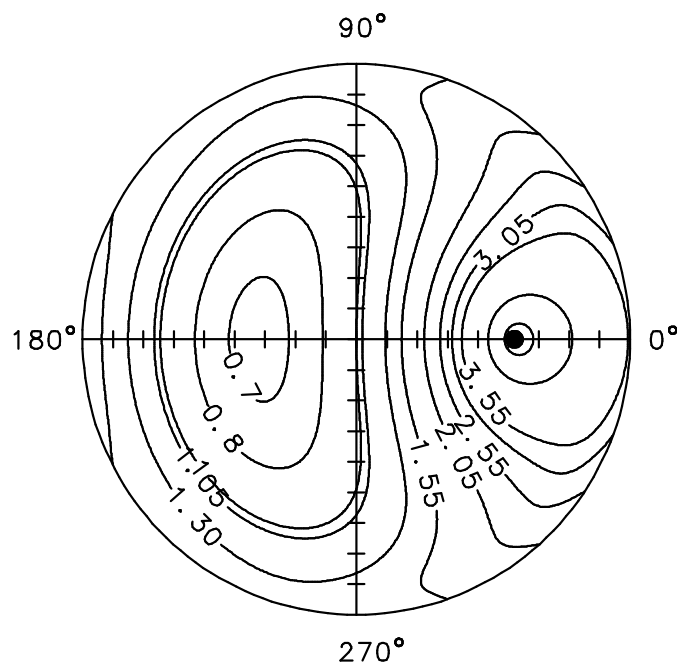
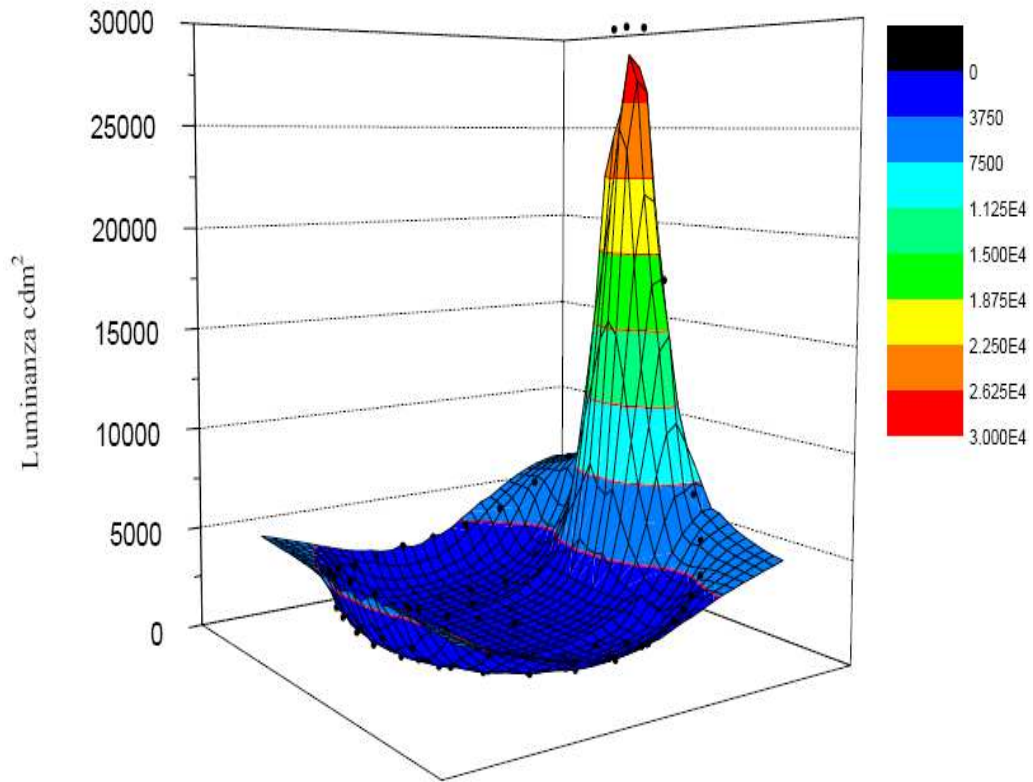


Fig.3.1 - Distribuzione di luminanza per un giorno sereno.

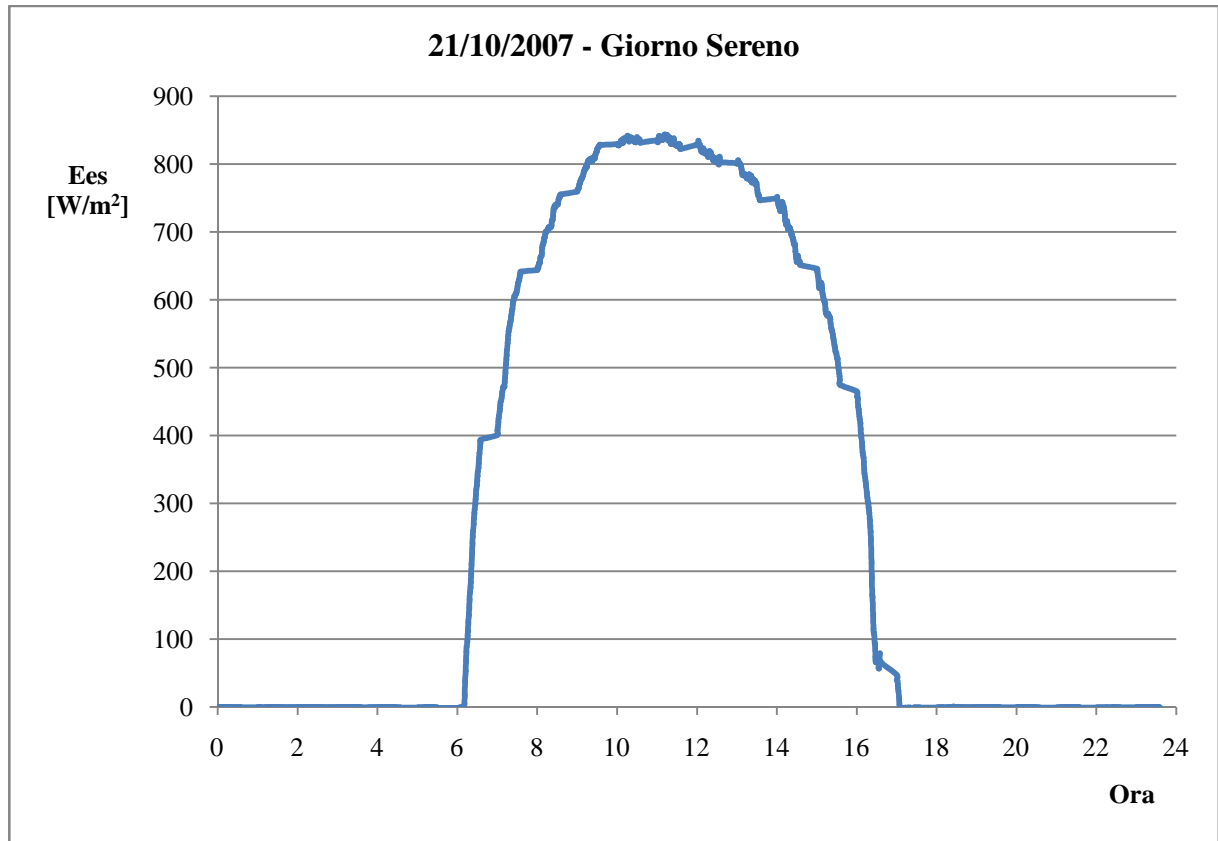


Fig.3.2 – Andamento dell’irraggiamento diretto normale per un giorno sereno.

- Giorni overcast: il cielo overcast è caratterizzato da una copertura nuvolosa che rende impossibile la vista del cielo. La luminanza ha valori elevati allo zenit mentre è più bassa e variabile all’orizzonte; questa variabilità dipende dal fatto che in prossimità dell’orizzonte entrano in gioco le riflessioni del terreno (Fig.3.3). In Fig. 3.4 si riporta un esempio di giorno overcast espresso in funzione dell’irraggiamento diretto normale E_{es} .

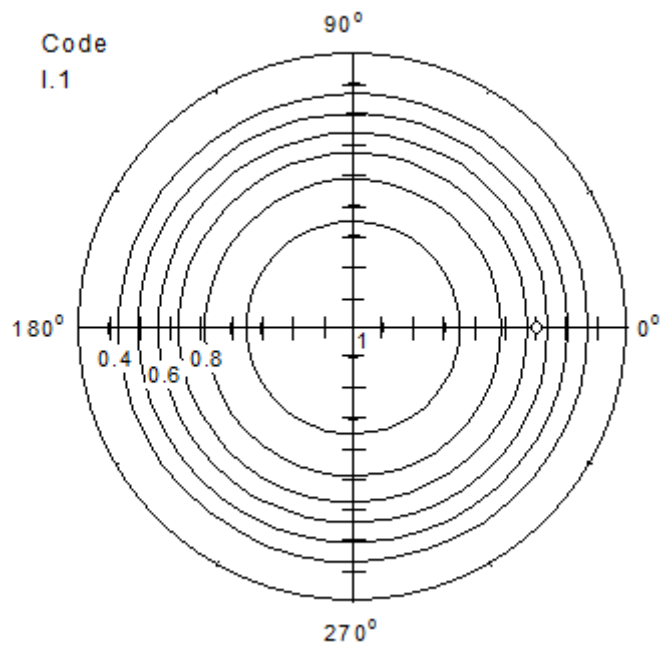
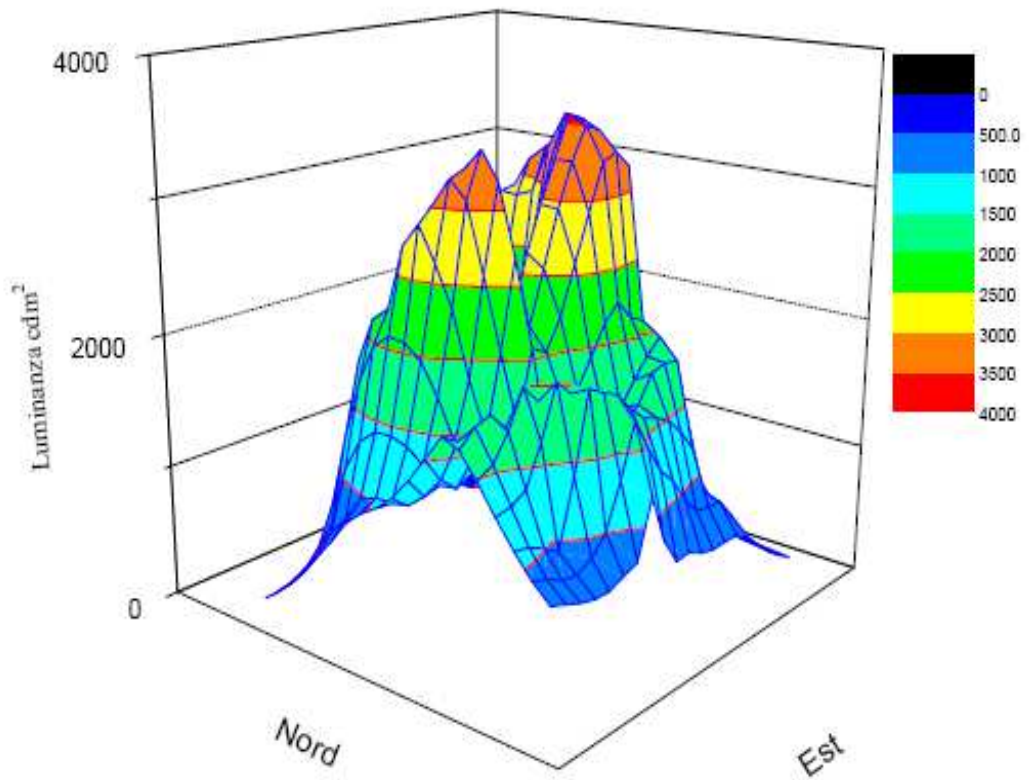


Fig.3.3 - Distribuzione di luminanza per un giorno overcast.

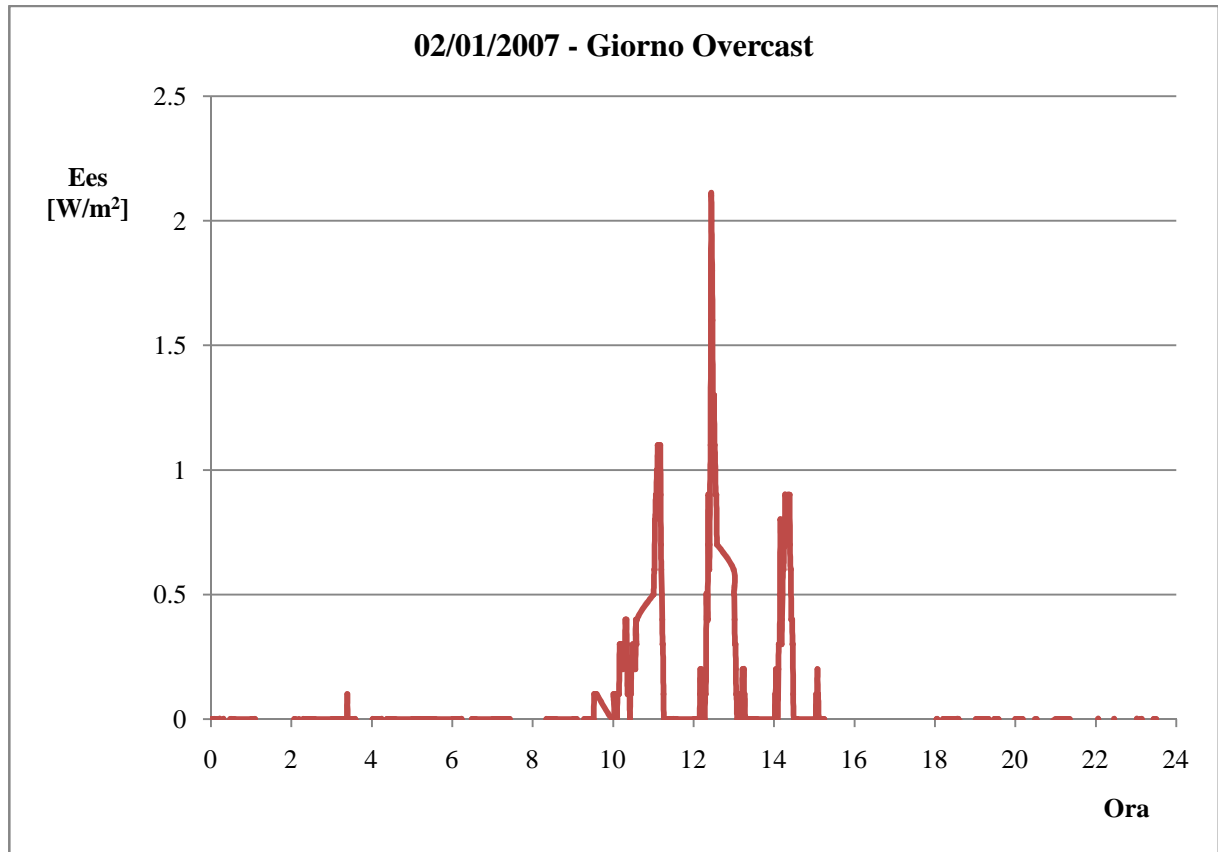


Fig.3.4 – Andamento dell’irraggiamento diretto normale per un giorno overcast.

- Giorni intermedi: il cielo intermedio comprende tutti quei cieli che non sono né overcast né sereni, sono cieli molto frequenti ed il loro studio è molto complesso vista la loro facile variabilità da condizioni di sole ad assenza di sole (Fig.3.5). In Fig. 3.6 si riporta un esempio di giorno intermedio espresso in funzione dell’irraggiamento diretto normale E_{es} .

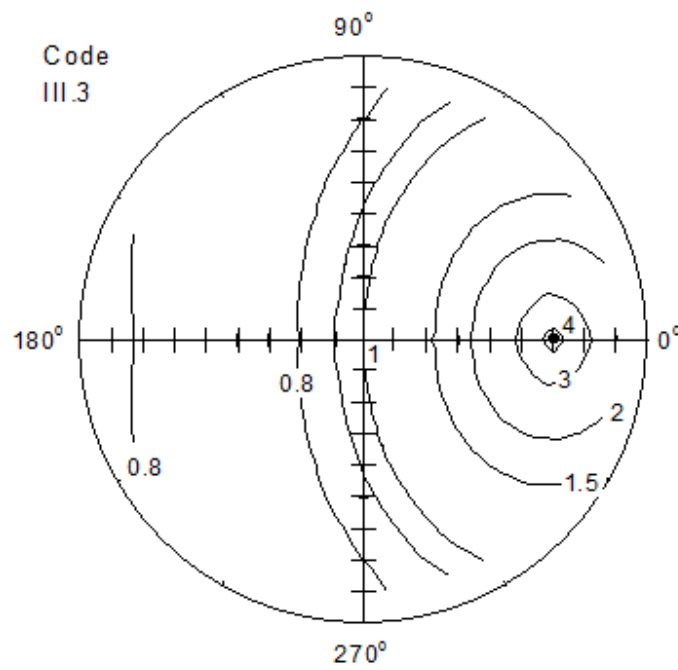
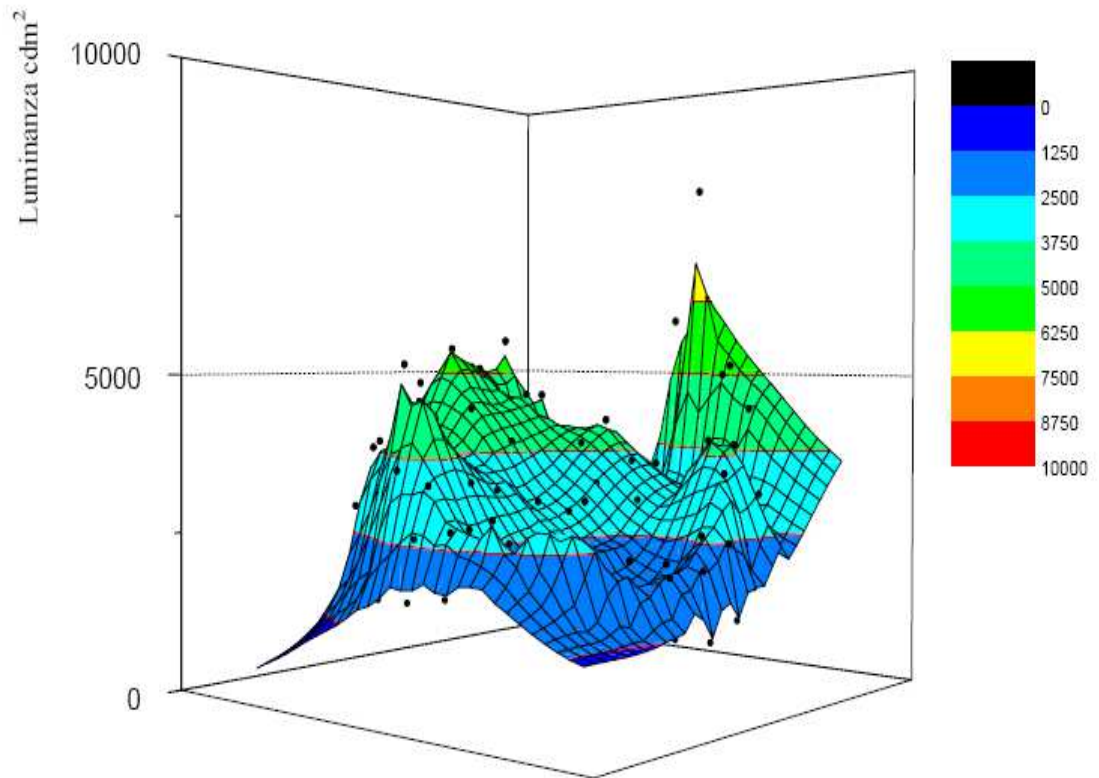


Fig.3.5 - Distribuzione di luminanza per un giorno intermedio.

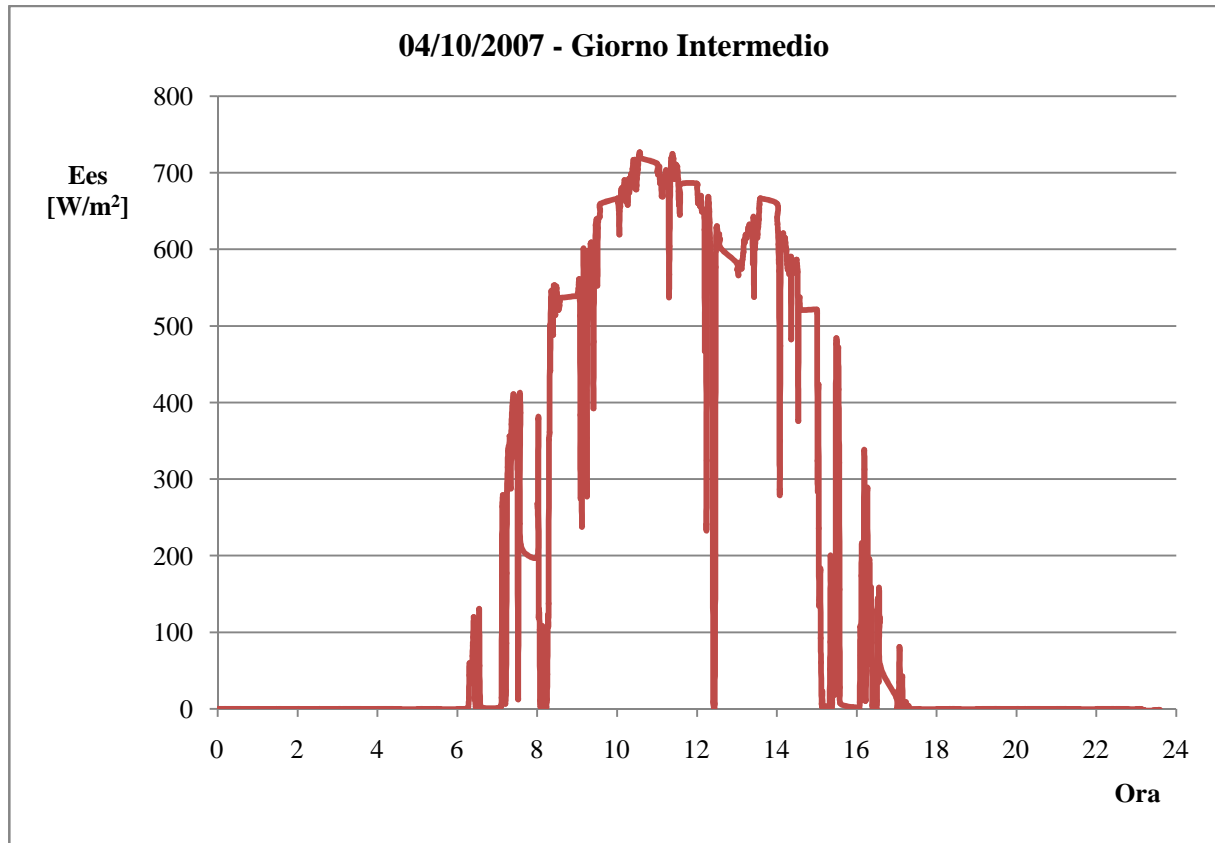


Fig.3.6 – Andamento dell’irraggiamento diretto normale per un giorno intermedio.

Descritte le tre tipologie di cielo è necessario fare un’altra considerazione a riguardo dei dati sperimentali. Poiché i sensori di luminanza e di radianza hanno un’apertura di 11° , quando la distanza angolare tra la posizione del sole ed un punto di misura ha un valore inferiore a 5.5° , i valori di luminanza e di radianza risultano molto alti nelle giornate serene, essendo influenzati dalla radiazione diretta del sole. Per questo motivo, il loro valore viene sostituito dal valore massimo di luminanza e di radianza misurato nella stessa scansione.

Inoltre, i valori di luminanza L_p misurati, prima del loro confronto con i modelli, vanno corretti per rendere il valore dell’illuminamento sul piano orizzontale ottenuto per integrazione della luminanza sulla volta celeste uguale al valore dell’illuminamento diffuso orizzontale E_{vd} misurato per mezzo di fotometri. E_{vd} viene misurato direttamente per mezzo di un fotometro provvisto di anello o di sfera di ombreggiamento (per intercettare la luce diretta del sole) o calcolato per differenza tra i valori misurati dell’illuminamento globale e dell’illuminamento diretto proiettato sul piano orizzontale.

Il fattore di correzione f_c è ottenibile dalla relazione (3.1):

$$E_{vd} = f_c \int_{\alpha=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} L_p \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\varphi \cdot d\alpha \quad (3.1)$$

dove:

- α rappresenta l'altezza del singolo punto di cielo;
- φ rappresenta l'azimut del singolo punto di cielo.

L'equazione (3.1) viene approssimata dalla relazione (3.2):

$$E_{vd} = f_c \sum_i L_p \cdot P_i \quad (3.2)$$

dove:

- $P_i = 0.5 (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1) (\varphi_2 - \varphi_1)$;
- α_1 , α_2 , φ_1 e φ_2 rappresentano le coordinate angolari dei vertici dell'area di cielo attorno al punto di misura [32].

La necessità di calcolare il fattore di correzione f_c relativo ad ognuna distribuzione di luminanza (e di radianza) è dovuta principalmente al fatto che la luminanza è misurata solo su 145 punti della volta celeste e a causa dell'apertura di 11° dei sensori la superficie di cielo sulla quale essa è misurata è solo il 67% dell'intera superficie del cielo; si ipotizza pertanto, in prima approssimazione, che il valore di luminanza misurato in un punto sia pari al valor medio della luminanza sull'area trapezoidale del cielo centrata sul punto di misura.

Inoltre, una completa scansione viene effettuata in un intervallo temporale di oltre quattro minuti, e dunque i valori di luminanza misurati non sono simultanei e le condizioni del cielo possono talvolta cambiare in questo lasso di tempo.

Essendo i valori di illuminamento E_{vd} sul piano orizzontale misurati con la frequenza di un minuto, il valore di E_{vd} da inserire nell'equazione (3.2) è pari al valor medio dei valori di E_{vd} tra l'inizio e la fine della scansione, oppure al valore di E_{vd} misurato al centro dei quattro minuti.

Anche i valori di radianza misurati dallo sky scanner, per le stesse ragioni, vanno corretti utilizzando un'equazione analoga all'equazione (3.2):

$$G_{do} = f_c \sum_i R_p \cdot P_i \quad (3.3)$$

dove

- G_{do} rappresenta l'irradianza diffusa sul piano orizzontale;
- R_p rappresenta la radianza del punto P del cielo;
- f_c rappresenta il fattore correttivo della radianza.

Nella Fig.3.7 sono riportati alcuni valori del fattore f_c delle luminanze e delle radianze, per un giorno sereno, un giorno intermedio, ed un giorno nuvoloso, in funzione dell'ora locale. La figura mostra come il fattore di correzione è variabile al variare delle distribuzioni ed è diverso per la luminanza e la radianza; nei tre giorni considerati, il valore medio giornaliero di f_c è stato pari a 1.08, 1.16, 1.28 per la luminanza e 0.94, 1.0 e 1.03 per la radianza.

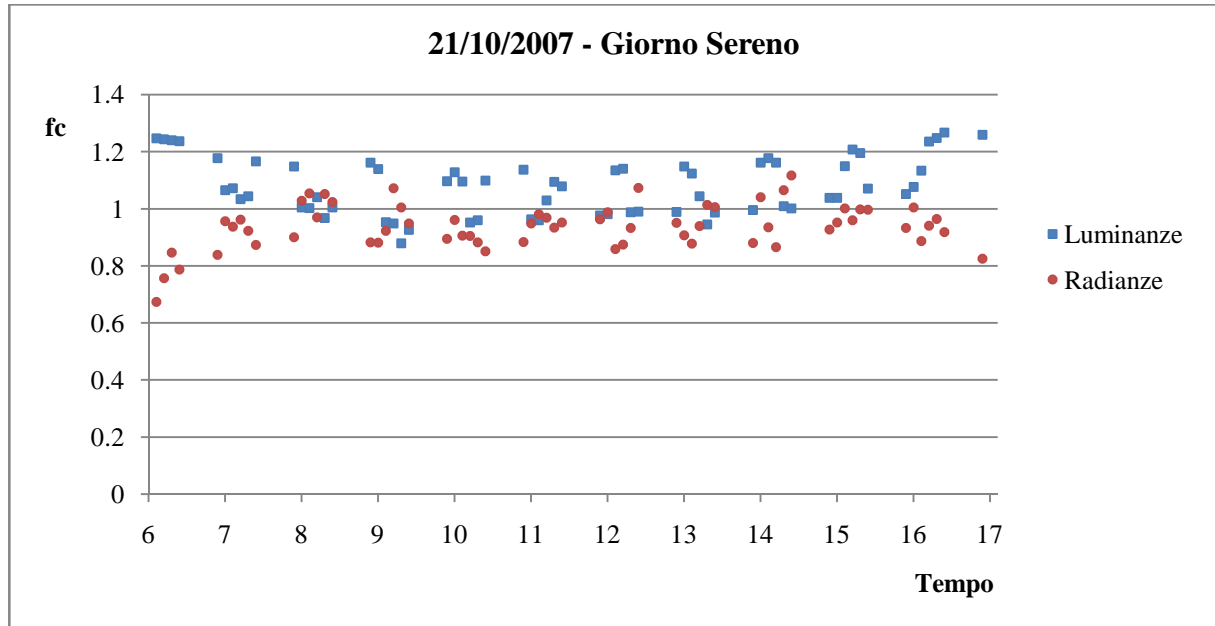


Fig.3.7 (a)

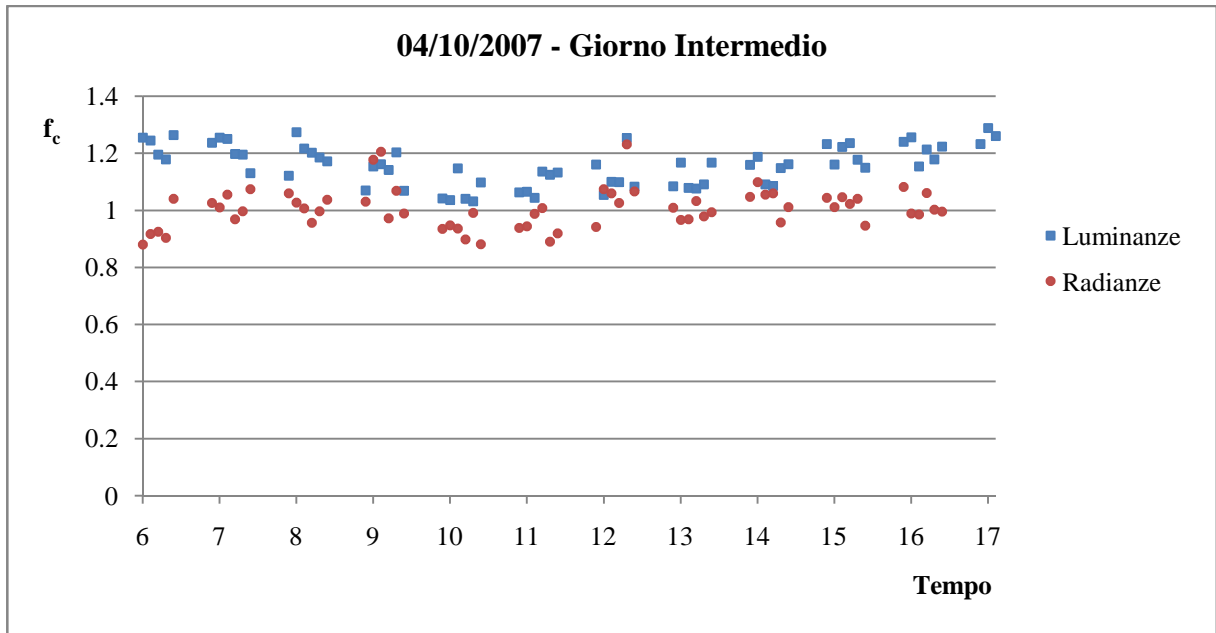


Fig.3.7 (b)

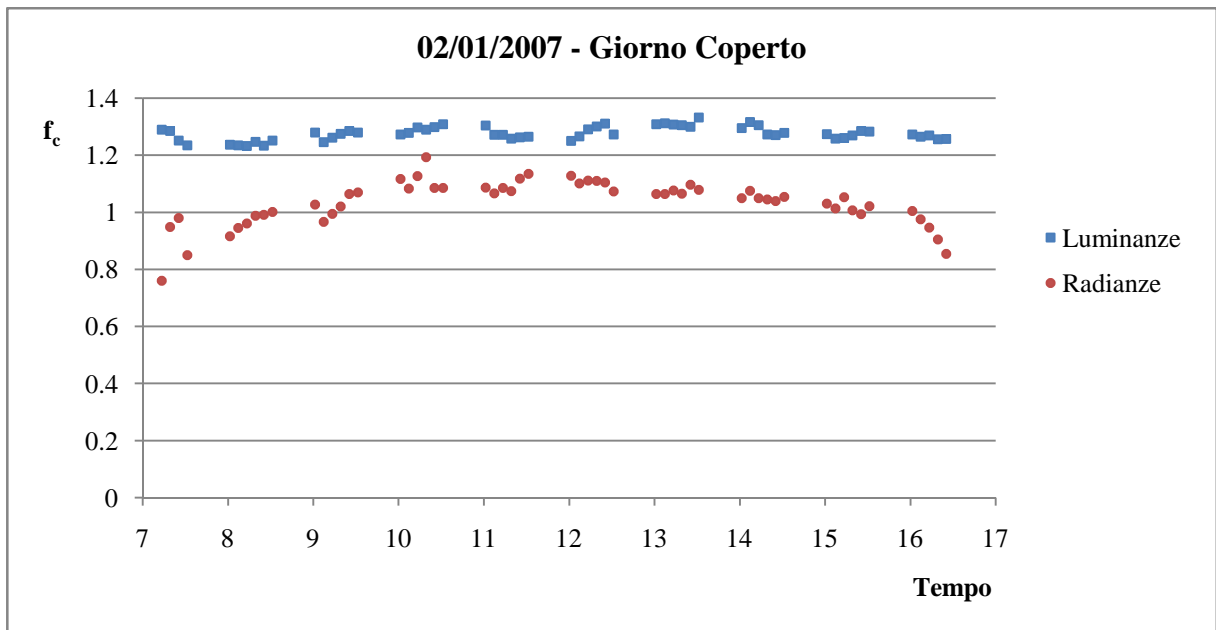


Fig.3.7 (c)

Fig. 3.7 - Fattore correttivo della luminanza e della radianza per un giorno sereno (a), un giorno intermedio (b) ed un giorno overcast (c).

Un altro metodo di analisi, ai fini del confronto con i metodi di calcolo, utilizzabile se non si dispone dei valori misurati di E_{vd} , consiste nell'assumere un fattore correttivo eguale ad 1. In tal caso il valore di E_{vd} da utilizzare nel modello CIE, come sarà chiarito in seguito, è pari al valore ottenuto per integrazione delle luminanze:

$$E_{vd} = \sum_i L_p \cdot P_i \quad (3.4)$$

Per coerenza, anche l'irradianza G_{do} , il cui valore va considerato nei modelli di Igawa e di Perez, viene in questo caso calcolata con la relazione:

$$G_{do} = \sum_i R_p \cdot P_i \quad (3.5)$$

Nella Fig. 3.8 sono riportati i valori medi mensili del fattore di correzione delle luminanze e delle radianze relativi ai dati della città di Osaka 2007: si osserva come, per questi dati, il fattore correttivo della luminanza è prossimo ad 1.2, con un valore medio annuale di 1.185, mentre il fattore correttivo della radianza è prossimo ad 1, con un valore medio annuale di 1.02.

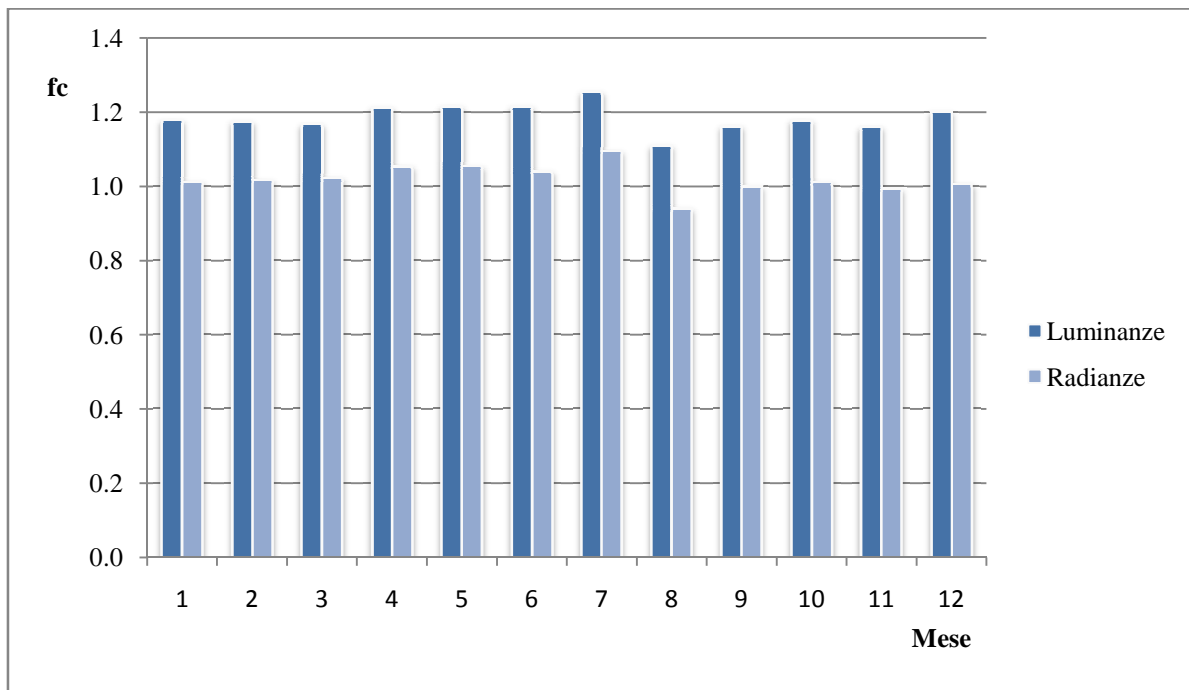


Fig.3.8 - Valori medi mensili del fattore correttivo della luminanza e della radianza misurata ad Osaka.

4. MODELLI DI CALCOLO.

In questo capitolo vengono illustrati i principali metodi di calcolo della luminanza del cielo: il modello di Perez, il modello di Igawa, ed i modelli CIE.

4.1 Modello di Perez.

Perez [8] ha sviluppato un metodo di calcolo della luminanza valido per otto tipi di cielo, classificati in base al valore dell'indice di serenità, definito da Perez. Questo indice varia tra il valore $\varepsilon=1$ (cielo completamente nuvoloso) fino a valori $\varepsilon > 6.2$ (cielo completamente sereno). Esso è definito come (equazione (4.1)):

$$\varepsilon = \frac{\left[\frac{(D_o + I_{bn})}{D_o} + k \cdot Z^3 \right]}{1 + k \cdot Z^3} \quad (4.1)$$

dove:

- D_o rappresenta l'irradianza diffusa sul piano orizzontale (W/m^2);
- I_{bn} rappresenta l'irraggiamento incidente normale diretto;
- k rappresenta una costante pari a 1.041;
- Z rappresenta l'angolo zenitale solare (radianti), angolo complementare all'altezza angolare del sole α_s .

Il modello proposto consiste nel determinare la distribuzione di luminanza assoluta di un punto del cielo L_p come il prodotto della luminanza zenitale L_z e della luminanza relativa l_r :

$$L_p = L_z \cdot l_r \quad (4.2)$$

La luminanza relativa è ricavabile con la relazione (4.3), la cui forma è la stessa di quella originariamente proposta dalla CIE per il cielo sereno:

$$l_r = \frac{\phi(\alpha) \cdot f(\zeta)}{\phi\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot f\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s\right)} \quad (4.3)$$

Nell'equazione (4.3) α rappresenta l'altezza angolare del punto, α_s rappresenta l'altezza solare mentre ζ è la distanza angolare tra il punto e la posizione del sole nel cielo (Fig.4.1).

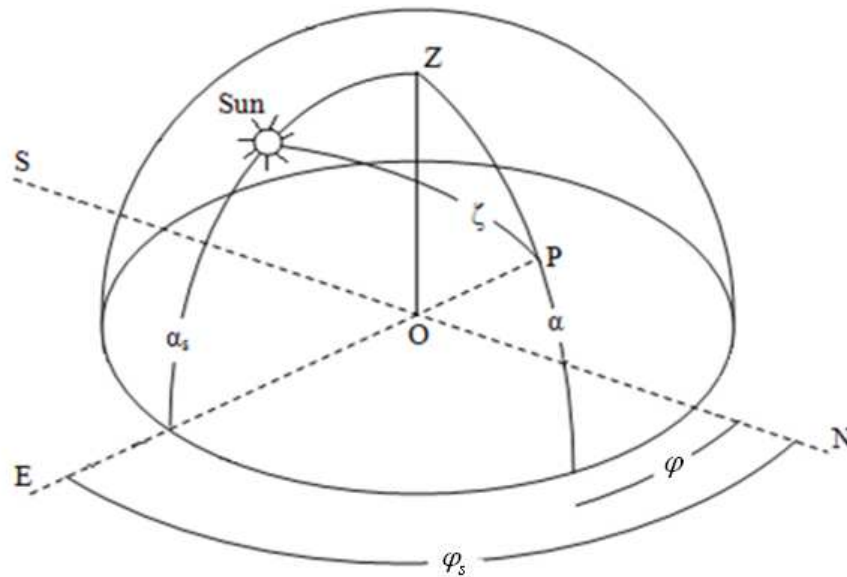


Fig.4.1- Angoli per la posizione del sole e di un generico punto P del cielo.

Inoltre la funzione ϕ è chiamata funzione gradiente e considera la dipendenza della luminanza dall'altezza solare, mentre la funzione f è chiamata funzione indicatrice dello scattering e considera la dipendenza della luminanza dalla distanza angolare tra il punto considerato del cielo e la posizione istantanea del sole. Le due funzioni sono calcolabili applicando l'equazioni (4.4) e (4.5).

$$\phi(\alpha) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\sin \alpha}\right) \quad (4.4)$$

$$f(\zeta) = 1 + c \cdot \exp(d\zeta) + e \cdot \cos^2(\zeta) \quad (4.5)$$

La distanza angolare tra il punto e la posizione del sole nel cielo ζ è calcolabile con la relazione (4.6):

$$\zeta = \arccos(\sin \alpha_s \cdot \sin \alpha + \cos \alpha_s \cdot \cos \alpha \cdot \cos|\varphi_s - \phi|) \quad (4.6)$$

Nell'equazione (4.6) ϕ rappresenta l'angolo azimutale, in radianti, del generico punto P mentre φ_s rappresenta l'azimut solare, sempre in radianti.

Le quantità a , b , c , d , e non sono delle costanti, ma sono delle funzioni dell'altezza solare, della brillantezza del cielo Δ , e dell'indice di serenità del cielo ε :

$$a = a_1(\varepsilon) + a_2(\varepsilon) \cdot Z + \Delta \cdot [a_3(\varepsilon) + a_4(\varepsilon) \cdot Z] \quad (4.7)$$

$$b = b_1(\varepsilon) + b_2(\varepsilon) \cdot Z + \Delta \cdot [b_3(\varepsilon) + b_4(\varepsilon) \cdot Z] \quad (4.8)$$

$$c = c_1(\varepsilon) + c_2(\varepsilon) \cdot Z + \Delta \cdot [c_3(\varepsilon) + c_4(\varepsilon) \cdot Z] \quad (4.9)$$

$$d = d_1(\varepsilon) + d_2(\varepsilon) \cdot Z + \Delta \cdot [d_3(\varepsilon) + d_4(\varepsilon) \cdot Z] \quad (4.10)$$

$$e = e_1(\varepsilon) + e_2(\varepsilon) \cdot Z + \Delta \cdot [e_3(\varepsilon) + e_4(\varepsilon) \cdot Z] \quad (4.11)$$

I valori delle costanti espresse nelle relazioni (4.7), (4.8), (4.9), (4.10) e (4.11) sono riportate in Tab.4.1.

Tab.4.1 - Tabella delle costanti per il calcolo delle funzioni a , b , c , d , e .

		Sky clearness interval							
ε	from	1.000	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500	6.200
	to	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500	6.200	-----
Coefficients									
a_1		1.3525	-1.2219	-1.1000	-0.5484	-0.6000	-1.0156	-1.0000	-1.0500
a_2		-0.2576	-0.7730	-0.2515	-0.6654	-0.3566	-0.3670	0.0211	0.0289
a_3		-0.2690	1.4148	0.8952	-0.2672	-2.5000	1.0078	0.5025	0.4260
a_4		-1.4366	1.1016	0.0156	0.7117	2.3250	1.4051	-0.5119	0.3590
b_1		-0.7670	-0.2054	0.2782	0.7234	0.2937	0.2875	-0.3000	-0.3250
b_2		0.0007	0.0367	-0.1812	-0.6219	0.0496	-0.5328	0.1922	0.1156
b_3		1.2734	-3.9128	-4.5000	-5.6812	-5.6812	-3.8500	0.7023	0.7781
b_4		-0.1233	0.9156	1.1766	2.6297	1.8415	3.3750	-1.6317	0.0025
c_1		2.8000	6.9750	24.7219	33.3389	21.0000	14.0000	19.0000	31.0625
c_2		0.6004	0.1774	-13.0812	-18.3000	-4.7656	-0.9999	-5.0000	-14.5000
c_3		1.2375	6.4477	-37.7000	-62.2500	-21.5906	-7.1406	1.2438	-46.1148
c_4		1.0000	-0.1239	34.8438	52.0781	7.2492	7.5469	-1.9094	55.3750
d_1		1.8734	-1.5798	-5.0000	-3.5000	-3.5000	-3.4000	-4.0000	-7.2312
d_2		0.6297	-0.5081	1.5218	0.0016	-0.1554	-0.1078	0.0250	0.4050
d_3		0.9738	-1.7812	3.9229	1.1477	1.4062	-1.0750	0.3844	13.3500
d_4		0.2809	0.1080	-2.6204	0.1062	0.3988	1.5702	0.2656	0.6234
e_1		0.0356	0.2624	-0.0156	0.4659	0.0032	-0.0672	1.0468	1.5000
e_2		-0.1246	0.0672	0.1597	-0.3296	0.0766	0.4016	-0.3788	-0.6426
e_3		-0.5718	-0.2190	0.4199	-0.0876	-0.0656	0.3017	-2.4517	1.8564
e_4		0.9938	-0.4285	-0.5562	-0.0329	-0.1294	-0.4844	1.4656	0.5636

Nel primo intervallo di ε in Tab.4.1, le funzioni c e d hanno un'espressione differente rispetto a quella espressa nelle equazioni (4.10) e (4.11):

$$c = \exp\left[\left(\Delta(c_1 + c_2 Z)\right)^{c_3}\right] - c_4 \quad (4.12)$$

$$d = -\exp\left[\Delta(c_1 + c_2 Z)\right] + d_3 + \Delta \cdot d_4 \quad (4.13)$$

La brillantezza del cielo Δ [33] è definita come:

$$\Delta = D_o \cdot \frac{m}{I_o} \quad (4.14)$$

Se $\varepsilon > 1.065$ e $\varepsilon < 2.8$, il valore della brillantezza del cielo è pari a [34]:

$$\Delta = \max(0.2, \Delta) \quad (4.15)$$

Nell'equazione (4.14) m rappresenta la massa d'aria ottica relativa mentre I_o rappresenta l'irraggiamento extraterrestre [20]:

$$I_o = I_{cs} \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{365}\right) \right] \quad (4.16)$$

Nell'equazione (4.16) I_{cs} rappresenta la costante solare, definita come la potenza incidente sull'unità di superficie disposta al di fuori dell'atmosfera terrestre ed ortogonale alla direzione incidente, pari a $1397 \frac{W}{m^2}$; n indica l'ennesimo giorno dell'anno.

La massa d'aria ottica relativa m è calcolabile con l'equazione di Kasten:

$$m = \frac{1}{\sin \alpha_s + 0.15 \cdot (\alpha_s + 3.885)^{-1.253}} \quad (4.17)$$

Nell'espressione (4.17) α_s è espresso in gradi.

La luminanza zenitale L_z , secondo Perez [33], è calcolabile con la relazione, sviluppata per gli otto tipi di cielo:

$$L_z = D_o \left[a_i + c_i \cdot \sin \alpha_s + c_i' \cdot \exp\left(-3\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s\right)\right) + d_i \cdot \Delta \right] \quad (4.18)$$

Le costanti a_i, c_i, c'_i, d_i variano con l'indice di serenità ε ed i loro valori sono riportati nella Tab.4.2.

Tab.4.2 - Coefficienti per il calcolo della luminanza zenitale L_z .

ε	a_i	c_i	c'_i	d_i
1 - 1.065	40.86	26.77	-29.59	-45.75
1.065 - 1.230	26.58	14.73	58.46	-21.25
1.230 - 1.500	19.34	2.28	100	0.25
1.500 - 1.950	13.25	-1.39	124.79	15.66
1.950 - 2.800	14.47	-5.09	160.09	9.13
2.800 - 4.500	19.76	-3.88	154.61	-19.21
4.500 - 6.200	28.39	-9.67	151.58	-69.39
6.200 -	42.91	-19.62	130.8	-164.08

4.2 Modello di Igawa.

Secondo Igawa [9], la luminanza assoluta di un punto è esprimibile come prodotto della luminanza relativa e della luminanza zenitale:

$$L_p = L_z \cdot l_r \quad (4.19)$$

$$l_r = \frac{\phi(\alpha) \cdot f(\zeta)}{\phi\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot f\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s\right)} \quad (4.20)$$

La funzione $f(\zeta)$ ha un'espressione diversa da quella di Perez; il calcolo della funzione $\Phi(\alpha)$ e della funzione $f(\zeta)$ è dato dalle equazioni (4.21) e (4.22) :

$$\phi(\alpha) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\sin \alpha}\right) \quad (4.21)$$

$$f(\zeta) = 1 + c \left[\exp(d \cdot \zeta) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2(\zeta) \quad (4.22)$$

Le grandezze a , b , c , d , e sono delle funzioni dell'indice di cielo S_i e sono calcolabili con le relazioni:

$$a = \frac{4.5}{[1 + 0.15 \cdot \exp(3.4 \cdot S_i)]}^{-1.04} \quad (4.23)$$

$$b = \frac{-1}{[1 + 0.17 \cdot \exp(1.3 \cdot S_i)]}^{-0.05} \quad (4.24)$$

$$c = 1.77 \cdot (1.22 \cdot S_i)^{3.56} \cdot \exp(0.2 \cdot S_i) \cdot (2.1 - S_i)^{0.8} \quad (4.25)$$

$$d = \frac{-3.05}{[1 + 10.6 \cdot \exp(-3.4 \cdot S_i)]} \quad (4.26)$$

$$e = \frac{0.48}{[1 + 245 \cdot \exp(-4.13 \cdot S_i)]} \quad (4.27)$$

Dall'equazione (4.25) si evince che se il parametro S_i è maggiore di 2.1, la costante c non può essere calcolata, per tale motivo, nell'applicazione del modello se S_i è maggiore di 2.02 si pone $S_i = 2.02$.

L'indice di cielo S_i è definito come:

$$S_i = K_c + C_{le}^{0.5} \quad (4.28)$$

Nell'equazione (4.28) K_c rappresenta l'indice di cielo sereno (clear sky index), definito come rapporto tra l'irradianza globale sul piano orizzontale e l'irradianza globale standard G_{os} sullo stesso piano in un giorno sereno con un fattore di torbidità di Linke T_L pari a 2.5.

G_{os} è calcolabile con la relazione (4.29):

$$G_{os} = 0.84 \frac{I_o}{m} \exp(-0.0675 m) \quad (4.29)$$

Secondo Igawa, la luminanza zenitale L_z è calcolabile tramite con la correlazione (4.30) [35]:

$$L_z = D_o \cdot K_d \cdot R_z \quad (4.30)$$

dove:

- il prodotto $(D_o \cdot R_z)$ rappresenta la radianza zenitale del cielo;
- K_d rappresenta l'efficacia luminosa della radiazione diffusa.

La correlazione proposta da Igawa per il calcolo dell'efficacia diffusa è la seguente:

$$K_d = D_a + D_b \cdot K_c + D_c \cdot C_{le} + D_d \cdot \ln(K_c + 0.1) + D_e \cdot \ln(C_{le} + 0.1) + D_f \cdot \exp(K_c) + D_g \cdot \exp(C_{le}) \quad (4.31)$$

Nell'equazione (4.31) C_{le} rappresenta l'indice di non nuvolosità (cloudless index), definito come:

$$C_{le} = \frac{1 - C_e}{1 - C_{es}} \quad (4.32)$$

dove C_e rappresenta il rapporto di nuvolosità (cloud ratio), definito come rapporto tra l'irradianza diffusa e l'irradianza globale sul piano orizzontale, mentre C_{es} rappresenta il rapporto di nuvolosità nel cielo sereno standard, calcolabile con l'equazione (4.33):

$$C_{es} = 0.01299 + 0.07698m - 0.003857m^2 + 0.0001054m^3 - 0.00000103m^4 \quad (4.33)$$

Nei giorni nuvolosi si ha $C_e=1$ e $C_{le}=0$.

Nella relazione (4.31) i fattori D_i (con $i = a, b, c, d, e, f, g$) sono calcolabili come:

$$D_a = 5.892 \alpha_s + 124.717 \quad (4.34)$$

$$D_b = 173.663 \alpha_s + 131.757 \quad (4.35)$$

$$D_c = 98.534 \alpha_s + 45.348 \quad (4.36)$$

$$D_d = -38.605 \alpha_s - 31.502 \quad (4.37)$$

$$D_e = -14.377 \alpha_s - 4.599 \quad (4.38)$$

$$D_f = -54.061 \alpha_s - 63.802 \quad (4.39)$$

$$D_g = -46.963 \alpha_s - 1.281 \quad (4.40)$$

L'altezza solare α_s è espressa in radianti.

La quantità R_z nell'equazione (4.30) è funzione dell'altezza solare α_s , dell'indice di cielo sereno K_c e dell'indice di non nuvolosità C_{le} .

$$R_z = \sum_{k=0}^4 A(k) \cdot K_c^k = A(0) + A(1) \cdot K_c + A(2) \cdot K_c^2 + A(3) \cdot K_c^3 + A(4) \cdot K_c^4 \quad (4.41)$$

dove:

$$\bullet \quad A(k) = \sum_{j=0}^6 B(j, k) \cdot C_{le}^{0,5j} \quad (4.42)$$

$$A(0) = B(0,0) + B(1,0) \cdot C_{le}^{0,5} + B(2,0) \cdot C_{le} + B(3,0) \cdot C_{le}^{1,5} + \\ + B(4,0) \cdot C_{le}^2 + B(5,0) \cdot C_{le}^{2,5} + B(6,0) \cdot C_{le}^3$$

$$A(1) = B(0,1) + B(1,1) \cdot C_{le}^{0,5} + B(2,1) \cdot C_{le} + B(3,1) \cdot C_{le}^{1,5} + \\ + B(4,1) \cdot C_{le}^2 + B(5,1) \cdot C_{le}^{2,5} + B(6,1) \cdot C_{le}^3$$

$$A(2) = B(0,2) + B(1,2) \cdot C_{le}^{0,5} + B(2,2) \cdot C_{le} + B(3,2) \cdot C_{le}^{1,5} + \\ + B(4,2) \cdot C_{le}^2 + B(5,2) \cdot C_{le}^{2,5} + B(6,2) \cdot C_{le}^3$$

$$A(3) = B(0,3) + B(1,3) \cdot C_{le}^{0,5} + B(2,3) \cdot C_{le} + B(3,3) \cdot C_{le}^{1,5} + \\ + B(4,3) \cdot C_{le}^2 + B(5,3) \cdot C_{le}^{2,5} + B(6,3) \cdot C_{le}^3$$

$$A(4) = B(0,4) + B(1,4) \cdot C_{le}^{0,5} + B(2,4) \cdot C_{le} + B(3,4) \cdot C_{le}^{1,5} + \\ + B(4,4) \cdot C_{le}^2 + B(5,4) \cdot C_{le}^{2,5} + B(6,4) \cdot C_{le}^3$$

$$\bullet \quad B(j, k) = \sum_{i=0}^5 C(i, j, k) \cdot \alpha_s^i \quad (4.43)$$

Di seguito è riportata la metodologia di calcolo delle costanti $B(j, k)$:

$$B(0,0) = C(0,0,0) + C(1,0,0) \cdot \alpha_s + C(2,0,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,0,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,0,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,0,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(1,0) = C(0,1,0) + C(1,1,0) \cdot \alpha_s + C(2,1,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,1,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,1,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,1,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(2,0) = C(0,2,0) + C(1,2,0) \cdot \alpha_s + C(2,2,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,2,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,2,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,2,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(3,0) = C(0,3,0) + C(1,3,0) \cdot \alpha_s + C(2,3,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,3,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,3,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,3,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(4,0) = C(0,4,0) + C(1,4,0) \cdot \alpha_s + C(2,4,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,4,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,4,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,4,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(5,0) = C(0,5,0) + C(1,5,0) \cdot \alpha_s + C(2,5,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,5,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,5,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,5,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(6,0) = C(0,6,0) + C(1,6,0) \cdot \alpha_s + C(2,6,0) \cdot \alpha_s^2 + C(3,6,0) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,6,0) \cdot \alpha_s^4 + C(5,6,0) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(0,1) = C(0,0,1) + C(1,0,1) \cdot \alpha_s + C(2,0,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,0,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,0,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,0,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(1,1) = C(0,1,1) + C(1,1,1) \cdot \alpha_s + C(2,1,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,1,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,1,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,1,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(2,1) = C(0,2,1) + C(1,2,1) \cdot \alpha_s + C(2,2,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,2,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,2,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,2,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(3,1) = C(0,3,1) + C(1,3,1) \cdot \alpha_s + C(2,3,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,3,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,3,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,3,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(4,1) = C(0,4,1) + C(1,4,1) \cdot \alpha_s + C(2,4,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,4,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,4,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,4,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(5,1) = C(0,5,1) + C(1,5,1) \cdot \alpha_s + C(2,5,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,5,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,5,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,5,1) \cdot \alpha_s^5$$

$$B(6,1) = C(0,6,1) + C(1,6,1) \cdot \alpha_s + C(2,6,1) \cdot \alpha_s^2 + C(3,6,1) \cdot \alpha_s^3 + \\ + C(4,6,1) \cdot \alpha_s^4 + C(5,6,1) \cdot \alpha_s^5$$

I coefficienti $C(i,j,k)$ sono riportati in Tab.4.3:

Tab.4.3 – Coefficienti $C(i,j,k)$.

k	j	i					
		5	4	3	2	1	0
4	6	-79.2551	181.5249	-178.8391	86.4222	13.7469	-9.3016
	5	259.0233	-599.2154	558.7982	-273.5933	-28.3222	36.8154
	4	-323.9300	758.4764	-665.1001	327.9505	2.5328	-52.2028
	3	178.5947	-422.7656	343.9805	-171.1919	27.4527	32.8606
	2	-34.0204	80.2519	-57.2731	28.9888	-17.6413	-8.0731
	1	-0.9299	2.9337	-2.7390	2.0469	1.9924	-0.1519
	0	-0.0673	0.1200	-0.5003	-0.0077	0.2274	0.1944
3	6	178.9761	-414.3978	382.3517	-189.0674	-19.1604	26.7019
	5	-585.7678	1369.3651	-1197.9089	597.8211	18.6492	-98.6168
	4	719.1565	-1698.4940	1398.0054	-701.8434	57.7891	133.1647
	3	-377.9488	899.2027	-681.3328	345.6662	-99.9641	-79.6806
	2	63.7066	-149.2886	93.5278	-47.5262	47.1414	17.6094
	1	2.2956	-7.2571	6.1345	-5.5006	-4.1306	1.0003
	0	0.4479	-1.0320	1.7185	-0.3234	-0.5077	-0.3754
2	6	-140.1650	329.5323	-283.3008	142.5802	0.0588	-24.2309
	5	450.5763	-1067.6426	872.1058	-442.3932	38.0638	85.2745
	4	-530.7575	1266.6167	-971.1740	496.1507	-112.2037	-109.9849
	3	258.3140	-617.6864	428.3022	-220.7694	112.7302	61.4569
	2	-37.2452	86.0313	-44.2429	20.6861	-41.5866	-11.1184
	1	-1.1026	3.9671	-2.6865	3.9616	2.8287	-1.2699
	0	-0.3572	0.8603	-1.0970	0.3359	0.3435	0.0863
1	6	41.7667	-101.3222	83.3628	-44.0612	8.0616	7.8350
	5	-128.3895	313.3116	-245.8816	131.5008	-38.0729	-26.2167
	4	140.6794	-344.9908	254.2300	-137.6762	64.8618	31.5218
	3	-61.5252	150.9138	-100.4209	54.5553	-48.3263	-15.2722
	2	7.8043	-18.4959	9.7897	-3.9888	14.3852	1.6549
	1	0.1990	-0.7237	0.3678	-0.8060	-0.8417	0.2509
	0	0.0888	-0.2173	0.2446	-0.0842	-0.0767	-0.0509
0	6	-2.3236	3.8397	1.3678	-2.8773	0.5302	-0.9167
	5	5.9466	-8.4370	-8.4637	11.3017	-0.8960	2.7842
	4	-4.8599	4.1516	15.9497	-16.8828	0.0930	-2.8711
	3	1.1362	1.8522	-12.3903	11.6859	0.3772	1.0626
	2	0.2833	-1.9825	4.3546	-3.7111	-0.0829	-0.1460
	1	-0.0817	0.3300	-0.4699	0.4062	-0.0316	-0.0564
	0	-0.0068	0.0177	-0.0200	0.0090	0.0044	0.4015

4.3 Modello CIE.

La CIE, Commissione Internazionale per l'Illuminamento, ha pubblicato nel 1994 un rapporto tecnico [36] nel quale sono state raccomandate due distribuzioni di luminanza relativa del cielo: il cielo sereno standard (Standard Clear Sky) ed il cielo standard completamente nuvoloso (Standard Overcast Sky). Quest'ultima distribuzione era stata proposta da Moon e Spencer nel 1942 [37], i quali hanno fornito, sotto condizione di cielo overcast, l'equazione (4.44) per il calcolo della luminanza:

$$L_p(\alpha) = \frac{L_z}{3}(1 + 2 \sin \alpha) \quad (4.44)$$

E' facile dimostrare che l'illuminamento sul piano orizzontale, in caso di validità dell'equazione (4.44) è collegato alla luminanza zenitale dalla relazione (4.45):

$$E_0 = \frac{7}{9} \pi L_z \quad (4.45)$$

dalla quale segue:

$$L_z = 0.4092 E_0 \quad (4.46)$$

Dal valore misurato dell'illuminamento orizzontale, mediante le relazioni (4.46) e (4.44), si può calcolare la distribuzione di luminanza.

In alternativa, nel caso in cui non si disponga della misura di E_0 , si può calcolare la luminanza zenitale per mezzo di una correlazione. Per il cielo nuvoloso, vi sono, tra molte altre, le seguenti correlazioni (L_z è in kcd/m²):

- la correlazione di Krochmann [38]:

$$L_z = 0.123 + 8.6 \sin \alpha_s \quad (4.47)$$

- la correlazione di Nakamura, sviluppata per il Giappone [39]:

$$L_z = 0.07 + 15 \cdot (\sin \alpha_s)^{1.68} \quad (4.48)$$

- la correlazione di Soler, sviluppata per Madrid (Spagna) [40]:

$$L_z = -0.1699 + 9.2425 \cdot \tan \alpha_s + 0.1250 \cdot \tan(\alpha_s)^2 \quad (4.49)$$

Per cielo sereno, la CIE ha suggerito l'utilizzo dell'equazione (4.50):

$$l_r = \frac{\phi(\alpha) \cdot f(\zeta)}{\phi\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot f\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s\right)} \quad (4.50)$$

dove:

$$\phi(\alpha) = 1 - \exp\left(\frac{-0.32}{\sin \alpha}\right) \quad (4.51)$$

$$f(\zeta) = 0.91 + 10 \exp(-3\zeta) + 0.45 \cos^2(\zeta) \quad (4.52)$$

Nel 2003, la CIE ha pubblicato un nuovo rapporto, nel quale sono state presentate delle nuove distribuzioni di cielo, chiamate "CIE Standard General Sky distributions" [10]. La CIE [10], e successivamente l'ISO [11] hanno adottato una classificazione di 15 tipi di cielo, proposta precedentemente da Darula e Kittler [41].

La forma delle nuove distribuzioni CIE di luminanza del cielo sono le stesse usate da Igawa, descritte dalle equazioni (4.19), (4.20), (4.21) e (4.22).

Darula e Kittler hanno identificato diversi tipi di cielo numerati da 1 a 15.

I primi 5 tipi di cielo riguardano le condizioni di cielo overcast, i successivi 5 tipi di cielo si riferiscono a cieli parzialmente nuvolosi e gli ultimi 5 tipi si riferiscono a cieli sereni (il cielo n.13 con atmosfera molto torbida). Purtroppo non viene dato un criterio univoco capace di stabilire in quale tipo di cielo ci si trovi. Il nuovo cielo sereno standard CIE corrisponde al cielo n. 12, mentre il cielo overcast di Moon e Spencer è denominato cielo n. 16.

Per i 15 tipi di cielo in Tab.4.4, vengono forniti i valori delle costanti a, b, c, d, e [10], [11].

Tab.4.4 – Valori delle costanti a, b, c, d, e per i 15 diversi tipi di cielo.

CIE sky type	Gradation	Indicatrix	a	b	c	d	e	Description of luminance distribution
1	I	1	4	-0,7	0	-1	0	CIE Standard Overcast Sky, alternative form Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity
2	I	2	4	-0,7	2	-1,5	0,15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1	0	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the sun
5	III	1	0	-1	0	-1	0	Sky of uniform luminance
6	III	2	0	-1	2	-1,5	0,15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7	III	3	0	-1	5	-2,5	0,3	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circum solar region
8	III	4	0	-1	10	-3	0,45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1	-0,55	2	-1,5	0,15	Partly cloudy, with the obscured sun
10	IV	3	-1	-0,55	5	-2,5	0,3	Partly cloudy, with brighter circumsolar region
11	IV	4	-1	-0,55	10	-3	0,45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1	-0,32	10	-3	0,45	CIE Standard Clear Sky, low illuminance turbidity
13	V	5	-1	-0,32	16	-3	0,3	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1	-0,15	16	-3	0,3	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1	-0,15	24	-2,8	0,15	White-blue turbid sky with broad solar corona

La luminanza zenitale (kcd/m^2) da usare nei diversi 15 tipi di cielo è calcolabile con la correlazione (4.53):

$$L_z = \frac{E_0}{(133,8 \cdot \sin \alpha_s)} \left[\frac{B(\sin \alpha_s)^C}{(\cos \alpha_s)^D} + E \cdot \sin \alpha_s \right] \quad (4.53)$$

dove

- $133,8$ (klux) rappresenta l'illuminamento extraterrestre;
- E_0 rappresenta l'illuminamento sul piano orizzontale (misurato o calcolato);
- le costanti B, C, D, E sono fornite da Tab.4.5 per i vari tipi di cielo [41].

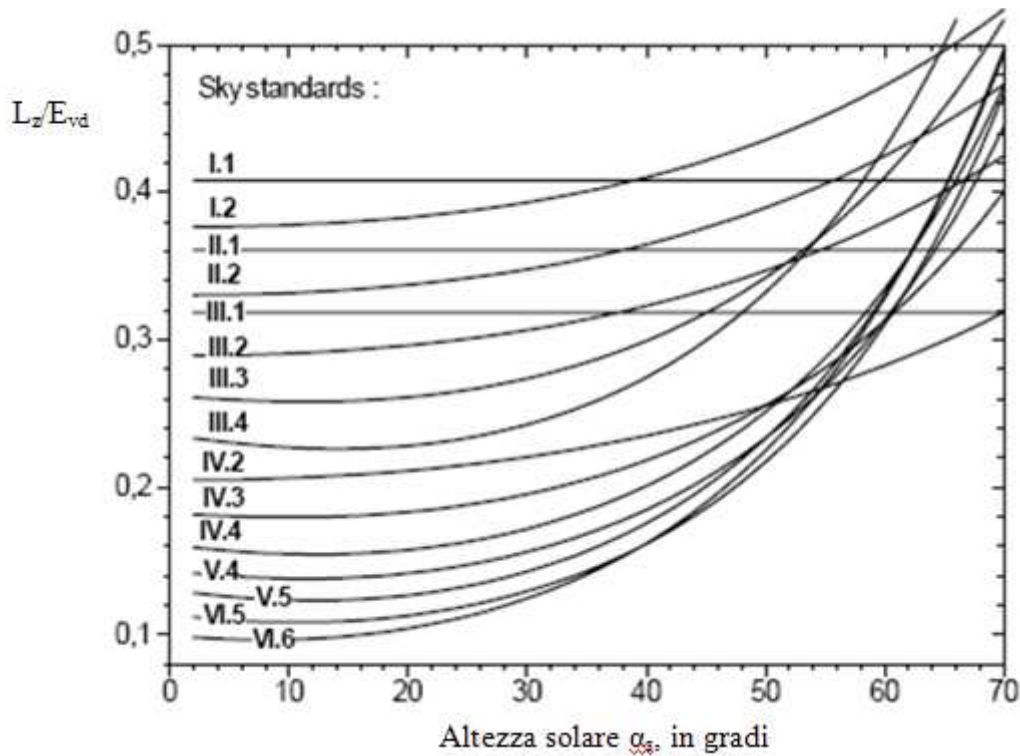
Tab.4.5 – Costanti B, C, D, E per i diversi 15 tipi di cielo.

Sky type	Sky code	Parameter					
		<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1	I.1	*)		54.63	1.00	0.00	0.00
2	I.2			12.35	3.68	0.59	50.47
3	II.1			48.30	1.00	0.00	0.00
4	II.2			12.23	3.57	0.57	44.27
5	III.1			42.59	1.00	0.00	0.00
6	III.2			11.84	3.53	0.55	38.78
7	III.3	0.957	1.790	21.72	4.52	0.63	34.56
8	III.4	0.830	2.030	29.35	4.94	0.70	30.41
9	IV.2	0.600	1.500	10.34	3.45	0.50	27.47
10	IV.3	0.567	2.610	18.41	4.27	0.63	24.04
11	IV.4	1.440	-0.750	24.41	4.60	0.72	20.76
12	V.4	1.036	0.710	23.00	4.43	0.74	18.52
13	V.5	1.244	-0.840	27.45	4.61	0.76	16.59
14	VI.5	0.881	0.453	25.54	4.40	0.79	14.56
15	VI.6	0.418	1.950	28.08	4.13	0.79	13.00

*) These sky types are associated with no sunlight therefore the formula for these cases is not valid.

Il problema principale per l'applicazione del metodo CIE consiste nel fatto che finora non è stato sviluppato un criterio generale, indipendente dalle misure di luminanza, per stabilire in quali condizioni meteorologiche si ha un certo tipo di cielo, tra i 15 proposti. Invece nel metodo di Perez il tipo di cielo dipende dal valore dell'indice di serenità, funzione dell'irradianza diffusa e diretta, e nel metodo di Igawa il tipo di cielo varia continuamente al variare dell'indice di cielo sereno e dell'indice di non nuvolosità, a loro volta funzioni dei parametri di irradianza.

Uno dei criteri proposti per la scelta del cielo CIE consiste nell'esame, per ciascuna scansione, del valore del rapporto L_z/E_{vd} tra la luminanza zenitale e l'illuminamento diffuso sul piano orizzontale, calcolato con l'equazione (4.53). Lo studio di questo rapporto, graficato in funzione dell'altezza α_s , per i 15 tipi di cielo, mostra che esso può determinare il tipo di cielo solo per valori dell'altezza solare inferiori a circa 30°, poiché, per valori più alti dell'altezza solare, le varie curve si intersecano in molti punti e pertanto il tipo di cielo non risulta determinato in modo univoco, come mostrato dalla Fig.4.2.

Fig.4.2 – L_z/E_{vd} Standard.

Un altro criterio proposto consiste nel confronto tra i valori teorici e sperimentali della funzione indicatrice e della funzione gradiente, ma questo metodo, piuttosto laborioso, non risulta applicabile per valori dell'altezza solare maggiori di 45° [26].

Un terzo criterio, usato in questo lavoro, è una variante di un metodo proposto per primo da Tregenza [19] e consiste, come verrà spiegato nel paragrafo 5.4, nella ricerca del valore minimo dello scarto quadratico medio tra i 145 valori di luminanza calcolati con i 15 tipi di cielo ed i valori sperimentali di luminanza.

Il secondo ed il terzo criterio hanno bisogno, per la loro applicazione, della conoscenza dei valori di luminanza; il primo criterio necessita la conoscenza della sola luminanza zenitale.

Pertanto, attualmente, il metodo CIE non è un vero metodo di predizione delle luminanze del cielo, ma è possibile, se le luminanze vengono misurate in una certa località, determinare (preferibilmente con il terzo metodo) la frequenza di occorrenza dei 15 tipi di cielo CIE nella stessa località [29], [30].

5. CONFRONTO TRA I MODELLI DI CALCOLO ED I DATI SPERIMENTALI.

Descritti i diversi modelli di calcolo della luminanza del cielo, è necessario mettere a confronto i risultati ottenibili con tali prototipi ed i dati misurati attraverso lo Sky Scanner.

5.1 Metodologia di analisi.

I dati sperimentali sono rilevati con la frequenza di dieci minuti. Per ogni scansione del cielo, applicando opportunamente le relazioni definite nel capitolo precedente, si calcolano i valori di luminanza puntuale e si confrontano con i rispettivi valori sperimentali.

Per verificare la validità dei diversi modelli è necessario valutare l'errore percentuale ε_i definito come:

$$\varepsilon_i = \frac{Lp_{calcolato,i} - Lp_{sperimentale,i}}{Lp_{sperimentale,i}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Per stimare la qualità di approssimazione dei modelli con i dati sperimentali, è utile definire due parametri:

- errore percentuale medio $\bar{\varepsilon}$, ovvero la media degli errori ε_i :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_i}{N} \quad (5.2)$$

- errore quadratico medio percentuale *RMS*, ovvero la radice quadrata del rapporto tra la somma degli errori relativi al quadrato ed il numero di dati considerato:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i)^2}{N}} \quad (5.3)$$

L'analisi è stata svolta effettuando dei filtraggi sui dati. In primo luogo è stato necessario escludere dal conteggio dell'errore medio e dell'RMS quei punti in cui il valore dell'errore percentuale è eccessivamente elevato, dovuto probabilmente ad errate misurazioni da parte dello strumento, o a condizioni di imprevedibilità meteorologica. In tale operato però, è fondamentale tenere conto della perdita di dati associata al filtraggio stesso rispetto al numero di dati iniziali, un'eccessiva riduzione dei dati non permetterebbe una corretta analisi.

Un secondo passo ha previsto un'ulteriore filtraggio dovuto al fatto che gli errori più alti si verificano anche in corrispondenza di quei punti che presentano una altezza solare di 6° , dovuto probabilmente all'influenza degli edifici e all'orografia del posto. Si è ritenuto opportuno quindi fare un'analisi anche nel caso di eliminazione dei punti con $\alpha=6^\circ$.

Con la metodologia appena esposta, in questa prima fase di analisi, sono stati elaborati i dati relativi alla città di Osaka anno 2007, di Arcavacata di Rende anno 2008 (anche 2011) e di Lione anno 2005.

5.2 Confronto con il modello di Perez.

Per confrontare i dati sperimentali con il modello di Perez, vengono applicate le equazioni descritte nel paragrafo 4.1.

In Tab.5.1 sono mostrati i risultati ottenuti per i primi cinque punti di una distribuzione di luminanza del cielo nel giorno 10/09/2007 alle ore 8:02.

Tab.5.1 – Esempio di applicazione del modello di Perez per i primi cinque punti di una distribuzione di luminanza del cielo (giorno 10/09/2007 ore 8:02).

Punti	α (rad)	α_s (grad)	α_s (rad)	I_o (W/m ²)	D_o (W/m ²)	I_{bn} (W/m ²)	ζ (rad)	ζ (gradi)	m	Δ	ϵ
1	0.105	28.81	0.503	1351.13	58.1	0.2	1.30	74.22	2.1	0.09	1
2	0.105	28.81	0.503	1351.13	58.1	0.2	1.48	84.74	2.1	0.09	1
3	0.105	28.81	0.503	1351.13	58.1	0.2	1.66	95.17	2.1	0.09	1
4	0.105	28.81	0.503	1351.13	58.1	0.2	1.84	105.42	2.1	0.09	1
5	0.105	28.81	0.503	1351.13	58.1	0.2	2.01	115.33	2.1	0.09	1

Punti	a_1	a_2	a_3	a_4	a	d_1	d_2	d_3	d_4	d	e_1	e_2	e_3	e_4	e
1	1.353	-0.258	-0.269	-1.437	0.92	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809	-0.2552	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938	-0.05395
2	1.353	-0.258	-0.269	-1.437	0.92										
3	1.353	-0.258	-0.269	-1.437	0.92										
4	1.353	-0.258	-0.269	-1.437	0.92										
5	1.353	-0.258	-0.269	-1.437	0.92										

Punti	$f(\zeta)$	$\varphi(\alpha)$	$f(\pi/2-\alpha_s)$	$\varphi(\pi/2)$	l_r	a_i	c_i	c'_i	d_i	L_z (W/m ²)	L_p calcolato (W/m ²)	L_p strumento (W/m ²)	ERRORE
1	1.360	1.002	1.374	1.472	0.674	40.86	26.77	-29.59	-45.75	2817.327	1898.842	1203.03	58%
2	1.347	1.002			0.667						1880.513	1354.993	39%
3	1.332	1.002			0.660						1858.49	1392.984	33%
4	1.313	1.002			0.651						1833.104	1456.301	26%
5	1.294	1.002			0.641						1805.533	1494.292	21%

Per ogni istante temporale considerato si avranno quindi 145 valori dell'errore percentuale. Valutati gli errori percentuali per ogni giorno, si passa alla valutazione dell'errore percentuale medio e dell'errore quadratico medio percentuale. Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori dell'errore medio $\bar{\varepsilon}$ e dell'errore quadratico medio RMS per tutti i mesi dell'anno 2007 per i dati di Osaka (Tab.5.2), per i mesi dell'anno 2008 per i dati della città di Arcavacata di Rende (Tab.5.3) e per i mesi dell'anno 2005 per la città di Lione (Tab.5.4) ottenuti con il modello di Perez. Per i dati di Osaka è riportata l'analisi completa mentre, per semplicità, per le altre due località sono riportati solo i risultati per $\alpha > 6^\circ$ ed $-100\% < \varepsilon < 100\%$.

Tab.5.2 - Risultati ottenuti con il modello di Perez per l'anno 2007 dati di Osaka.

		ε	RMS	N	
Gennaio	Tutti i dati	40.46%	97.22%	259985	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	34.17%	65.05%	256853	98.80%
	-200% < ε < 200%	30.56%	57.31%	252416	97.09%
	-100% < ε < 100%	19.81%	40.89%	228830	88.02%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	26.99%	60.23%	206195	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	26.14%	55.43%	205777	99.80%
	-200% < ε < 200%	24.22%	50.78%	203916	98.89%
	-100% < ε < 100%	3.31%	26.11%	190123	92.21%
Febbraio	Tutti i dati	43.17%	109.93%	254475	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	35.54%	64.30%	251047	98.65%
	-200% < ε < 200%	32.08%	56.73%	246843	97.00%
	-100% < ε < 100%	21.95%	41.04%	224510	88.22%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	28.22%	61.95%	201825	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	26.92%	53.93%	201280	99.73%
	-200% < ε < 200%	25.23%	49.74%	199672	98.93%
	-100% < ε < 100%	4.58%	26.59%	187194	92.75%

Continua Tab.5.2.

Marzo		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	39.60%	92.18%	308705	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	33.87%	61.29%	305226	98.87%
	-200% < ε < 200%	31.22%	55.09%	301274	97.59%
	-100% < ε < 100%	22.74%	41.65%	277381	89.85%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	27.25%	56.69%	244835	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	26.31%	52.31%	244231	99.75%
	-200% < ε < 200%	25.03%	48.85%	242694	99.13%
	-100% < ε < 100%	7.08%	27.79%	229323	93.66%
Aprile		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	28.47%	74.69%	325669	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	24.77%	55.74%	323073	99.20%
	-200% < ε < 200%	22.34%	49.87%	319450	98.09%
	-100% < ε < 100%	14.61%	37.06%	298648	91.70%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	17.64%	49.10%	258290	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	17.15%	46.18%	257983	99.88%
	-200% < ε < 200%	16.16%	43.49%	256795	99.42%
	-100% < ε < 100%	4.82%	25.83%	245758	95.15%
Maggio		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	25.88%	73.32%	359600	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	22.08%	56.47%	356540	99.15%
	-200% < ε < 200%	19.67%	50.80%	352624	98.06%
	-100% < ε < 100%	11.59%	38.05%	329245	91.56%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	15.53%	50.84%	285200	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	14.98%	48.11%	284796	99.86%
	-200% < ε < 200%	13.90%	45.32%	283406	99.37%
	-100% < ε < 100%	4.94%	27.06%	270311	94.78%

Continua Tab.5.2.

		ϵ	RMS	N	
Giugno	Tutti i dati	16.60%	73.84%	363370	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	13.25%	51.45%	360556	99.23%
	-200% < ϵ < 200%	11.18%	46.18%	357222	98.31%
	-100% < ϵ < 100%	4.98%	36.05%	339952	93.56%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	6.07%	49.34%	288190	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	5.48%	42.67%	287751	99.85%
	-200% < ϵ < 200%	4.64%	40.17%	286658	99.47%
	-100% < ϵ < 100%	0.47%	27.11%	278313	96.57%

		ϵ	RMS	N	
Luglio	Tutti i dati	18.22%	85.07%	368445	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	12.61%	51.20%	364618	98.96%
	-200% < ϵ < 200%	10.46%	45.72%	361222	98.04%
	-100% < ϵ < 100%	4.01%	34.91%	343412	93.21%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	5.54%	53.07%	292215	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	3.87%	40.10%	291402	99.72%
	-200% < ϵ < 200%	3.21%	38.08%	290576	99.44%
	-100% < ϵ < 100%	-1.11%	27.11%	283427	96.99%

		ϵ	RMS	N	
Agosto	Tutti i dati	34.29%	90.40%	348725	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	28.52%	61.45%	344618	98.82%
	-200% < ϵ < 200%	25.35%	54.32%	339476	97.35%
	-100% < ϵ < 100%				
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	22.03%	58.97%	276575	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	20.67%	52.59%	275618	99.65%
	-200% < ϵ < 200%	18.83%	47.97%	273285	98.81%
	-100% < ϵ < 100%	6.83%	30.70%	259355	93.77%

Continua Tab.5.2.

		ε	RMS	N		
Settembre	Tutti i dati	38.57%	107.30%	300730	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	30.55%	65.04%	296134	98.47%	
	-200% < ε < 200%	26.42%	56.22%	290420	96.57%	
	-100% < ε < 100%				0.00%	
			ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	25.79%	66.27%	238510	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	23.60%	58.10%	237120	99.42%	
	-200% < ε < 200%	20.54%	51.00%	233805	98.03%	
	-100% < ε < 100%	5.22%	31.32%	217711	91.28%	
			ε	RMS	N	
Ottobre	Tutti i dati	38.39%	109.33%	283910	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	30.14%	62.78%	279837	98.57%	
	-200% < ε < 200%	26.28%	54.19%	274791	96.79%	
	-100% < ε < 100%	16.30%	38.22%	251818	88.70%	
			ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	24.18%	66.31%	225170	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	22.02%	54.18%	224117	99.53%	
	-200% < ε < 200%	19.39%	47.61%	221439	98.34%	
	-100% < ε < 100%	4.02%	28.06%	208328	92.52%	
			ε	RMS	N	
Novembre	Tutti i dati	37.33%	110.27%	249255	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	30.19%	64.22%	245720	98.58%	
	-200% < ε < 200%	25.93%	54.81%	240800	96.61%	
	-100% < ε < 100%	15.63%	38.54%	220058	88.29%	
			ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	23.43%	61.57%	197685	N/N_{tot}	
	-300% < ε < 300%	21.93%	55.32%	196823	99.56%	
	-200% < ε < 200%	19.11%	48.22%	194262	98.27%	
	-100% < ε < 100%	3.68%	27.54%	182122	92.13%	

Continua Tab.5.2.

		ϵ	RMS	N	
Dicembre	Tutti i dati	40.52%	139.75%	251720	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	30.73%	67.13%	247568	98.35%
	-200% < ϵ < 200%	25.79%	56.90%	241852	96.08%
	-100% < ϵ < 100%	14.27%	39.20%	219206	87.08%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	26.99%	76.77%	199640	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	23.78%	59.24%	198377	99.37%
	-200% < ϵ < 200%	20.35%	51.43%	195250	97.80%
	-100% < ϵ < 100%	2.64%	28.28%	180873	90.60%

In Tab.5.2 si evidenzia come l'analisi attraverso l'eliminazione dei punti con $\alpha=6^\circ$ comporta risultati migliori.

Tab.5.3 - Risultati ottenuti con il modello di Perez per l'anno 2008 dati di Arcavacata di Rende.

		ϵ	RMS
Gennaio	-100% < ϵ < 100%	17.41%	41.98%
Febbraio	-100% < ϵ < 100%	23.91%	44.31%
Marzo	-100% < ϵ < 100%	20.56%	44.62%
Aprile	-100% < ϵ < 100%	25.65%	56.25%
Maggio	-100% < ϵ < 100%	11.14%	40.34%
Giugno	-100% < ϵ < 100%	1.28%	38.44%
Luglio	-100% < ϵ < 100%	4.01%	36.94%
Settembre	-100% < ϵ < 100%	17.45%	41.71%
Ottobre	-100% < ϵ < 100%	17.13%	40.92%
Novembre	-100% < ϵ < 100%	18.39%	40.26%
Dicembre	-100% < ϵ < 100%	20.62%	45.40%

Tab.5.4 - Risultati ottenuti con il modello di Perez per l'anno 2005 dati di Lione.

		ϵ	RMS
Settembre	-100% < ϵ < 100%	7.89%	34.07%
Ottobre	-100% < ϵ < 100%	7.32%	30.09%
Novembre	-100% < ϵ < 100%	13.57%	28.49%
Dicembre	-100% < ϵ < 100%	9.60%	35.21%

5.3 Confronto con il modello di Igawa.

Per confrontare i dati sperimentali con il modello di Igawa, vengono applicate le equazioni descritte nel paragrafo 4.2.

In Tab.5.5 sono mostrati i risultati ottenuti per i primi cinque punti di una distribuzione di luminanza del cielo nel giorno 05/10/2007 alle ore 15:32.

Tab.5.5 - Esempio di applicazione del modello di Perez per i primi cinque punti di una distribuzione di luminanza del cielo (giorno 05/10/2007 ore 13:32).

Punti	α (rad)	α_s (gra)	α_s (rad)	I_o (W/m ²)	D_o (W/m ²)	I_{bn} (W/m ²)	ζ (gradi)	ζ (rad)	m	Δ	ϵ	B00	B10	B20	B30
1	0.105	24.141	0.421	1370.2	133.2	732.9	65.15	1.14	2.43	0.24	3.13	0.404	-0.023	-0.573	2.443
2	0.105	24.141	0.421	1370.2	133.2	732.9	54.29	0.95	2.43	0.24	3.13	0.404	-0.023	-0.573	2.443
3	0.105	24.141	0.421	1370.2	133.2	732.9	43.67	0.76	2.43	0.24	3.13	0.404	-0.023	-0.573	2.443
4	0.105	24.141	0.421	1370.2	133.2	732.9	33.56	0.59	2.43	0.24	3.13	0.404	-0.023	-0.573	2.443
5	0.105	24.141	0.421	1370.2	133.2	732.9	24.68	0.43	2.43	0.24	3.13	0.404	-0.023	-0.573	2.443

Punti	B40	B50	B60	B01	B11	B21	B31	B41	B51	B61	B02	B12	B22	B32	B42	B52
1	-4.57	3.593	-1.012	-0.086	-0.24	7.261	-29.521	44.421	-29.136	7.006	0.231	0.535	-26.061	85.762	-108.953	60.344
2	-4.57	3.593	-1.012	-0.086	-0.24	7.261	-29.521	44.421	-29.136	7.006	0.231	0.535	-26.061	85.762	-108.953	60.344
3	-4.57	3.593	-1.012	-0.086	-0.24	7.261	-29.521	44.421	-29.136	7.006	0.231	0.535	-26.061	85.762	-108.953	60.344
4	-4.57	3.593	-1.012	-0.086	-0.24	7.261	-29.521	44.421	-29.136	7.006	0.231	0.535	-26.061	85.762	-108.953	60.344
5	-4.57	3.593	-1.012	-0.086	-0.24	7.261	-29.521	44.421	-29.136	7.006	0.231	0.535	-26.061	85.762	-108.953	60.344

Punti	B62	B03	B13	B23	B33	B43	B53	B63	B04	B14	B24	B34	B44	B54	B64	E _{eg}
1	-11.561	-0.545	-1.453	32.172	-88.077	93.507	-38.854	2.98	0.254	0.926	-12.566	28.813	-23.062	2.664	3.124	425.9
2	-11.561	-0.545	-1.453	32.172	-88.077	93.507	-38.854	2.98	0.254	0.926	-12.566	28.813	-23.062	2.664	3.124	425.9
3	-11.561	-0.545	-1.453	32.172	-88.077	93.507	-38.854	2.98	0.254	0.926	-12.566	28.813	-23.062	2.664	3.124	425.9
4	-11.561	-0.545	-1.453	32.172	-88.077	93.507	-38.854	2.98	0.254	0.926	-12.566	28.813	-23.062	2.664	3.124	425.9
5	-11.561	-0.545	-1.453	32.172	-88.077	93.507	-38.854	2.98	0.254	0.926	-12.566	28.813	-23.062	2.664	3.124	425.9

Continua Tab. 5.5.

Punti	Kc	Cle	Ces	Ce	Si	A0	A1	A2	A3	A4	Rz	Eff. Diff.	a	b	c	d	e
1	1.063	0.837	0.179	0.313	1.977	0.282	-0.279	0.148	-0.039	0.031	0.145	109.026	-1.004	-0.360	11.269	-3.012	0.449
2	1.063	0.837	0.179	0.313	1.977	0.282	-0.279	0.148	-0.039	0.031	0.145	109.026	-1.004	-0.360	11.269	-3.012	0.449
3	1.063	0.837	0.179	0.313	1.977	0.282	-0.279	0.148	-0.039	0.031	0.145	109.026	-1.004	-0.360	11.269	-3.012	0.449
4	1.063	0.837	0.179	0.313	1.977	0.282	-0.279	0.148	-0.039	0.031	0.145	109.026	-1.004	-0.360	11.269	-3.012	0.449
5	1.063	0.837	0.179	0.313	1.977	0.282	-0.279	0.148	-0.039	0.031	0.145	109.026	-1.004	-0.360	11.269	-3.012	0.449

punti	f(ζ)	$\varphi(\alpha)$	f($\pi/2-\alpha_s$)	$\varphi(\pi/2)$	l_r	L_z (W/m ²)	L_p (W/m ²)	L_p strumento (W/m ²)	ERRORE
1	1.347	0.968	1.329	0.300	3.274	2109.116	6905.66	5148.84	34%
2	1.703	0.968	1.329	0.300	4.139	2109.116	8730.28	8298.72	5%
3	2.270	0.968	1.329	0.300	5.519	2109.116	11640.22	12236.07	-5%
4	3.143	0.968	1.329	0.300	7.640	2109.116	16113.66	15991.69	1%
5	4.351	0.968	1.329	0.300	10.578	2109.116	22309.42	22473.17	-1%

Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori dell'errore medio $\bar{\varepsilon}$ e dell'errore quadratico medio RMS per tutti i mesi dell'anno 2007 per i dati di Osaka (Tab.5.6), per i mesi dell'anno 2008 per i dati della città di Arcavacata di Rende (Tab.5.7) e per i mesi dell'anno 2005 per la città di Lione (Tab.5.8) ottenuti con il modello di Igawa. Per i dati di Osaka è riportata l'analisi completa mentre, per semplicità, per le altre due località sono riportati solo i risultati per $\alpha > 6^\circ$ ed $-100\% < \varepsilon < 100\%$.

Tab.5.6 - Risultati ottenuti con il modello di Igawa per l'anno 2007 dati di Osaka.

Gennaio		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	9.19%	62.91%	259260	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	5.86%	40.72%	257617	99.37%
	-200% < ε < 200%	4.46%	36.32%	256094	98.78%
	-100% < ε < 100%	0.98%	29.03%	249516	96.24%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	-0.35%	34.58%	205620	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	-0.67%	32.14%	205467	99.93%
	-200% < ε < 200%	-1.15%	30.32%	205050	99.72%
	-100% < ε < 100%	-2.97	26.1	202311	98.39%
Febbraio		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	10.19%	64.41%	253895	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	6.73%	41.07%	252277	99.36%
	-200% < ε < 200%	5.24%	36.39%	250687	98.74%
	-100% < ε < 100%	1.54%	28.69%	243718	95.99%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	-0.08%	34.16%	201365	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	-0.35%	32.47%	201229	99.93%
	-200% < ε < 200%	-0.89%	30.43%	200779	99.71%
	-100% < ε < 100%	-2.94	25.8	197696	98.18%

Continua Tab.5.6.

		ε	RMS	N	
Marzo	Tutti i dati	13.12%	64.29%	307545	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	9.59%	42.63%	305466	99.32%
	-200% < ε < 200%	7.92%	37.48%	303280	98.61%
	-100% < ε < 100%	4.23%	29.87%	294778	95.85%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	2.55%	34.92%	243915	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	2.26%	33.34%	243719	99.92%
	-200% < ε < 200%	1.67%	31.16%	243106	99.67%
	-100% < ε < 100%	-0.19	26.91	239705	98.27%

		ε	RMS	N	
Aprile	Tutti i dati	13.96%	55.37%	326104	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	11.41%	41.17%	324265	99.44%
	-200% < ε < 200%	10.09%	36.99%	322403	98.87%
	-100% < ε < 100%	6.57%	29.51%	313595	96.16%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	3.80%	33.33%	258635	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	3.62%	31.39%	258519	99.96%
	-200% < ε < 200%	3.24%	29.92%	258105	99.80%
	-100% < ε < 100%	1.49	25.74	254624	98.45%

		ε	RMS	N	
Maggio	Tutti i dati	13.07%	55.34%	359600	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	10.50%	41.60%	357578	99.44%
	-200% < ε < 200%	9.18%	37.50%	355499	98.86%
	-100% < ε < 100%	5.77%	30.46%	346208	96.28%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	3.43%	33.50%	285200	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	3.26%	32.56%	285065	99.95%
	-200% < ε < 200%	2.84%	30.98%	284546	99.77%
	-100% < ε < 100%	1.2	27.22	281001	98.53%

Continua Tab.5.6.

		ϵ	RMS	N	
Giugno	Tutti i dati	10.52%	54.23%	363370	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	7.94%	40.51%	361289	99.43%
	-200% < ϵ < 200%	6.83%	37.05%	359560	98.95%
	-100% < ϵ < 100%	3.42%	30.10%	350183	96.37%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	1.01%	32.97%	288190	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	0.83%	32.04%	288043	99.95%
	-200% < ϵ < 200%	0.44%	30.54%	287560	99.78%
	-100% < ϵ < 100%	-1.26	26.66	283899	98.51%

		ϵ	RMS	N	
Luglio	Tutti i dati	11.46%	67.94%	368300	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	7.31%	41.31%	365448	99.23%
	-200% < ϵ < 200%	6.16%	37.77%	363641	98.73%
	-100% < ϵ < 100%	2.39%	30.27%	353246	95.91%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	1.45%	52.03%	292100	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	-0.11%	31.90%	291594	99.83%
	-200% < ϵ < 200%	-0.41%	30.77%	291222	99.70%
	-100% < ϵ < 100%	-2.2	26.81	287297	98.36%

		ϵ	RMS	N	
Agosto	Tutti i dati	8.14%	58.02%	349160	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	5.30%	41.36%	347179	99.43%
	-200% < ϵ < 200%	4.07%	37.62%	345355	98.91%
	-100% < ϵ < 100%	0.68%	30.91%	336694	96.43%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	0.68%	39.27%	276920	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	0.22%	35.60%	276640	99.90%
	-200% < ϵ < 200%	-0.39%	33.56%	275933	99.64%
	-100% < ϵ < 100%	-2.5	29.16	271663	98.10%

Continua Tab.5.6.

Settembre		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	11.92%	69.11%	300440	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	8.00%	46.98%	298203	99.26%
	-200% < ε < 200%	6.16%	41.97%	295857	98.47%
	-100% < ε < 100%	1.15%	33.00%	284817	94.80%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	2.91%	43.73%	238280	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	2.31%	41.10%	237883	99.83%
	-200% < ε < 200%	1.20%	37.74%	236772	99.37%
	-100% < ε < 100%	-2.33	31.04	230680	96.81%
Ottobre		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	8.95%	64.22%	283910	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	5.39%	42.07%	282040	99.34%
	-200% < ε < 200%	3.94%	37.72%	280294	98.73%
	-100% < ε < 100%	0.01%	29.93%	272157	95.86%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	-0.27%	37.15%	225170	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	-0.56%	35.39%	225004	99.93%
	-200% < ε < 200%	-1.34%	32.73%	224267	99.60%
	-100% < ε < 100%	-3.83	27.32	220230	97.81%
Novembre		ε	RMS	N	
	Tutti i dati	7.91%	61.92%	248240	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	4.62%	41.93%	246615	99.35%
	-200% < ε < 200%	3.12%	37.40%	245046	98.71%
	-100% < ε < 100%	-0.70%	29.71%	238225	95.97%
		ε	RMS	N	
	$\alpha > 6$	-0.63%	36.83%	196880	N/N_{tot}
	-300% < ε < 300%	-0.98%	35.00%	196693	99.91%
	-200% < ε < 200%	-1.73%	32.40%	196082	99.59%
	-100% < ε < 100%	-4.14	27.08	192690	97.87%

Continua Tab.5.6.

		ϵ	RMS	N	
Dicembre	Tutti i dati	7.65%	62.29%	249545	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	4.95%	45.25%	248191	99.46%
	-200% < ϵ < 200%	3.14%	40.18%	246283	98.69%
	-100% < ϵ < 100%	-1.66%	31.24%	237719	95.26%
		ϵ	RMS	N	
	$\alpha > 6$	0.14%	39.63%	197915	N/N_{tot}
	-300% < ϵ < 300%	-0.10%	38.46%	197789	99.94%
	-200% < ϵ < 200%	-0.98%	35.70%	197051	99.56%
	-100% < ϵ < 100%	-4.29	29.11	192356	97.19%

Tab.5.7 - Risultati ottenuti con il modello di Igawa per l'anno 2008 dati di Arcavacata di Rende.

		ϵ	RMS
Gennaio	-100% < ϵ < 100%	4.01%	43.44%
Febbraio	-100% < ϵ < 100%	14.02%	42.45%
Marzo 2011	-100% < ϵ < 100%	12.64%	42.45%
Aprile 2011	-100% < ϵ < 100%	23.40%	49.00%
Maggio	-100% < ϵ < 100%	2.69%	41.39%
Giugno	-100% < ϵ < 100%	-7.07%	39.60%
Luglio	-100% < ϵ < 100%	-4.06%	37.58%
Settembre	-100% < ϵ < 100%	9.85%	40.17%
Ottobre	-100% < ϵ < 100%	6.41%	37.86%
Novembre	-100% < ϵ < 100%	12.16%	38.40%
Dicembre	-100% < ϵ < 100%	12.84%	44.62%

Tab.5.8 - Risultati ottenuti con il modello di Igawa per l'anno 2005 dati di Lione.

		ε	RMS
Settembre	-100% < ε < 100%	-7.15%	33.60%
Ottobre	-100% < ε < 100%	2.96%	27.11%
Novembre	-100% < ε < 100%	14.46%	24.00%
Dicembre	-100% < ε < 100%	-1.99%	30.72%

5.4 Confronto con i modelli CIE.

Il modello CIE risulta un modello di complessa applicazione, non essendo stata definita una metodologia di calcolo del tipo di cielo caratterizzante una certa distribuzione. Durante questa prima fase di elaborazione dei dati, l'applicazione del modello CIE è stata la seguente: data una distribuzione, si applicano le relazioni espresse nel paragrafo 4.3 considerando tutti i 15 tipi di cielo, questo implica che per ogni distribuzione analizzata si avranno 15 differenti valori di luminanza calcolata, si calcolano gli RMS tra la singola distribuzione misurata e le 15 luminanze calcolate, di questi RMS si sceglie quello con valore minore e quindi in funzione di questo valore si determina il tipo di cielo per quella distribuzione, noto il tipo di cielo si riapplica il modello applicando i soli parametri relativi al cielo calcolato.

Nelle Tab. 5.9, 5.10, 5.11 vengono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del modello CIE per i dati rispettivamente della città di Osaka, della città di Arcavacata di Rende e della città di Lione. L'analisi si è sviluppata eliminando i dati che generano un errore maggiore del 100% e minore del -100% ed i dati aventi altezza solare minore di 6°.

Tab.5.9 - Risultati ottenuti con il modello CIE per l'anno 2007 dati di Osaka.

	senza filtro		con filtro ($\alpha > 6^\circ$)		N tot	N (-100,100)	N/No
	ϵ	RMS	ϵ	RMS			
Gennaio	2.32%	20.27%	1.57%	18.98%	206195	205135	99.48%
Febbraio	2.69%	20.52%	1.89%	19.16%	201825	200626	99.41%
Marzo	3.89%	22.23%	3.15%	21.06%	244950	243625	99.46%
Aprile	3.29%	20.32%	2.71%	19.35%	258405	257306	99.57%
Maggio	3.70%	22.39%	2.82%	21.23%	285430	283919	99.47%
Giugno	3.49%	22.51%	2.73%	21.31%	288305	286770	99.47%
Luglio	3.46%	22.44%	2.80%	21.39%	292330	290877	99.50%
Agosto	6.25%	25.80%	5.09%	24.01%	290445	291598	99.04%
Settembre	5.97%	29.34%	3.74%	25.90%	238510	234747	98.42%
Ottobre	3.56%	23.52%	2.38%	21.62%	225285	223331	99.17%
Novembre	3.04%	21.96%	2.03%	20.31%	197915	196429	99.25%
Dicembre	2.92%	23.65%	1.46%	21.33%	199870	197788	98.96%

Tab.5.10 - Risultati ottenuti con il modello CIE per l'anno 2008 dati di Arcavacata di Rende.

	senza filtro		con filtro ($\alpha > 6^\circ$)		N tot	N (-100,100)	N/No
	ϵ	RMS	ϵ	RMS			
Gennaio	6.31%	37.25%	7.23%	37.19%	185840	182531	98.22%
Febbraio	2.93%	22.96%	2.96%	22.95%	145245	144243	99.31%
Marzo 2011	13.87%	38.88%	9.26%	32.28%	222180	214279	96.44%
Aprile 2011	28.64%	53.05%	15.12%	36.21%	146855	134899	91.86%
Maggio	12.97%	33.11%	12.81%	33.00%	283475	274953	96.99%
Giugno	6.56%	28.32%	6.48%	28.59%	152375	150406	98.71%
Luglio	7.44%	23.45%	7.83%	24.12%	77050	76449	99.22%
Settembre	5.87%	27.56%	5.56%	26.63%	158815	156868	98.77%
Ottobre	3.70%	23.60%	4.38%	24.74%	138345	136652	98.78%
Novembre	1.61%	26.11%	1.70%	25.34%	105340	103807	98.54%
Dicembre	6.56%	34.12%	6.60%	34.30%	67965	61141	89.96%

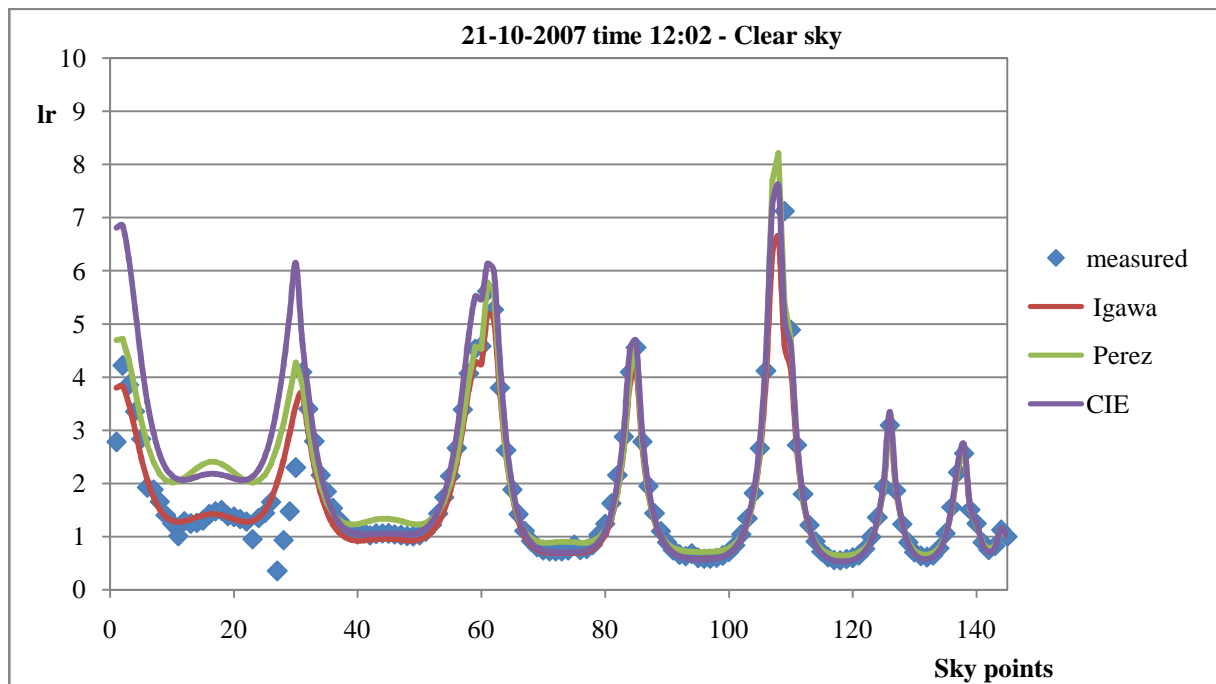
Tab.5.11 - Risultati ottenuti con il modello CIE per l'anno 2005 dati di Lione.

	senza filtro		con filtro		N tot	N (-100,100)	N/No
	ϵ	RMS	ϵ	RMS			
Settembre	54.68%	495.49%	-7.17%	37.58%	35075	32068	91.77%
Ottobre	28.52%	192.19%	-2.39%	24.82%	6670	6438	96.52%
Novembre	-0.51%	16.69%	-0.53%	16.65%	5290	5289	99.98%
Dicembre	10.91%	64.14%	-0.12%	29.37%	14375	13653	95.14%

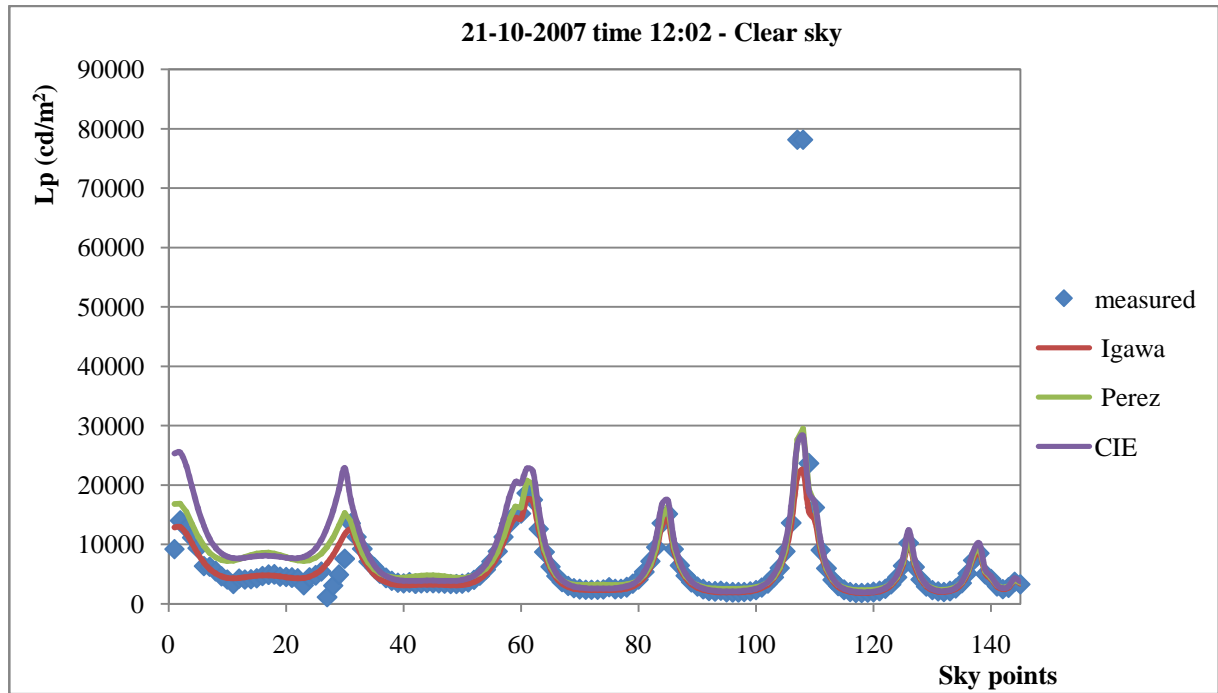
5.5 Analisi delle luminanze assolute, relative e zenitali.

Nel seguente paragrafo, lo studio dei modelli di calcolo precedentemente citati è affrontato in termini non solo di luminanza assoluta ma anche relativa e zenitale al fine di avere un valutazione completa della validità dei modelli stessi. La metodologia di analisi è la stessa espressa nel paragrafo 5.1.

Nella Fig.5.1 sono presentate, a titolo di esempio, le luminanze relative (a) e le luminanze assolute (b) misurate e calcolate con i tre modelli, alle ore 12 di un giorno sereno per la città di Osaka. Nella Fig.5.2 le stesse luminanze sono riportate per un giorno intermedio e nella Fig.5.3 per un giorno overcast (relativi sempre ai dati della città di Osaka). Si nota dai grafici che, ovviamente, le forme delle distribuzioni di luminanza relativa ed assoluta in una stessa scansione sono identiche, differendo le due luminanze per una costante (pari alla luminanza zenitale).

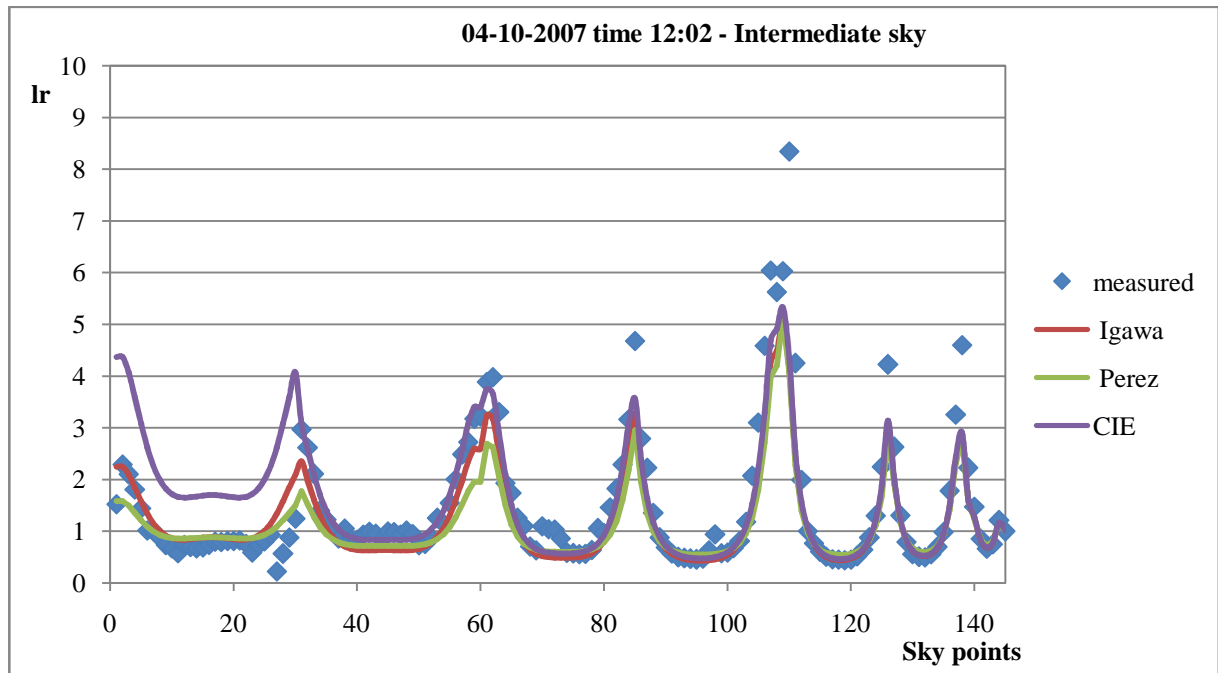


(a)

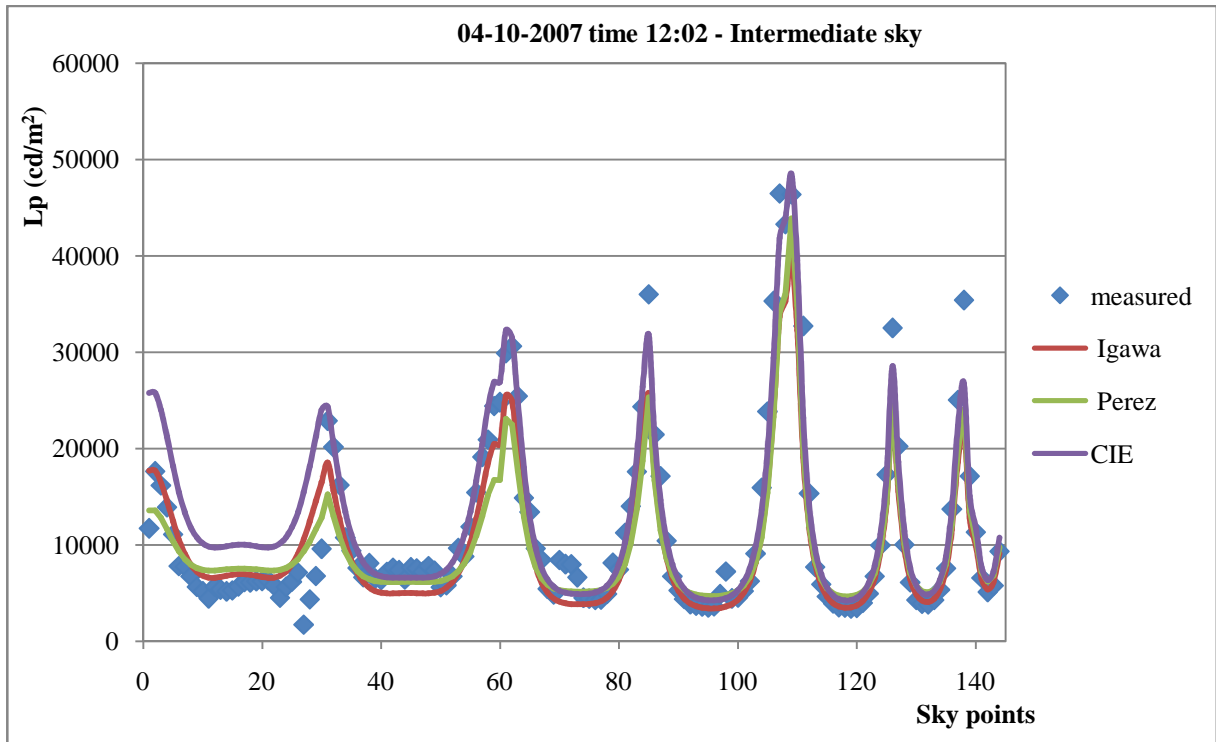


(b)

Fig.5.1 - Luminanze relative ed assolute per un giorno sereno.

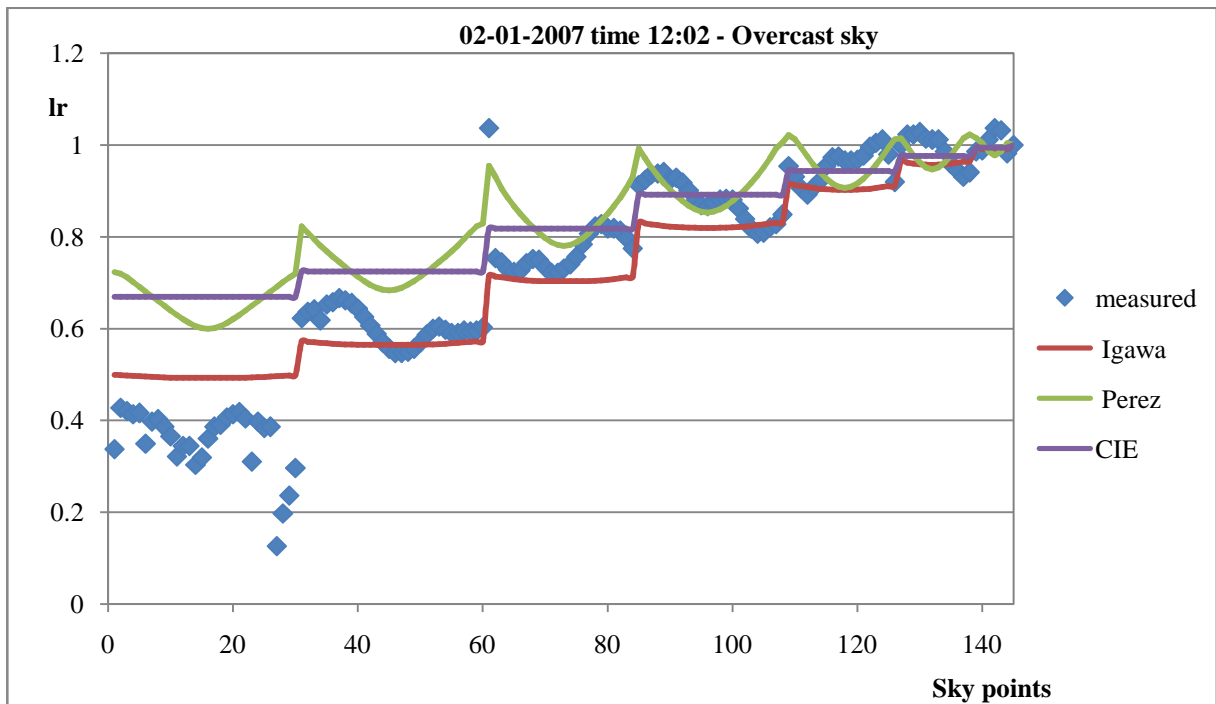


(a)

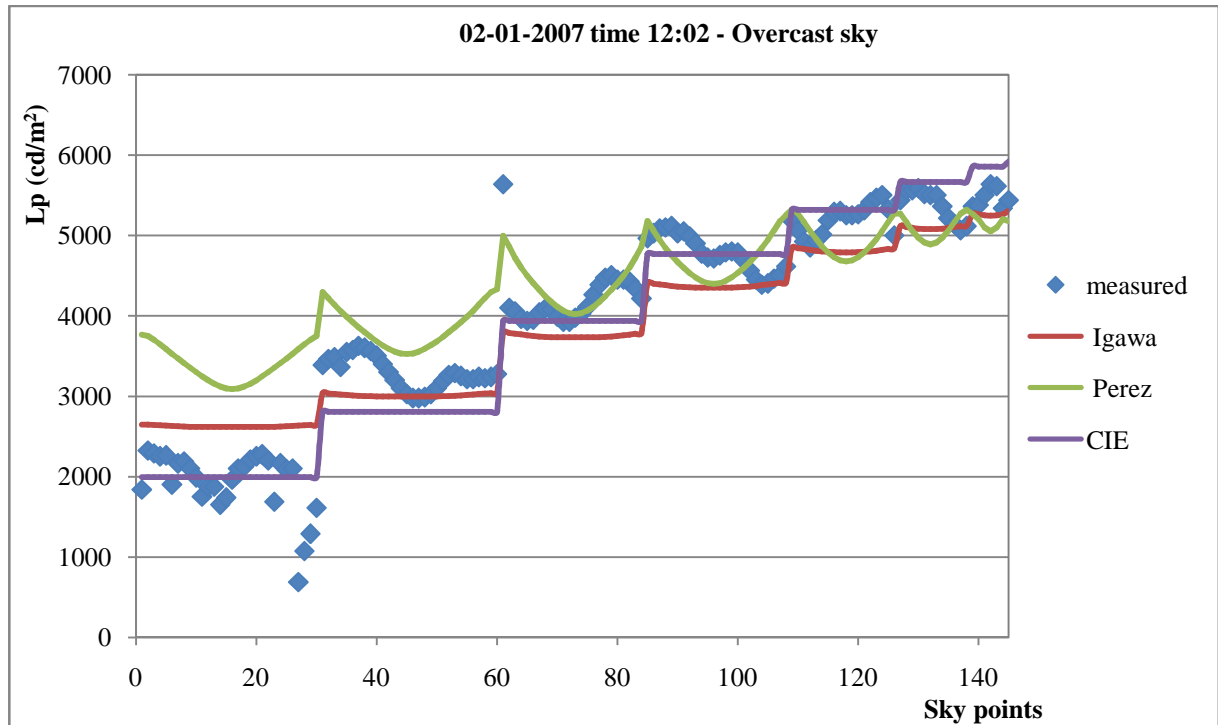


(b)

Fig.5.2 - Luminanze relative ed assolute per un giorno intermedio.



(a)



(b)

Fig.5.3 - Luminanze relative ed assolute per un giorno overcast.

Nella Fig. 5.4 sono presentati, sotto forma di istogrammi, i valori medi mensili di MB ed RMS tra i dati di luminanza assoluta calcolata con i tre modelli ed i dati misurati ad Osaka nell'anno 2007: si osserva che i valori più piccoli di MB sono ottenuti con il metodo di Igawa ed il metodo CIE (valori di MB in genere inferiori al 5%), mentre i valori più piccoli di RMS sono ottenuti con il metodo CIE. In generale, il metodo di Igawa si comporta meglio del metodo di Perez.

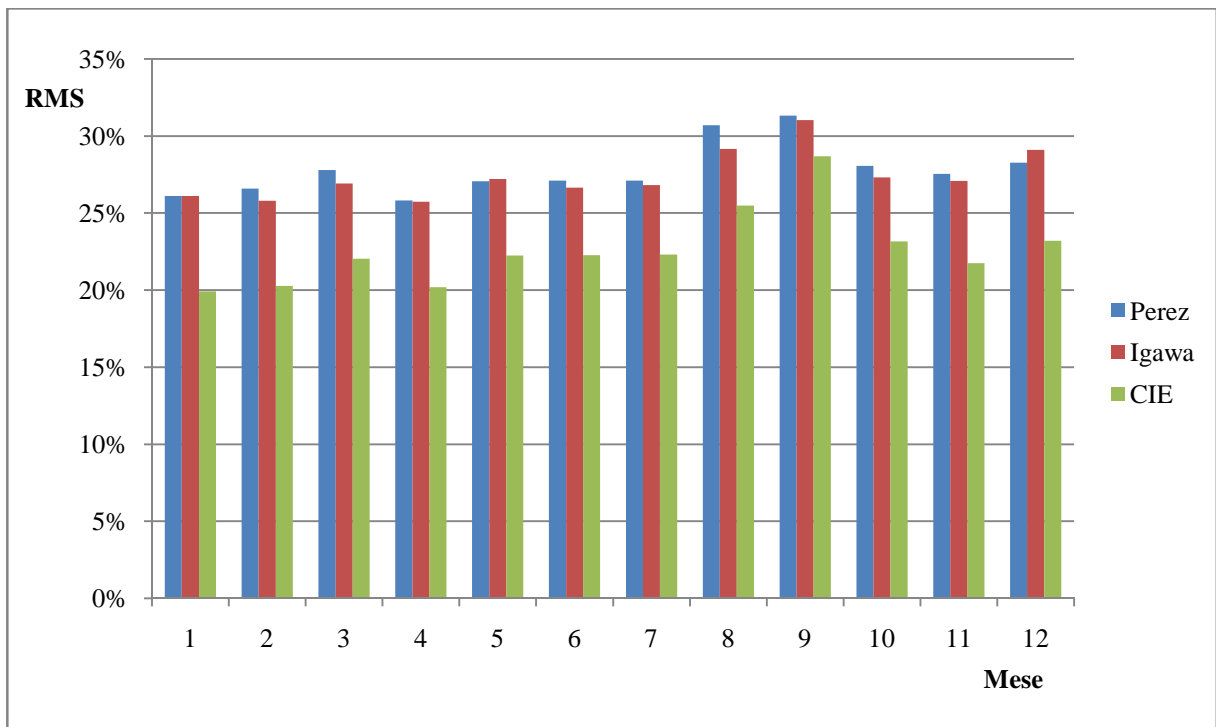
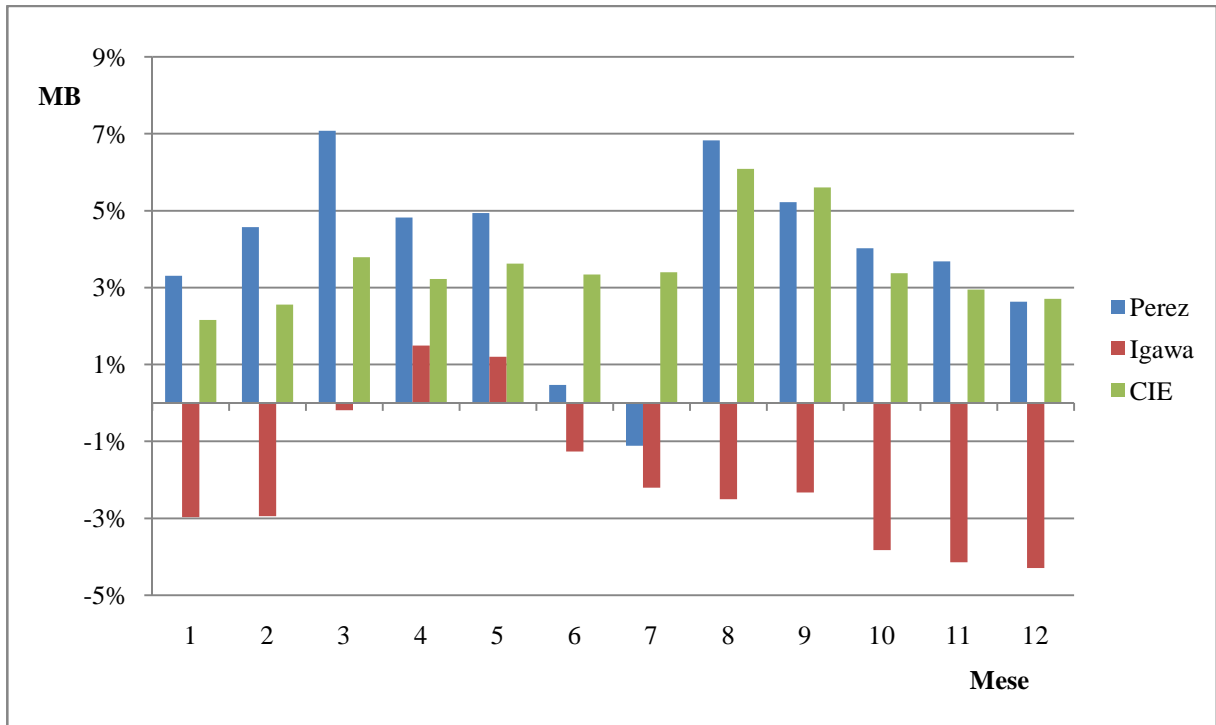


Fig. 5.4 - Confronto tra le luminanze assolute calcolate e misurate ad Osaka (2007).

Nella Fig.5.5 lo stesso confronto è eseguito per le luminanze relative: in termini di luminanze relative gli MB più piccoli sono ottenuti con il modello di Perez ed il modello CIE mentre gli RMS più piccoli si ottengono con il modello CIE.

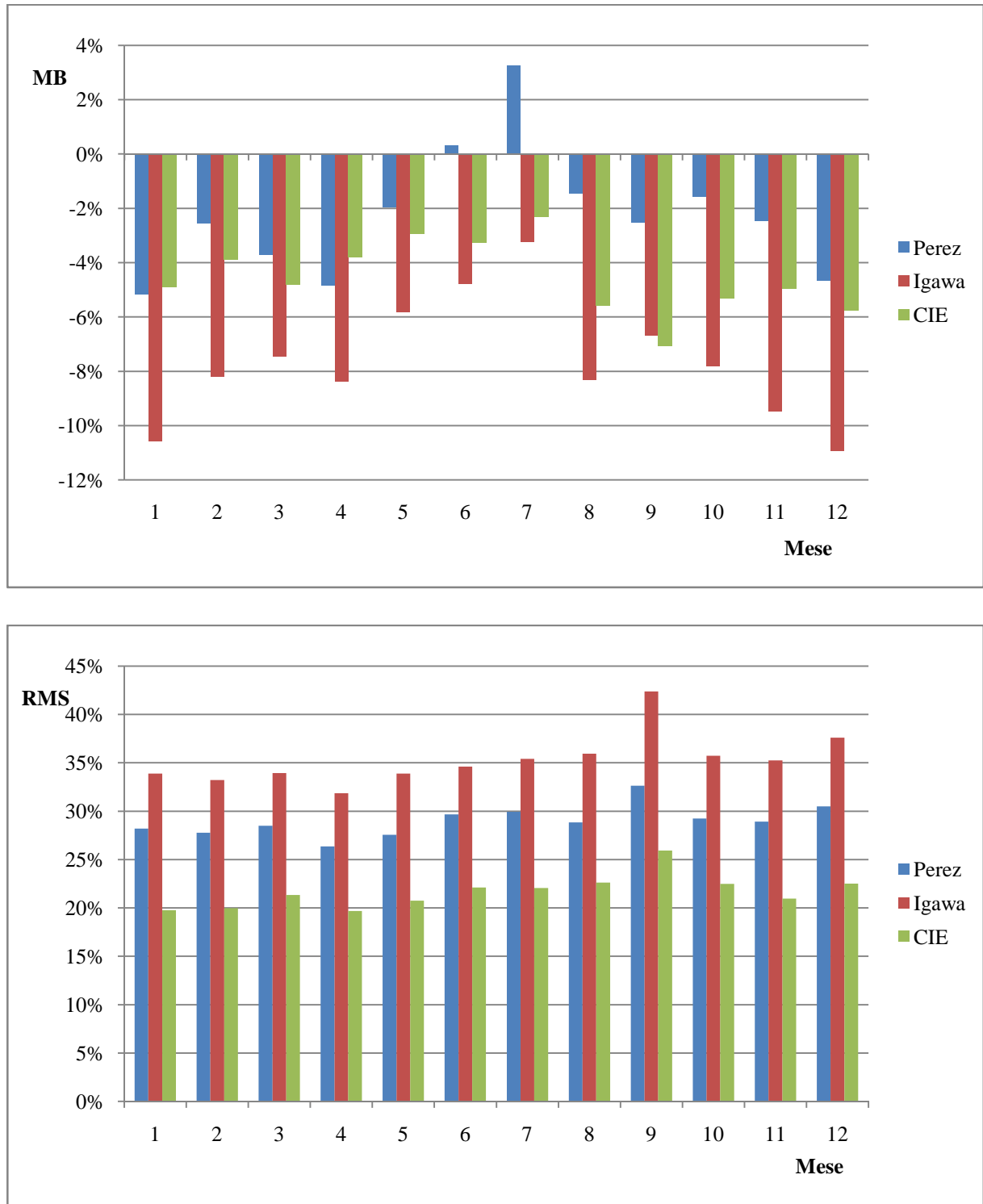


Fig. 5.5 - Confronto tra le luminanze relative calcolate e misurate ad Osaka (2007).

Nella Fig.5.6 è mostrato il confronto tra le luminanze zenitali calcolate e misurate: i valori di MB più piccoli sono presentati dal modello di Igawa; al secondo posto viene il modello CIE e al terzo il modello di Perez; i valori di RMS più piccoli sono forniti dal metodo CIE.

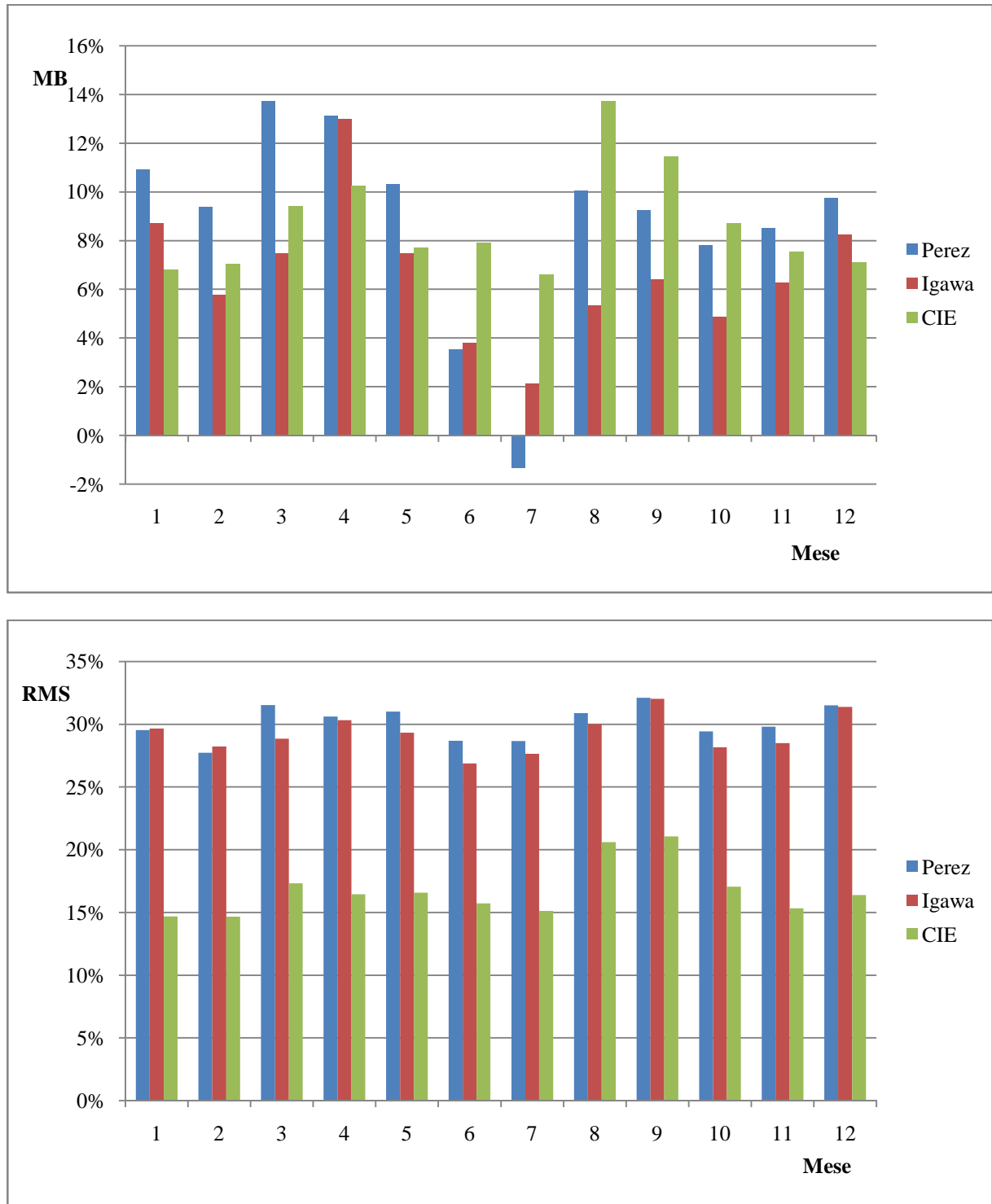


Fig.5.6 - Confronto tra le luminanze zenitali calcolate e misurate ad Osaka.

La situazione complessiva annuale relativa ai dati misurati ad Osaka nell'anno 2007 è evidenziata in Tab.5.12. Confrontando i risultati annuali ottenuti, si evidenzia che le luminanze assolute sono predette meglio dal metodo CIE (MB=3% ed RMS=21%); segue il modello di Igawa, con MB= -2% e RMS=27% e poi il modello di Perez, con MB=4% e RMS=28%. Per le luminanze relative, al primo posto viene il metodo CIE (MB=-5% RMS=22%), poi il modello di Perez (MB= -2% e RMS=29%) ed infine il modello di Igawa (MB= -10% e RMS=31%). Le luminanze zenitali sono predette dal metodo CIE con MB=9% e RMS=17%, dal modello di Igawa con MB=6% e RMS=21%, e dal modello di Perez con MB=9% e RMS=30%.

Tab.5.12 - Valori di MB e di RMS tra le luminanze calcolate e misurate, Dati di Osaka (anno 2007).

Modello	Luminanza assoluta		Luminanza relativa		Luminanza zenitale	
	MB	RMS	MB	RMS	MB	RMS
Perez	3.8	27.8	-2.5	28.9	8.7	30.1
Igawa	-1.8	27.4	-9.7	30.9	6.4	21.1
CIE	2.7	21.3	-4.6	21.6	8.7	16.7

Nella Fig.5.7 sono presentati i valori medi mensili di MB e di RMS tra i dati di luminanza assoluta calcolata con i tre modelli ed i dati misurati ad Arcavacata di Rende nell'anno 2008 (anno 2011 per i mesi di marzo ed aprile): si osserva che i valori più piccoli di MB e di RMS sono ottenuti con il metodo CIE. I valori medi annuali, riportati in Tab.5.13, sono, per il metodo CIE, MB=7% ed RMS=30%; per il metodo di Igawa, MB=8% ed RMS=42%; per il metodo di Perez, MB=16% ed RMS=43%.

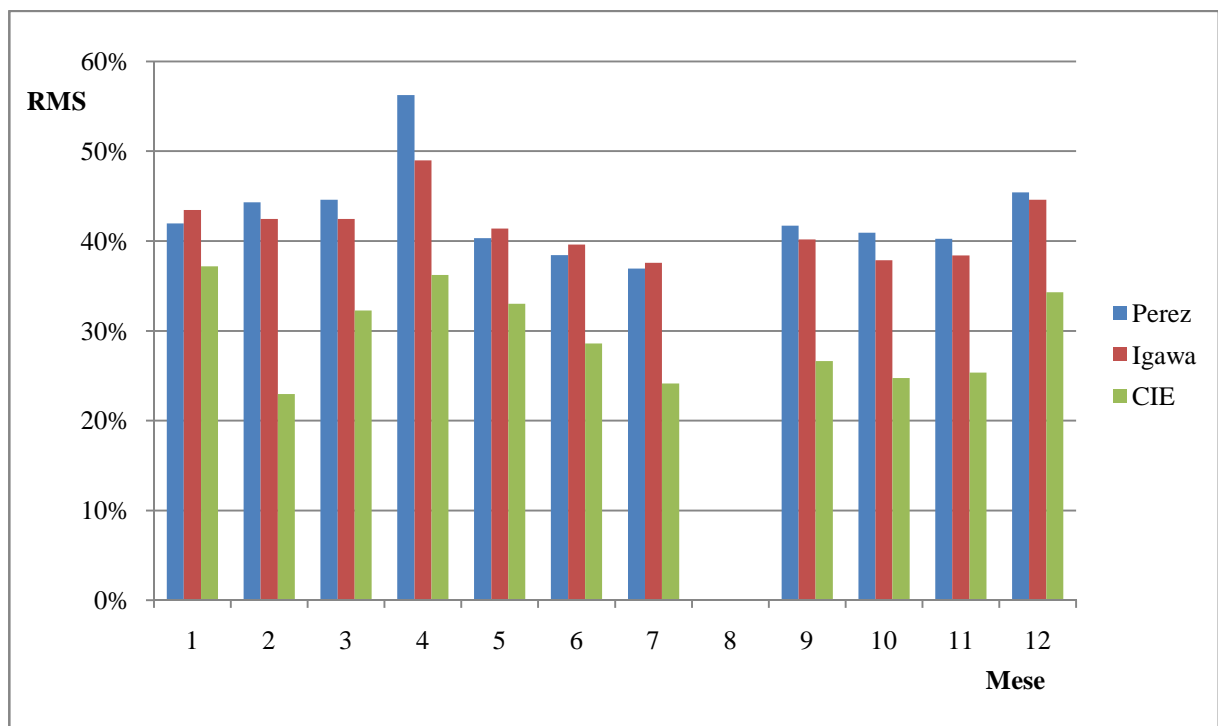
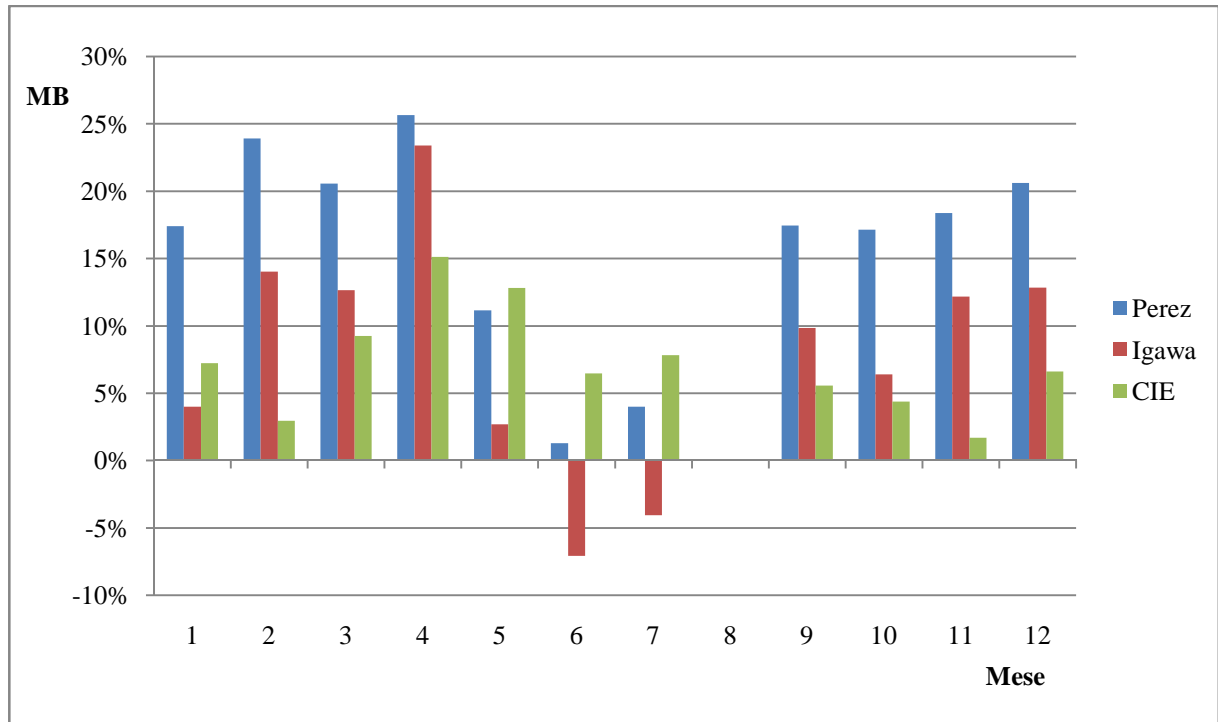
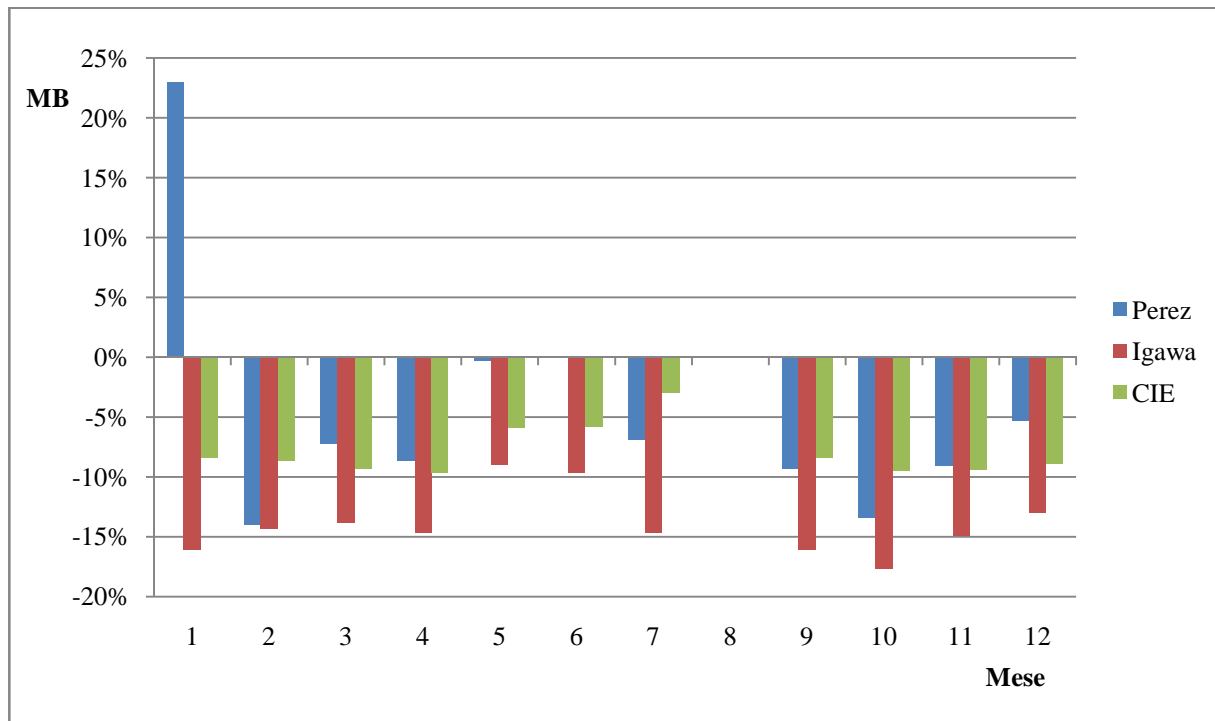


Fig.5.7 - Confronto tra le luminanze assolute calcolate e misurate ad Arcavacata di Rende (anno 2008 e 2011).

Tab.5.13 - Valori di MB e di RMS tra le luminanze calcolate e misurate, dati di Arcavacata di Rende (anno 2008 e 2011).

Modello	Luminanza assoluta		Luminanza relativa		Luminanza zenitale	
	MB	RMS	MB	RMS	MB	RMS
Perez	15.9	42.8	-3.7	35.6	19.9	45.7
Igawa	7.8	41.7	-13.9	36.1	23.1	46.3
CIE	7.4	29.8	-7.9	26	16.1	24.3

In Fig.5.8 lo stesso confronto è eseguito per le luminanze relative: questa volta gli MB più piccoli sono ottenuti, come ad Osaka, con il metodo CIE ed il modello di Perez e gli RMS più piccoli con il metodo CIE ed il modello di Igawa. I valori medi annuali (Tab.5.13) sono: per il metodo CIE, MB= -8% ed RMS=26%; per il metodo di Perez, MB= -4% ed RMS=36%; per il metodo di Igawa, MB= -14% ed RMS=36%.



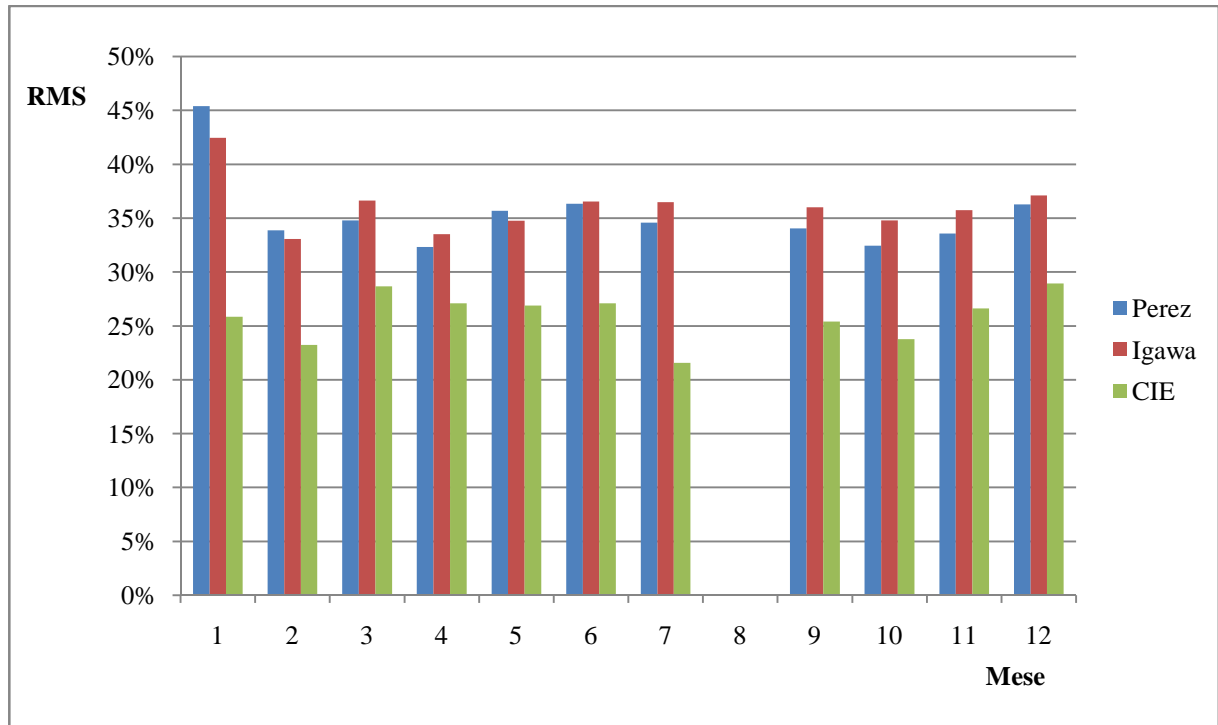


Fig.5.8 - Confronto tra le luminanze relative calcolate e misurate ad Arcavacata di Rende (anno 2008 e 2011).

In Fig.5.9 è mostrato il confronto tra le luminanze zenitali calcolate e misurate: i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo CIE; al secondo posto viene il modello di Igawa e al terzo il metodo di Perez; i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE. I valori medi annuali (Tab.5.13) sono: per il metodo CIE, MB=16% ed RMS=24%; per il metodo di Igawa, MB=23% ed RMS=46%; per il metodo di Perez, MB=20% ed RMS=46%.

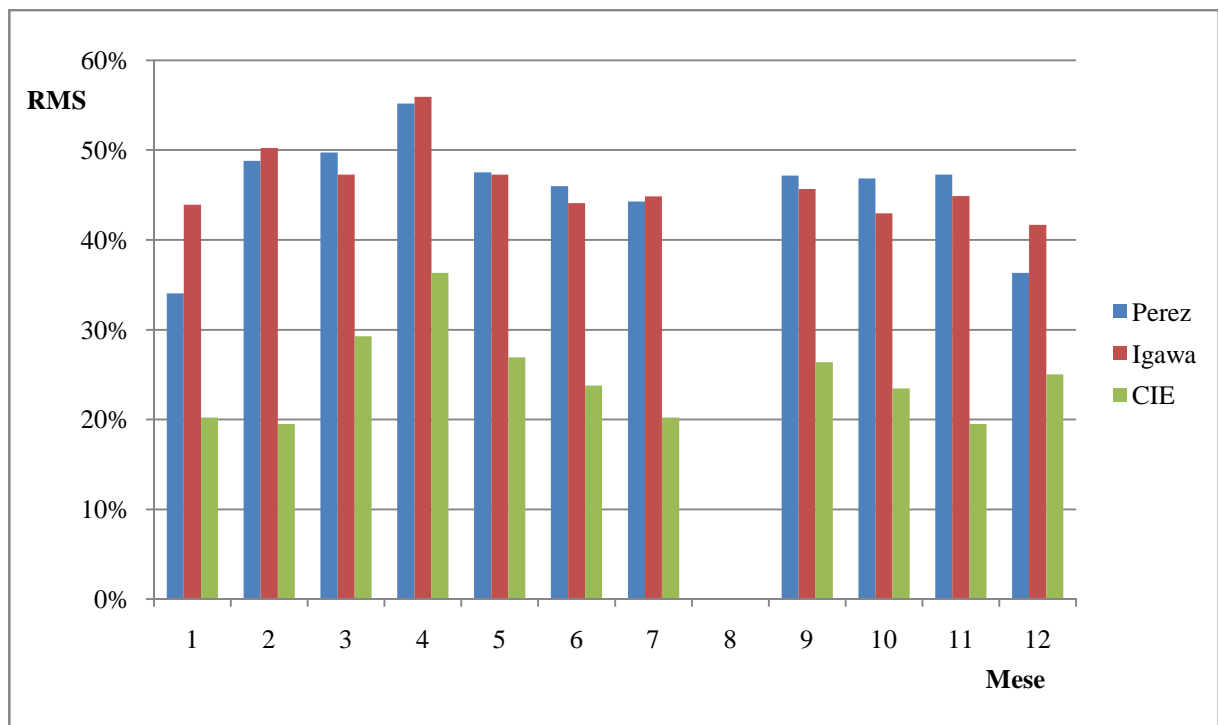
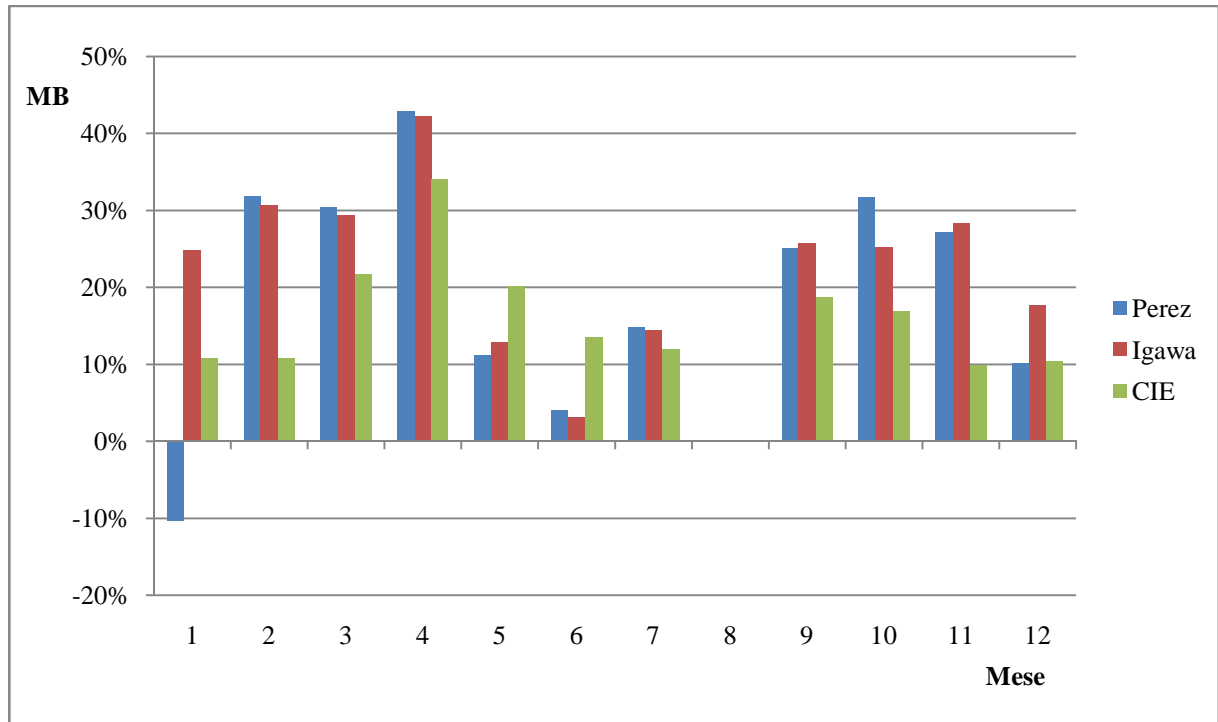


Fig.5.9 - Confronto tra le luminanze zenitali calcolate e misurate ad Arcavacata di Rende (anno 2008 e 2011).

A causa della compensazione degli errori per il calcolo della luminanza relativa e della luminanza sperimentale, le luminanze assolute sono predette meglio dal metodo di Igawa rispetto al metodo di Perez. Il metodo CIE presenta sempre, anche per i dati di Arcavacata, gli errori minimi, ma il suo impiego è limitato da quanto già precedentemente detto.

5.6 Confronto dati misurati corretti e non corretti – dati calcolati.

Nel capitolo 3 si è accennato alla necessità di correggere i dati misurati dallo Sky Scanner al fine di garantire uguaglianza tra il valore dell'illuminamento sul piano orizzontale ottenuto per integrazione della luminanza sulla volta celeste ed il valore dell'illuminamento diffuso orizzontale E_{vd} misurato per mezzo di fotometri. Nel caso in cui non di disponesse dei valori misurati di E_{vd} , si assume un fattore correttivo eguale ad 1. In tal caso il valore di E_{vd} da utilizzare nel modello CIE è pari al valore ottenuto per integrazione delle luminanze:

$$E_{vd} = \sum_i L_p \cdot P_i \quad (5.4)$$

In questo capitolo si mostra il paragone con i modelli considerando i dati non corretti.

I valori di MB ottenuti con le luminanze non corrette possono essere corretti, in modo da dare valori vicini a quelli ottenibili nel caso di correzione dei valori di luminanza, con la formula approssimata (5.5):

$$MB_c = \left[\left(\frac{MB}{100} + 1 \right) \frac{f_{cr}}{f_{cr} - 1} \right] \cdot 100 \quad (5.5)$$

dove MB_c rappresenta l'errore medio corretto, f_{cr} il fattore correttivo medio della radianza ed f_{cl} il fattore correttivo medio della luminanza. Questa correzione può essere eseguita sia su base mensile che su base annuale.

Il valore di RMS_c è invece ottenibile con la formula approssimata (5.6):

$$RMS_c = 100 \cdot \sqrt{\left(\frac{f_{cr}}{f_{cl}} \right)^2 \left[\left(\frac{RMS}{100} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{MB}{100} + 1 \right) - 1 \right] - 2 \cdot \left(\frac{f_{cr}}{f_{cl}} \right) \left(\frac{MB}{100} + 1 \right) + 1} \quad (5.6)$$

La Fig.5.10 mostra il confronto tra i valori mensili di MB e di RMS tra i dati di Osaka calcolati con il modello di Igawa e i dati sperimentali di luminanza corretti e non corretti. Si osserva come gli errori ottenuti con le luminanze corrette siano minori rispetto al caso di uso delle luminanze non corrette: i valori medi annuali risultano MB= -1.8% ed RMS=27% per le luminanze corrette ed MB=12% ed RMS=31% per le luminanze non corrette.

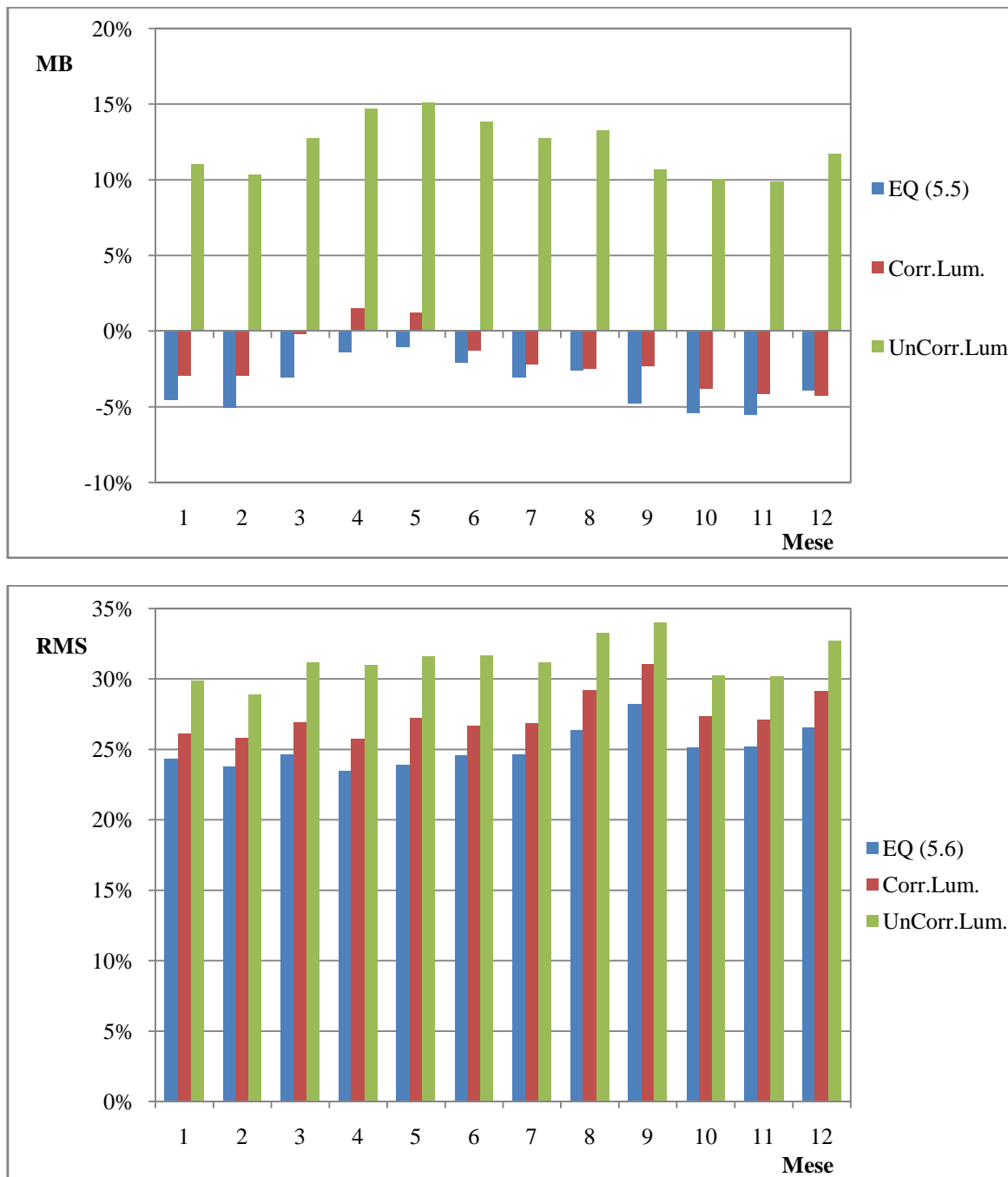


Fig.5.10 – Errori tra il modello di Igawa ed i dati di luminanza corretta e non corretta rilevati ad Osaka.

Nella stessa Fig.5.10 sono riportati anche i valori medi mensili di MB ed RMS ottenuti applicando le equazioni (5.5) e (5.6). La figura dimostra la buona attendibilità del metodo di correzione proposto. Inserendo nell'equazione (5.5) i valori medi annuali $MB=12\%$, $f_{cr}=1.019$, $f_{cl}=1.185$, si ottiene $MB_c\%=-3.7$, prossimo al valore medio annuale esatto di -1.8% . Inserendo nell'equazione (5.6) i valori $MB=12\%$ ed $RMS=31\%$, si ottiene $RMS_c=24.8\%$, prossimo al valore esatto di 27% .

La Fig.5.11 mostra il confronto tra i valori mensili di MB e di RMS tra i dati di Osaka calcolati con il modello di Perez e i dati sperimentali di luminanza corretti e non corretti. Si osserva ancora come gli errori ottenuti con le luminanze corrette siano minori rispetto al caso delle luminanze non corrette: i valori medi annuali risultano $MB=3.8\%$ ed $RMS=27.8\%$ per le luminanze corrette ed $MB=19.4\%$ ed $RMS=35.3\%$ per le luminanze non corrette. Inserendo nell'equazione (5.5) il valore medio annuale $MB=35.3\%$, $f_{cr}=1.019$, si ottiene $MB_c=2.7\%$, prossimo al valore medio annuale esatto dell' 3.8% . Mediante l'equazione (5.6) si ottiene in questo caso $RMS_c=25.5\%$, non lontano dal valore esatto di 27.8% . Nella stessa Fig.5.22 sono riportati i valori mensili di MB e RMS ottenuti con le formule approssimate (5.5) e (5.6). Viene confermato quanto sopra citato.

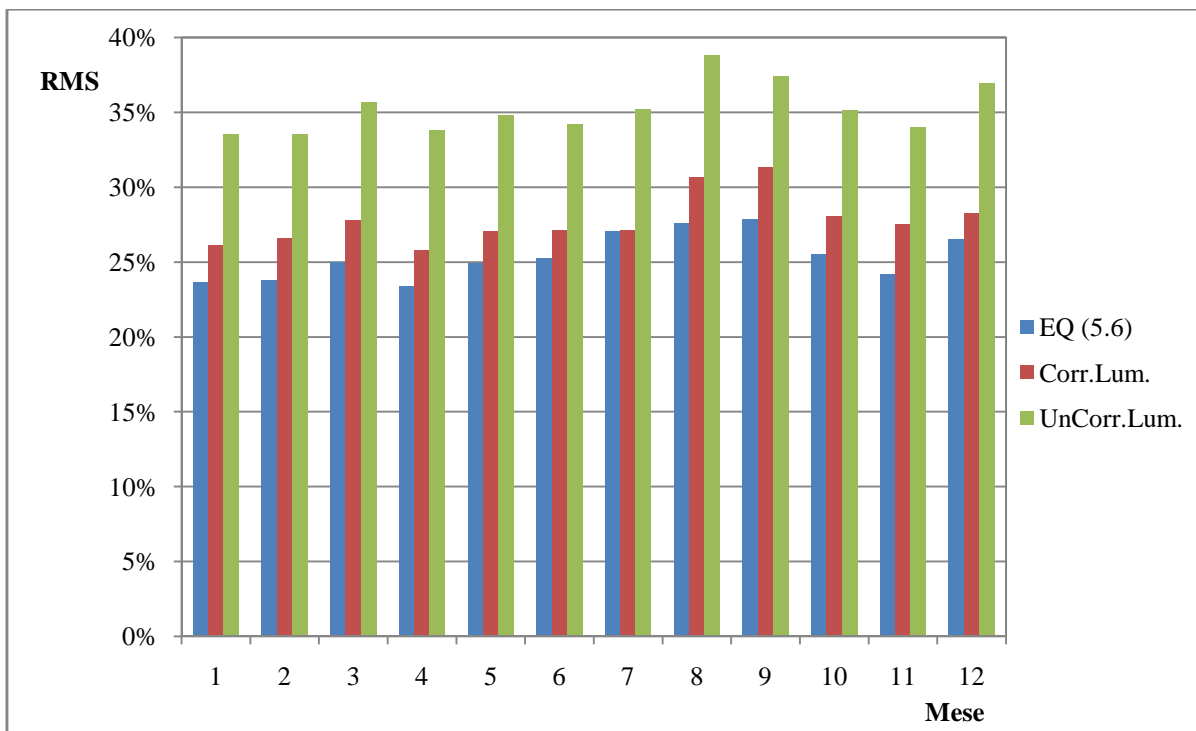
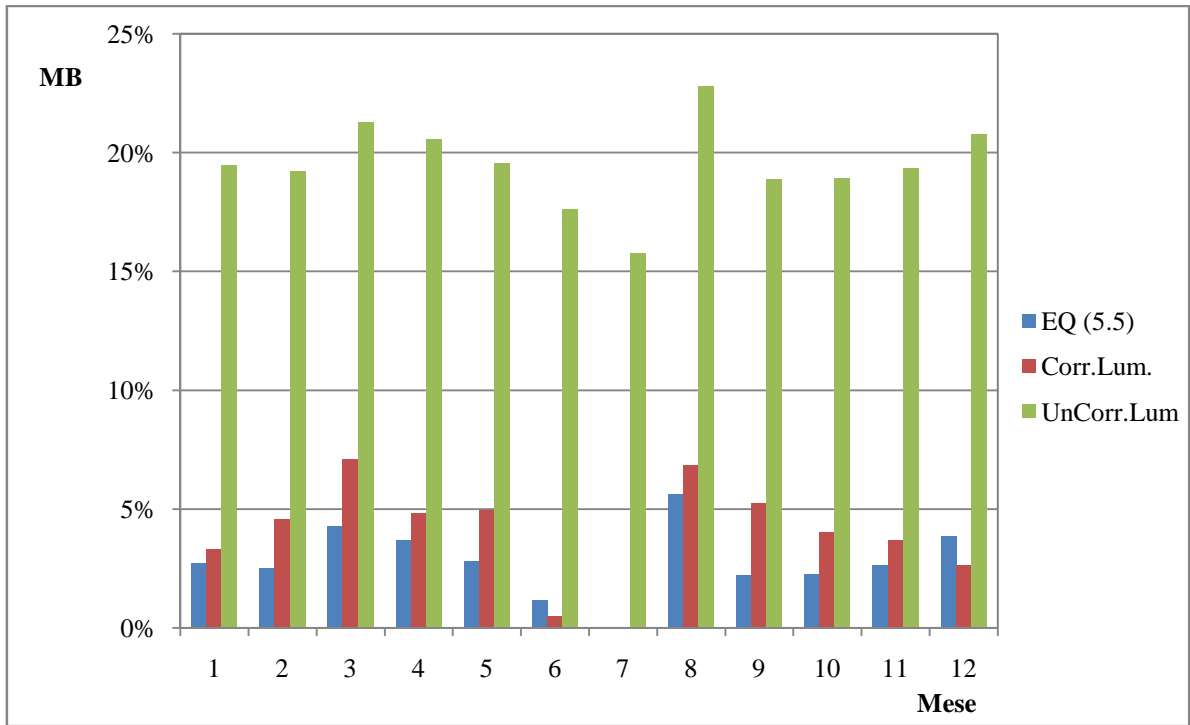


Fig.5.11 - Errori tra il modello di Perez ed i dati di luminanza corretta e non corretta rilevati ad Osaka.

6. RICERCA DEL TIPO DI CIELO CIE.

La distribuzione di luminanza del cielo, come si è già visto nei capitoli precedenti, è calcolabile per mezzo di differenti modelli. Questi modelli utilizzano diversi parametri al fine di classificare le varie condizioni del cielo. Nel metodo di Perez, il tipo di cielo, tra gli 8 possibili è individuato dall'indice di serenità (ϵ) e dalla brillantezza del cielo (Δ), mentre nel modello di Igawa il tipo di cielo varia in modo continuo al variare dell'indice di cielo sereno (K_c) e dell'indice di non nuvolosità (C_{le}). Nel modello CIE, invece, sono utilizzate la funzione gradiente e la funzione indicatrice per classificare le condizioni del cielo in 15 categorie, precedentemente proposte da Kittler et al. (1997). Risulta quindi necessario affrontare lo studio di tali funzioni. Accanto alle due funzioni sopra menzionate esistono anche altri due metodi attraverso i quali è possibile studiare il tipo di cielo che caratterizza una data giornata: il rapporto L_z/D_v ed il metodo di Tregenza. In questo capitolo saranno analizzati i tre metodi di calcolo del tipo di cielo CIE e confrontati i risultati derivanti dalla loro applicazione.

6.1 Funzione indicatrice e funzione gradiente.

6.1.1 Funzione indicatrice.

La funzione indicatrice lega la luminanza relativa di un elemento di cielo alla distanza angolare tra l'elemento di cielo ed il sole. Essa tiene conto anche della torbidità dell'atmosfera e descrive la dispersione dei raggi solari. Sotto le condizioni di cielo densamente coperto, la diffusione dei raggi solari è molto alta e la funzione indicatrice relativa risulta essere uguale in tutte le direzioni con un valore pari a l'unità. Sotto le condizioni di cielo coperto la luce diretta del sole è assente così come qualsiasi irregolarità azimutale nella distribuzione di luminanza. La funzione indicatrice unitaria esprime l'assoluta uniformità di dispersione dei raggi solari nell'atmosfera ed, in tali condizioni, il solido corrispondente ad una luminanza fittizia è una sfera e la sua sezione, chiamata indicatrice, è un cerchio di raggio unitario se esprime l'indicatrice relativa normalizzata rispetto alla luminanza perpendicolare ai raggi del sole.

Più sottile è la massa d'aria o più basse sono la copertura e la torbidità dell'atmosfera, meno profonda è la direzione obliqua della luminanza diffusa e più estesa e relativamente alta è la

luminanza intorno al raggio del sole. Questo comporta un graduale prolungamento della indicatrice nella direzione in avanti del flusso della luce solare. Così la sfera si distorce in una “pera” con una coda allungata. Questa trasformazione può essere modellata con la seguente formula esponenziale [14]:

$$f(\chi) = 1 + c \left[\exp(d\chi) - \exp\left(d \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cos^2 \chi \quad (6.1)$$

dove:

- i parametri c , d ed e per il set standard sono definiti in Fig.6.1;
- χ rappresenta la distanza angolare tra un arbitrario elemento di cielo e la posizione del sole, calcolabile con la seguente formula:

$$\cos \chi = \cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos A_z \quad (6.2)$$

dove:

- Z_s rappresenta l'angolo zenitale solare;
- Z rappresenta l'angolo zenitale di un punto P del cielo;
- A_z è pari a: $A_z = |\alpha_p - \alpha_s|$

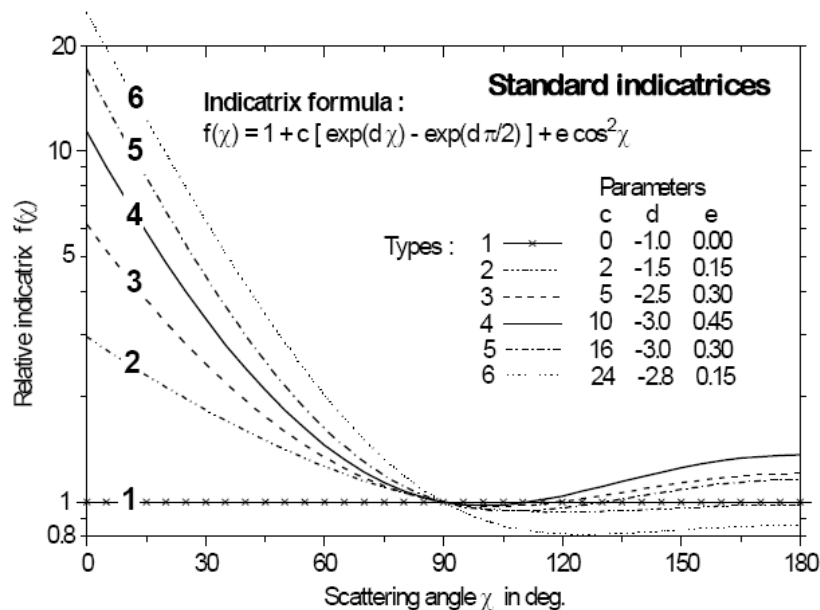


Fig.6.1- Funzione indicatrice standard formula, parametri e profilo.

La funzione indicatrice relativa per un dato “almucantar” (insieme dei punti della volta celeste aventi la stessa altezza angolare) può essere calcolata con la relazione (6.3):

$$f(\chi) = \frac{L(\chi)}{L(90^\circ)} \quad (6.3)$$

dove:

- $L(\chi)$ rappresenta la luminanza dell'elemento di cielo con distanza angolare χ dal sole,
- $L(90^\circ)$ rappresenta la luminanza normalizzata, la luminanza di un elemento di cielo con distanza angolare $\chi = 90^\circ$ dal sole.

In Fig.6.2 sono rappresentati gli angoli e gli elementi che definiscono la funzione indicatrice.

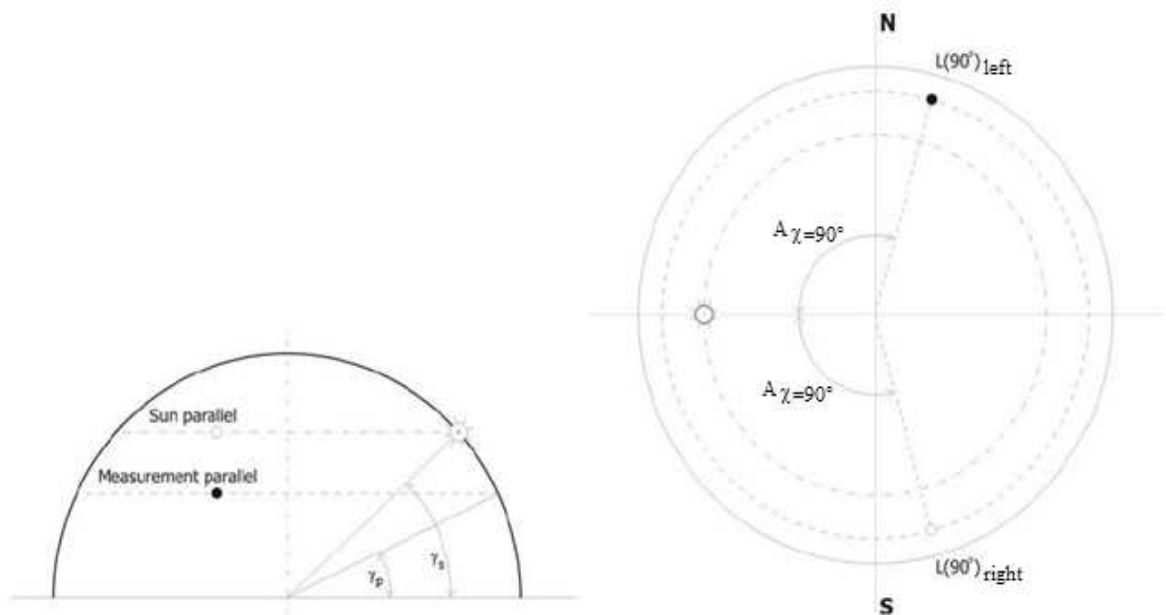


Fig.6.2- Geometria di un emisfero di cielo e luminanza normalizzata.

Come mostra la Fig.6.2, i punti aventi distanza angolare 90° dal sole sono due, il primo a sinistra del sole, il secondo a destra. Questo comporta uno studio della funzione indicatrice per i due punti:

$$f(\chi)_{left} = \frac{L(\chi)_{left}}{L(90^\circ)_{left}} \quad f(\chi)_{right} = \frac{L(\chi)_{right}}{L(90^\circ)_{right}} \quad (6.4)$$

Calcolata la funzione indicatrice relativa per tutti gli elementi di cielo, è possibile plottare i risultati su un diagramma e confrontarli con le curve standard.

6.1.2 Funzione gradiente.

La funzione gradiente lega la luminanza di un elemento di cielo con il suo angolo zenitale. Per cieli coperti c'è un tipico dislivello della luminanza dallo zenit all'orizzonte (Fig.6.3 (a)). Per un cielo uniforme, come dice il nome stesso, si ha una luminanza costante per tutto l'emisfero (Fig.6.3 (b)). Infine, esistono i cieli sereni per i quali la luminanza è in aumento dallo zenit all'orizzonte (Fig.6.3 (c)).

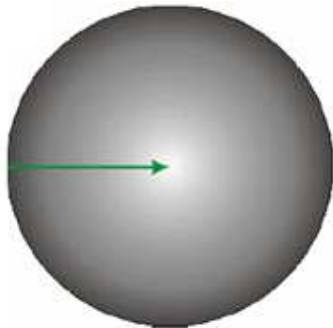


Fig. 6.3 (a)
“Gradation” per cielo coperto.

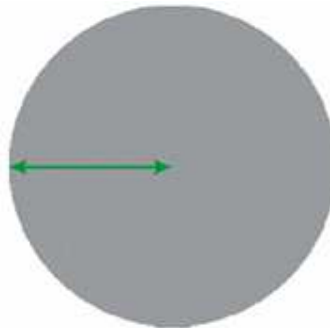


Fig. 6.3 (b)
“Gradation” per cielo uniforme.

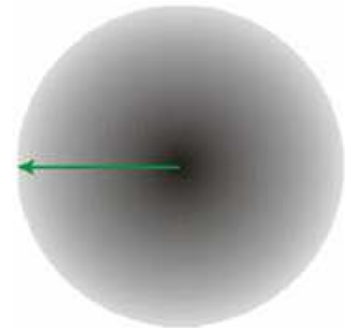


Fig. 6.3 (c)
“Gradation” per cielo sereno.

Quando si separa l'influenza della funzione gradiente dalla funzione indicatrice nella distribuzione di luminanza, possono essere individuate quelle direzioni, misurate nella volta celeste, per le quali il valore dell'angolo di scattering χ e il valore della indicatrice $f(\chi)$ sono costanti. I punti del cielo con la stessa distanza angolare dal sole formano un'insieme di cerchi aventi direzione perpendicolare al raggio del sole (Fig.6.4, Fig.6.5) [15].

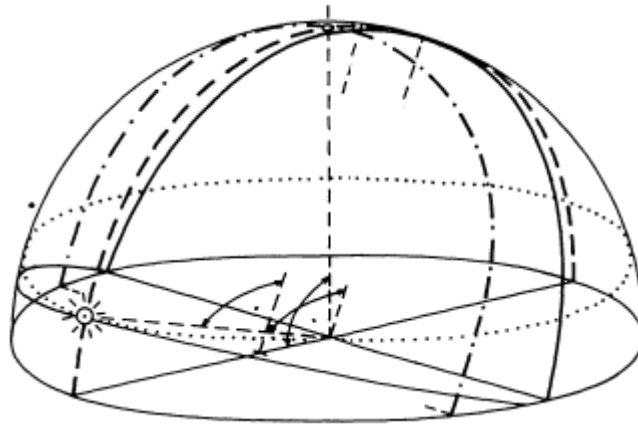


Fig.6.4 – Rappresentazione assometrica di un emisfero del cielo con importanti cerchi “traccia”.

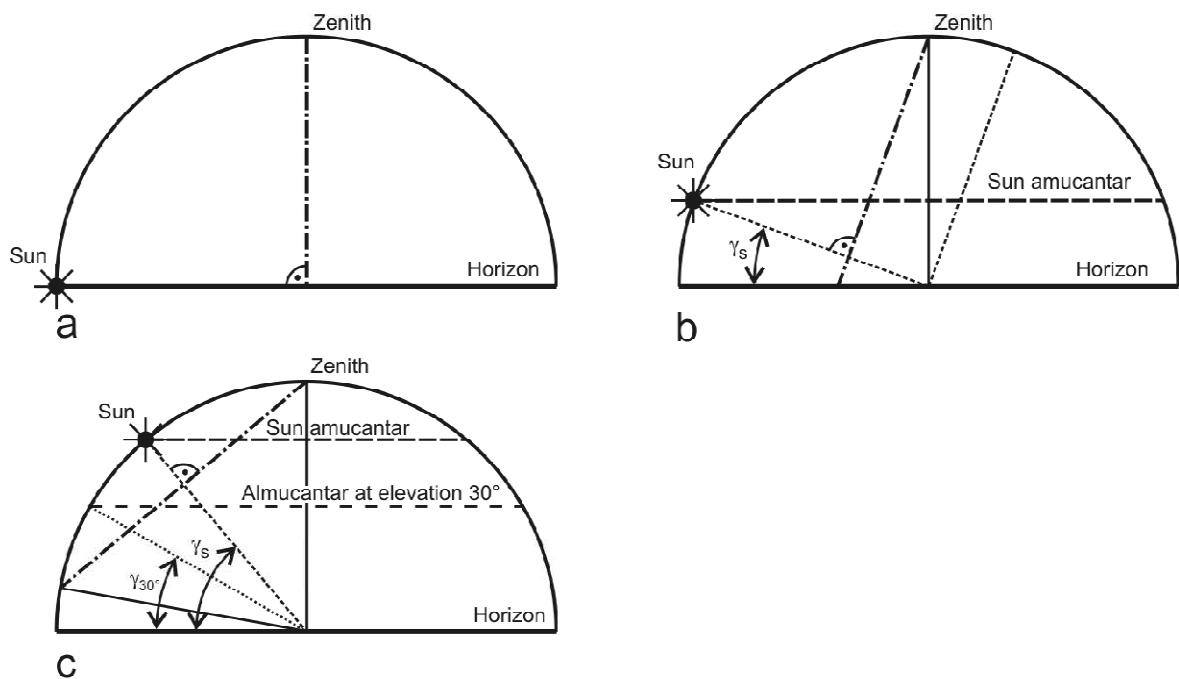


Fig.6.5 – Esempi di cerchi della volta celeste per la misura della funzione indicatrice (tratteggiata) e la funzione gradiente (tratto-punto) per una specifica posizione del sole:

- a. Caso in cui il sole sia all'orizzonte.
- b. Caso in cui si abbia il più alto valore di indicatrice e gradiente.
- c. Caso di una generica posizione del sole e di un almucantar di altezza 30° .

La funzione gradiente relativa può essere modellata con la seguente formula (6.5) [16]:

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)} = \frac{1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right)}{1 + a \cdot \exp(b)} \quad (6.5)$$

dove:

- i parametri a e b per il set standard sono definiti in Fig.6.6;
- Z rappresenta l'angolo zenitale di un punto P del cielo.

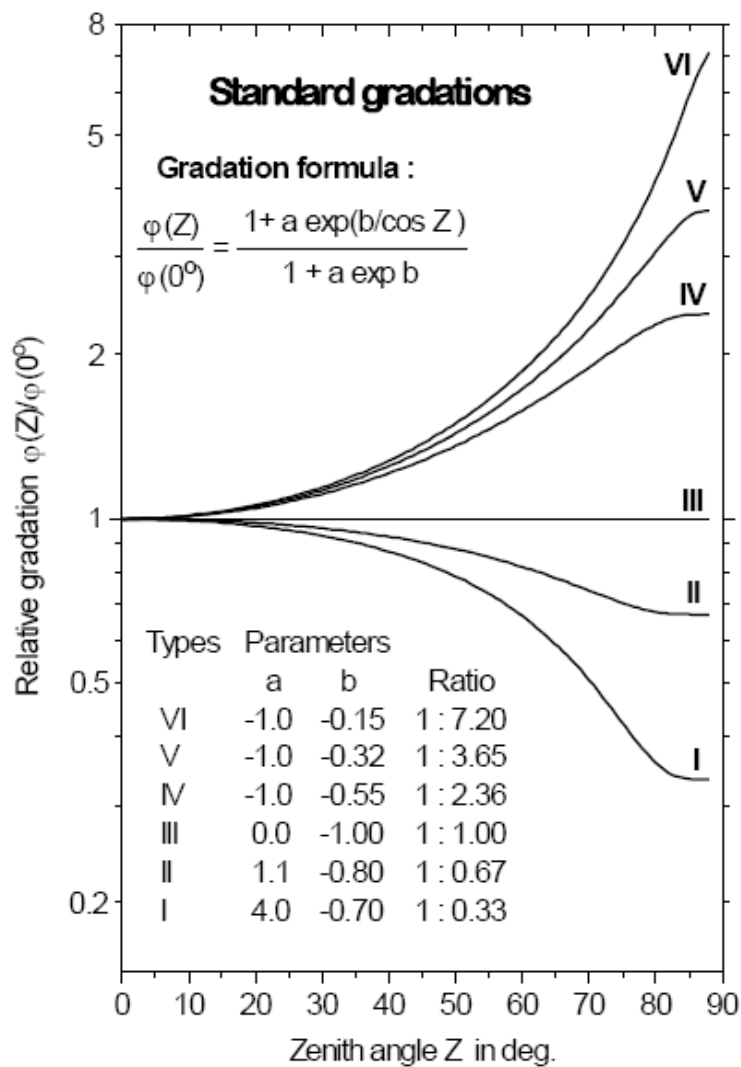


Fig.6.6- Funzione gradiente standard formula, parametri e profilo.

Se nel calcolo della luminanza relativa si include la luminanza zenitale, affinché sia possibile calcolare la funzione gradiente relativa, è necessario che la distanza angolare degli elementi di cielo sia pari alla distanza tra il sole e lo zenit (equazione (6.6)). Questo porta ad individuare quei punti che, su ogni almucantar, hanno distanza angolare dal sole pari a Z_s (angolo zenitale del sole). Poiché, su ogni almucantar, esiste un numero limitato di elementi di cielo ed è impossibile trovarne uno con esatta distanza angolare Z_s dal sole, è necessario fare una interpolazione tra i due punti che hanno angolo zenitale prossimo al valore di Z_s .

La luminanza relativa di un elemento di cielo è definita dalla seguente formula (6.6):

$$L_r = \frac{L_i}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} \quad (6.6)$$

Per valutare la funzione gradiente relativa è necessario che $\frac{f(\chi)}{f(Z_s)} = 1$, perciò $\chi = Z_s$.

L'angolo χ è calcolato con la formula (6.7):

$$\cos \chi = \cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos A_z \quad (6.7)$$

Sostituendo si ottiene la seguente relazione:

$$\cos Z_s = \cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos A_z \quad (6.8)$$

$$A_z = |\alpha_p - \alpha_s| = \arccos\left(\frac{\cos Z_s - \cos Z_s \cos Z}{\sin Z_s \cos Z}\right) \quad (6.9)$$

$$\alpha_{p-left} = A_z + \alpha_s, \quad \alpha_{p-right} = -A_z + \alpha_s \quad (6.10)$$

La funzione gradiente relativa è calcolata con la formula (6.11):

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)}(left) = \frac{L_{i-left}}{L_z} \quad \frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)}(right) = \frac{L_{i-right}}{L_z} \quad (6.11)$$

dove:

- L_i rappresenta la luminanza sperimentale;
- L_z rappresenta la luminanza zenitale sperimentale.

Dopo aver calcolato la funzione gradiente per tutti gli almucantar, è possibile plottare i risultati su un grafico e confrontarli con le curve standard.

6.1.3 Confronto indicatrice-gradiente calcolati e standard.

La CIE propone sei tipi di funzione indicatrice e sei tipi di funzione gradiente, in totale quindi si hanno 36 combinazioni possibili di tipi di cielo, ma solo 15 di essi sono inclusi nel CIE Standard in quanto alcune combinazioni di indicatrice e gradiente sono estremamente rare (Tab.6.1)

Tab.6.1 – Matrice con le combinazioni di indicatrice e gradiente per i 15 tipi di cielo CIE.

		Gradation					
		I	II	III	IV	V	VI
Indicatrix	1	1	3	5	9	9	9
	2	2	4	6	9	9	9
	3	2	7	7	10	10	12
	4	8	8	8	11	12	14
	5	8	8	8	11	13	14
	6	8	8	8	13	13	15

L'analisi delle funzioni indicatrice e gradiente, consiste nel calcolare le funzioni stesse applicando quanto descritto nei paragrafi 6.1.1 e 6.1.2, confrontarle con le funzioni standard, individuare il gruppo di appartenenza di ognuna di esse e ricavare, dalla combinazione, il tipo di cielo.

Il primo passo, quindi, è quello di calcolare la funzione indicatrice e la funzione gradiente per ogni distribuzione. Tale calcolo è stato sviluppato per mezzo del software “MATLAB” e la procedura utilizzata è di seguito riportata:

```
clear all; close all; clc;
elements= load('sky elements.txt');
skyElementsNEW= load('sky elements NEW.txt');
Luminance = load('Lprova.txt');
solarcoordinate= load('solarcoordinate.txt');
almucantar = load('almucantar.txt');
type_IND = load('type_IND.txt');
type_GRAD = load('type_GRAD.txt');
CHI = load('chi.txt');
Zen = load('Z.txt');

i=find(solarcoordinate(:,4)<6); % eliminazione dei punti con altezza
solare minore di 6°
solarcoordinate(i,:)=[];

[LuminanceNEW,distanceangle,chi,indicatrix,Lsolaralmuc]=month(solarcoordinate,Luminance,skyElementsNEW,elements)
[abs,point,Lpointexact,L,gradation]=grad(LuminanceNEW,almucantar,solarcoordinate,skyElementsNEW)
```

Il codice è stato implementato seguendo lo schema riportato nella Fig.6.7.

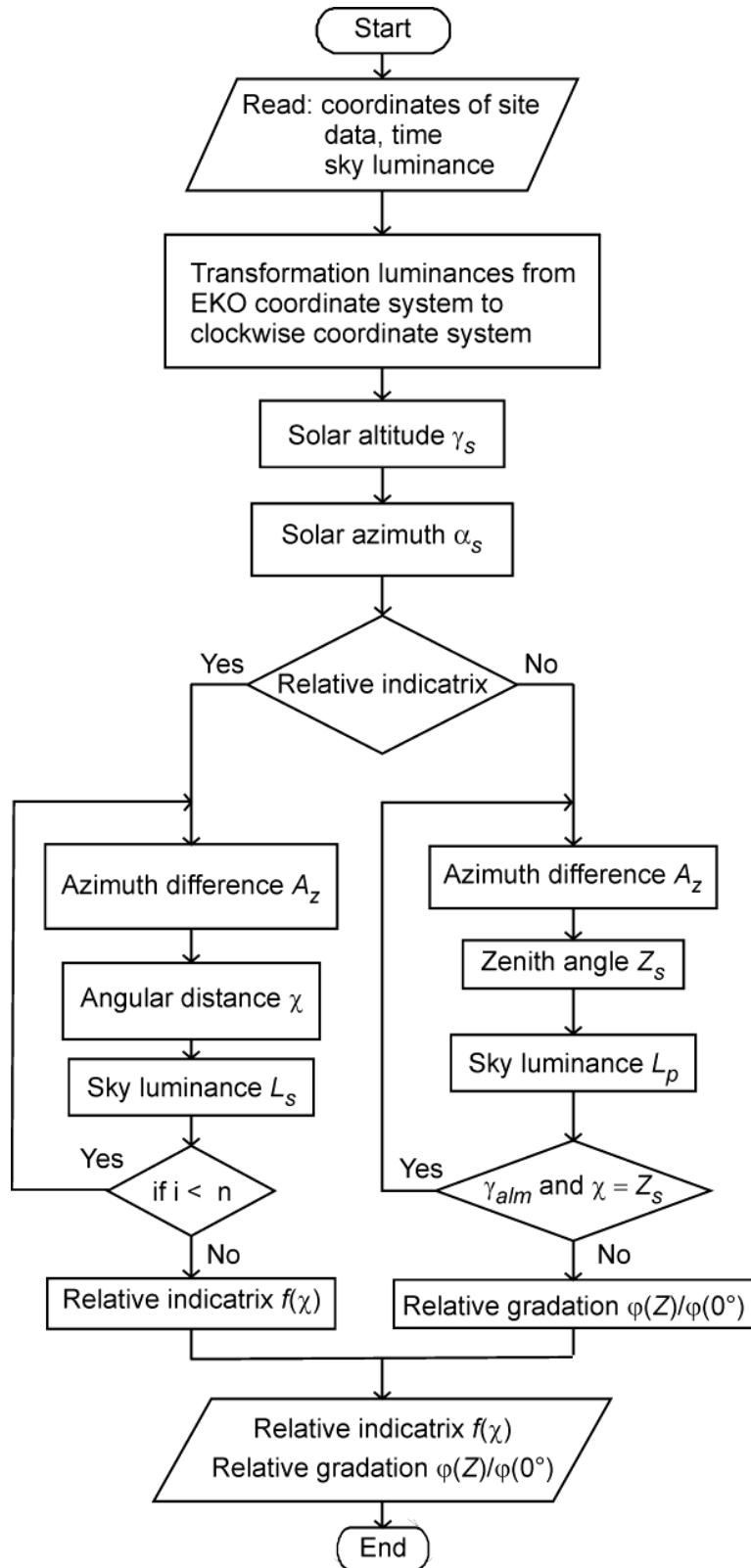


Fig.6.7 – Schema di calcolo della funzione indicatrice e della funzione gradiente.

Spiegazione del codice:

- CALCOLO FUNZIONE INDICATRICE.

Per una più semplice implementazione del codice è necessario modificare il sistema di riferimento dei punti rilevati dallo sky scanner. In Fig.6.8 è fornita la sequenza di scansione dello Sky Scanner EKO.

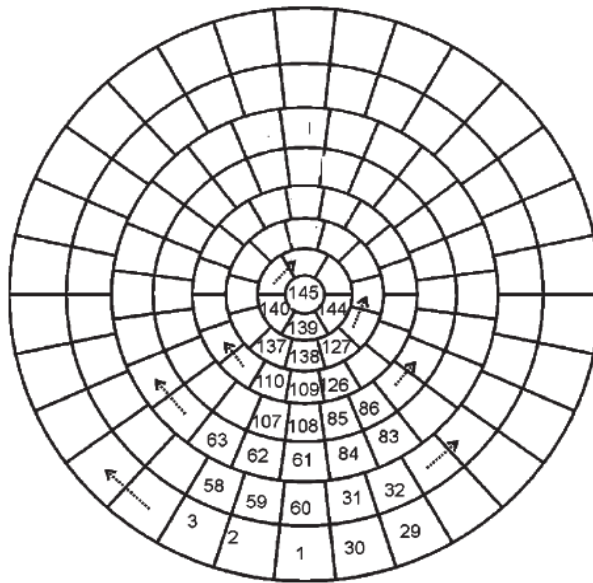


Fig.6.8- Sequenza di scansione (da sud).

In Fig.6.9 è fornita la nuova sequenza di scansione dei dati.

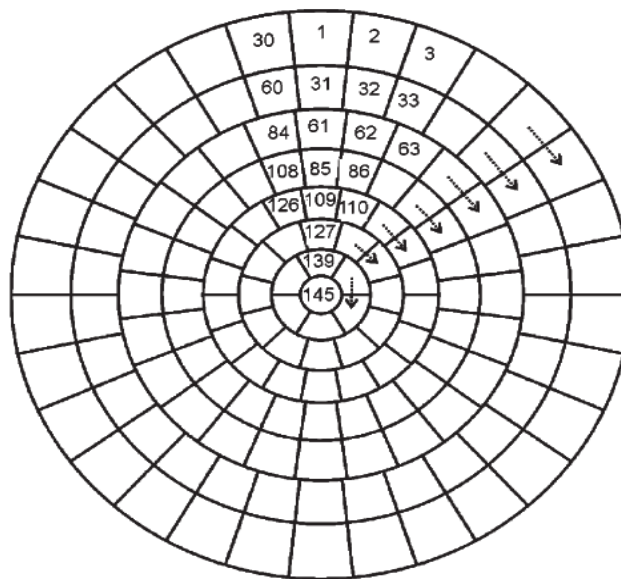


Fig.6.9 – Nuova sequenza di scansione (da nord).

Questo nuovo sistema di riferimento richiede una modifica sui dati di luminanza sperimentali. Ad esempio, nel sistema di riferimento EKO il valore di luminanza $L^{EKO}(16)$ del punto sedicesimo è localizzato, dopo la conversione, nella posizione 1, così è valida la relazione $L^N(1)=L^{EKO}(16)$ dove $L^N(1)$ è la luminanza del primo punto del nuovo sistema di riferimento (la sostituzione è sviluppata tramite il sottocodice “L_NEWmonth” vedi APPENDICE 1.1). Questa modifica implica una variazione anche degli azimut dei 145 punti del cielo (nell’implementazione del codice “solarcoordinate” indica le coordinate solari e “skyElementsNEW” rappresenta i nuovi azimut del cielo di Tregenza calcolati rispetto al nuovo sistema di riferimento).

I passi successivi prevedono il calcolo dell’angolo A_z , dell’angolo χ e della funzione indicatrice (calcolata per ogni almucantar con angoli di 6° , 18° , 30° , 42° , 54° e 66°). I relativi sottocodici utilizzati sono riportati nell’APPENDICE 1.2, 1.3, 1.4.

L’ultimo passo è quello di calcolare la funzione indicatrice sull’almucantar solare. Le luminanze su tale almucantar non sono definite, esse, quindi, dipenderanno dall’interpolazione dei valori di luminanza nei quali l’altezza solare è collocata (Fig.6.10). Il range azimutale $0-360^\circ$ è diviso in steps di 15° , per ognuno di questi valori è calcolata la luminanza nel punto 1 (relativo all’almucantar inferiore) e nel punto 2 (relativo all’almucantar superiore) (Fig.6.10). La funzione di MATLAB “interp1” (interpolazione lineare) permetterà di determinare la luminanza sull’almucantar solare per un dato azimut. La luminanza dell’almucantar solare in ogni punto sarà calcolata con la formula (6.12):

$$L_{solar\ almucantar\ point1} = \frac{(\gamma_s - \gamma_{almucantar1})}{(\gamma_{almucantar2} - \gamma_{almucantar1})} \cdot (L_2 - L_1) + L_1 \quad (6.12)$$

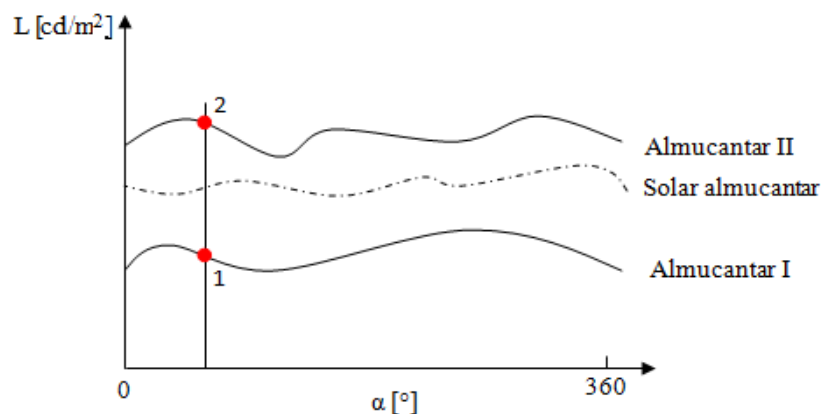


Fig.6.10 – Interpolazione per calcolare la luminanza sull’almucantar solare.

Il sottocodice è riportato nell'APPENDICE 1.5.

- CALCOLO FUNZIONE GRADIENTE.

Il primo passo è quello di calcolare l'angolo azimutale A_z (vedi APPENDICE 1.6). I risultati, per ogni distribuzione, riportano due valori di angolo azimutale A_z in quanto, per ogni almucantar, esistono due punti (uno a destra e l'altro a sinistra del sole) aventi distanza angolare dal sole pari a Z_s . Si passa poi al calcolo dell'angolo azimutale dei due punti con distanza angolare pari a Z_s (APPENDICE 1.7) e alla luminanza di ognuno di questi punti. Le luminanze dei ricercati α_p non sono definite, quindi è necessario interpolare le luminanze dei due punti, per ogni almucantar, dove il calcolato α_p è collocato (Fig.6.11). La luminanza è calcolata con la seguente formula (6.13):

$$L(\alpha_{p-left}) = \frac{\alpha_{p-left} - \alpha_{p2}}{\alpha_{p1} - \alpha_{p2}} \cdot (L(\alpha_{p1}) - L(\alpha_{p2})) + L(\alpha_{p2}) \quad (6.13)$$

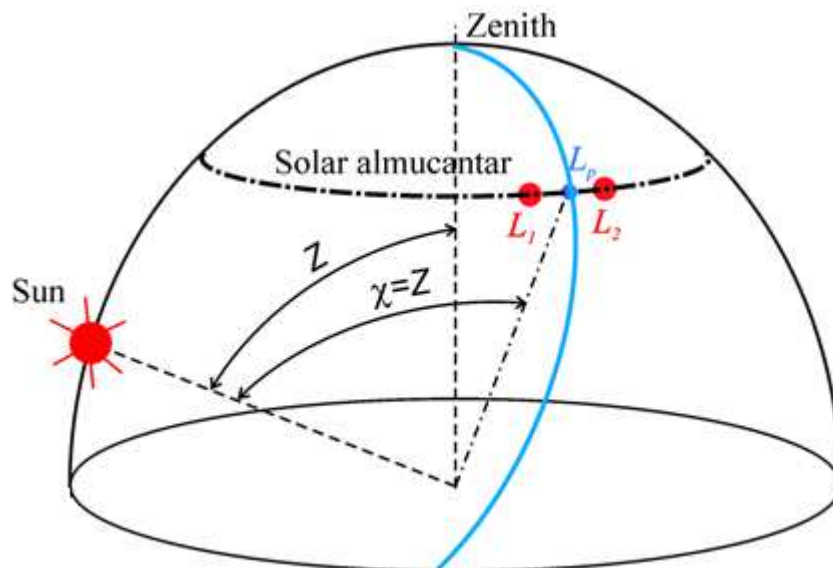


Fig.6.11 – Interpolazione per calcolare la luminanza dell' α_p trovato.

Esempio di calcolo

- Almicantar 6°:

$$\alpha_p \text{ misurato: } \alpha_{p\text{-left}} = 219.25^\circ$$

$$\alpha_p \text{ almicantar: } \alpha_{p1} = 216^\circ, \alpha_{p2} = 228^\circ$$

$$L(\alpha_{p1}) = 5034.927 \text{ cd/m}^2, L(\alpha_{p2}) = 4165.802 \text{ cd/m}^2$$

$$L(\alpha_{p\text{-left}}) = 4799 \text{ cd/m}^2$$

Quanto detto è calcolato per mezzo del sottocodice riportato nell'APPENDICE 1.8.

Infine vengono determinati i punti che stanno a destra e sinistra del sole (APPENDICE 1.9) e quindi calcolata la funzione gradiente (APPENDICE 1.10).

Calcolate per ogni distribuzione la funzione indicatrice e la funzione gradiente, si costruiscono le curve standard (APPENDICE 1.11, 1.12) con le quali i dati calcolati saranno confrontati. Per ogni valore di funzione indicatrice e funzione gradiente viene calcolato il valore dell'RMS rispetto ai gruppi standard:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\frac{V_{calc,i} - V_{standard,i}}{V_{standard,i}} \right)^2}{n}} \quad (6.14)$$

dove:

- V_{calc} rappresenta il valore della funzione indicatrice calcolato per un particolare angolo χ o il valore della funzione gradiente per un particolare angolo Z ;
- $V_{standard}$ rappresenta il valore della funzione indicatrice standard o della funzione gradiente standard;
- n è il numero totale di indicatrici o gradienti per una particolare ora.

Nella seguente matrice è fornito il risultato dell'equazione (6.14) per la funzione indicatrice:

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{f(\chi_1) - f(\chi_1)_{stan1}}{f(\chi_1)_{stan1}}\right)^2 & \left(\frac{f(\chi_1) - f(\chi_1)_{stan2}}{f(\chi_1)_{stan2}}\right)^2 & \dots & \left(\frac{f(\chi_1) - f(\chi_1)_{stan6}}{f(\chi_1)_{stan6}}\right)^2 \\ \left(\frac{f(\chi_2) - f(\chi_2)_{stan1}}{f(\chi_2)_{stan1}}\right)^2 & \left(\frac{f(\chi_2) - f(\chi_2)_{stan2}}{f(\chi_2)_{stan2}}\right)^2 & \dots & \left(\frac{f(\chi_2) - f(\chi_2)_{stan6}}{f(\chi_2)_{stan6}}\right)^2 \\ \vdots & & & \\ \left(\frac{f(\chi_n) - f(\chi_n)_{stan1}}{f(\chi_n)_{stan1}}\right)^2 & \left(\frac{f(\chi_n) - f(\chi_n)_{stan2}}{f(\chi_n)_{stan2}}\right)^2 & \dots & \left(\frac{f(\chi_n) - f(\chi_n)_{stan6}}{f(\chi_n)_{stan6}}\right)^2 \end{vmatrix}$$

Il valore dell'RMS è rappresentato della matrice seguente:

$$\left| \sqrt{\frac{\text{sum of first culumn}}{n}} \quad \sqrt{\frac{\text{sum of second culumn}}{n}} \quad \dots \quad \sqrt{\frac{\text{sum of sixth culumn}}{n}} \right|$$

La valutazione del gruppo indicatrice/gradiente sarà definito dal valore minimo della matrice RMS (APPENDICE 1.13, 1.14).

Di seguito vengono riportati degli esempi di calcolo della funzione indicatrice e della funzione gradiente e quindi la valutazione del tipo di cielo CIE. I giorni analizzati sono relativi alla città di Arcavacata di Rende (Lat=39°21'N, Long=16°13'E) dell'anno 2008 e sono: 14 febbraio (giorno sereno, Fig.6.12), 4 gennaio (giorno coperto, Fig.6.13), 16 gennaio (giorno intermedio, Fig.6.14).

Per ogni giorno i calcoli sono sviluppati per due differenti altezze solare, in modo da evidenziare che quando l'altezza solare è alta la funzione indicatrice è corta.

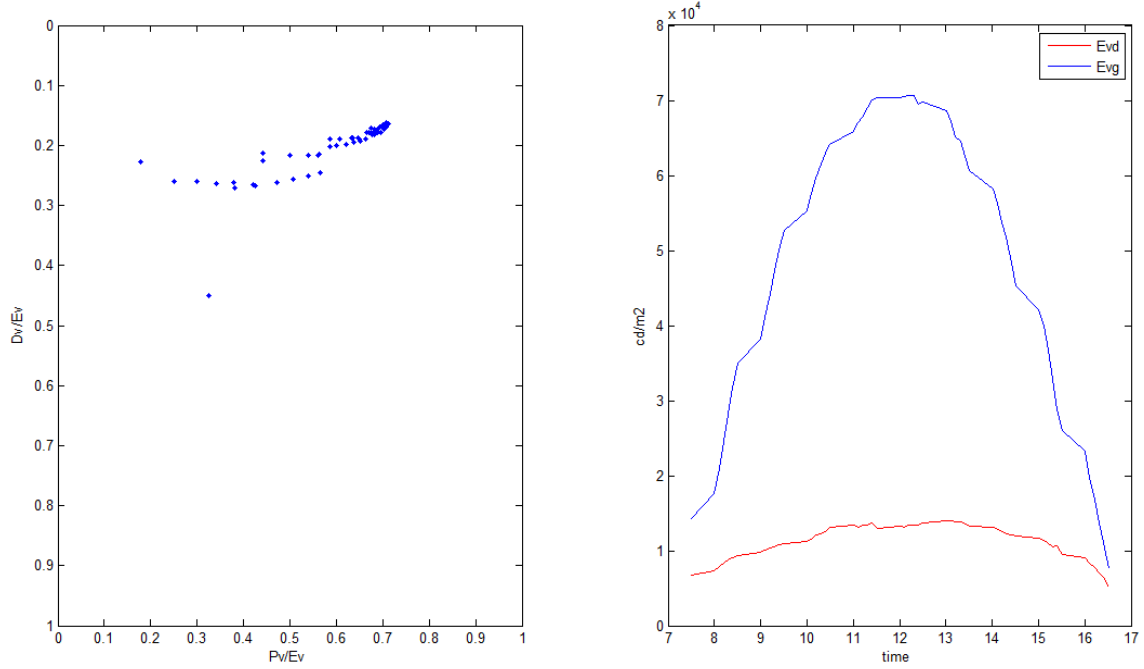


Fig.6.12 – 14 febbraio 2008 - Andamento dell'illuminamento per un giorno sereno.

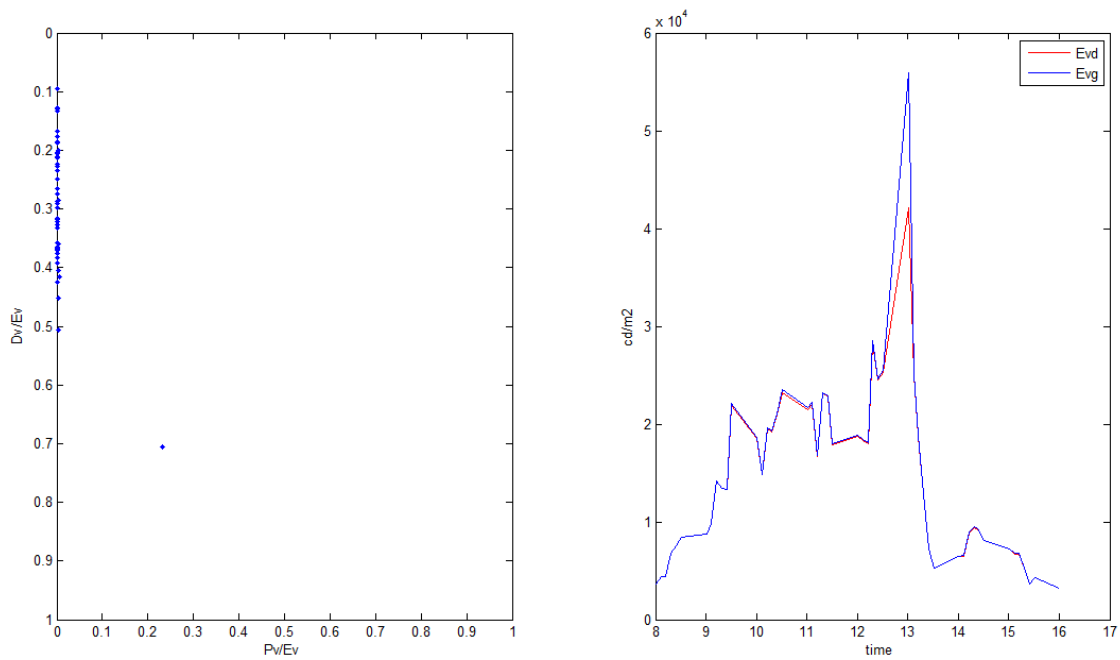


Fig.6.13 – 4 gennaio 2008 - Andamento dell'illuminamento per un giorno coperto.

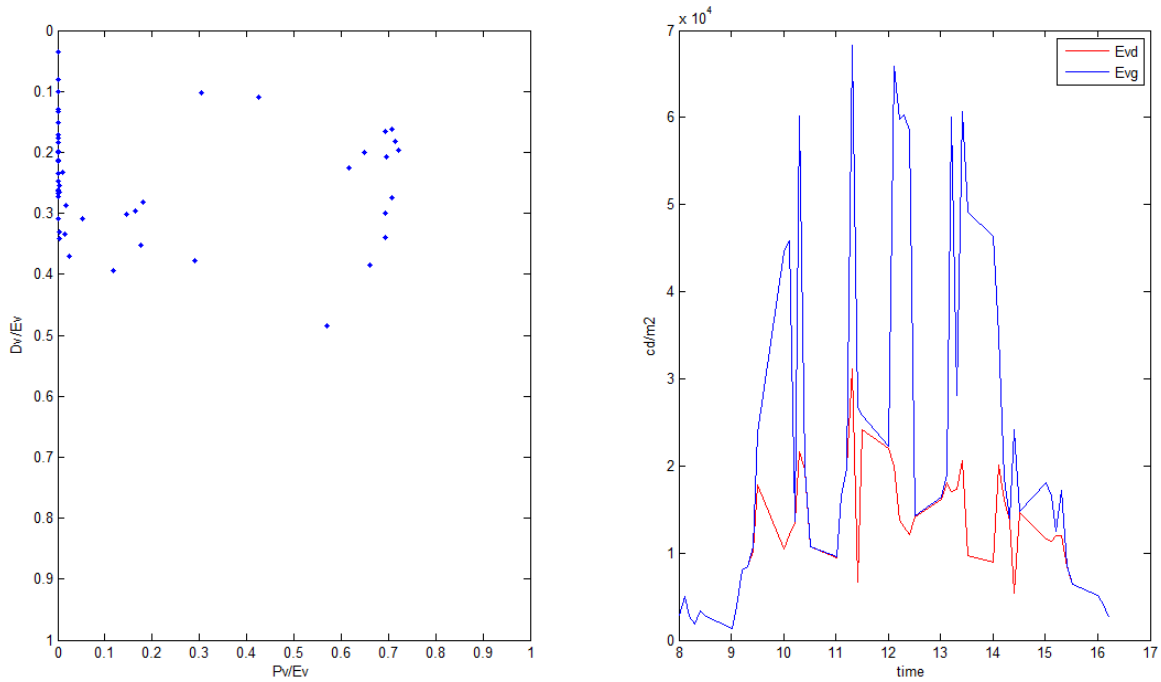


Fig.6.14 - 16 gennaio 2008 - Andamento dell'illuminamento per un giorno intermedio.

• **14 FEBBRAIO**

– **Funzione indicatrice, time 8:00, $\gamma_s = 11.65^\circ$, $\alpha_s = 118.36^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.15.

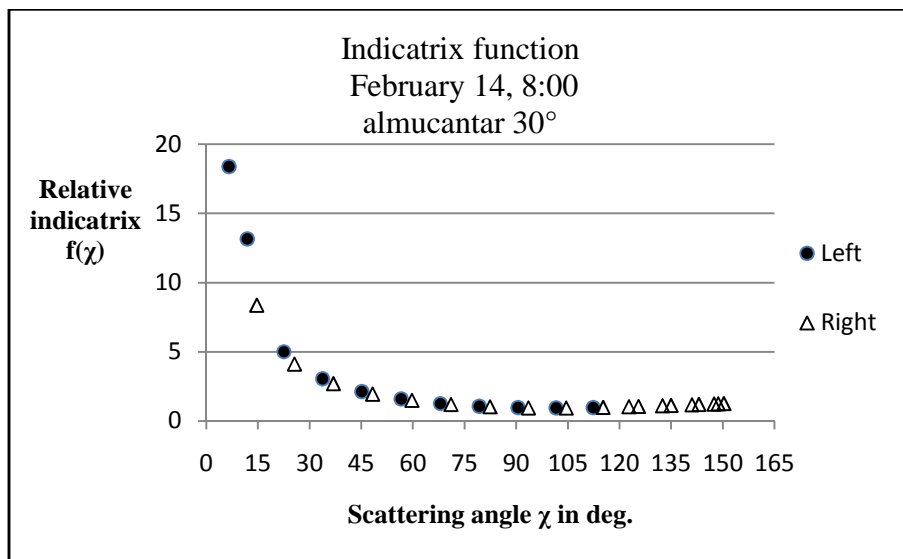


Fig.6.15 – Funzione indicatrice del giorno sereno alle ore 8:00.

- **Funzione indicatrice, time 12:21, $\gamma_s = 37.33^\circ$, $\alpha_s = 180.91^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.16.

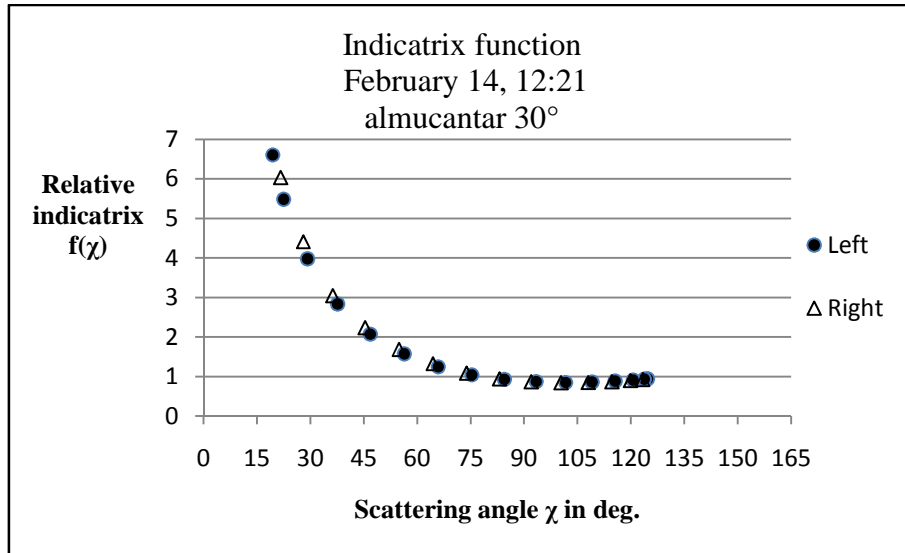


Fig.6.16 – Funzione indicatrice del giorno sereno alle ore 12:21.

- **Funzione gradiente, time 8:00, $\gamma_s = 11.65^\circ$, $\alpha_s = 118.36^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.17.

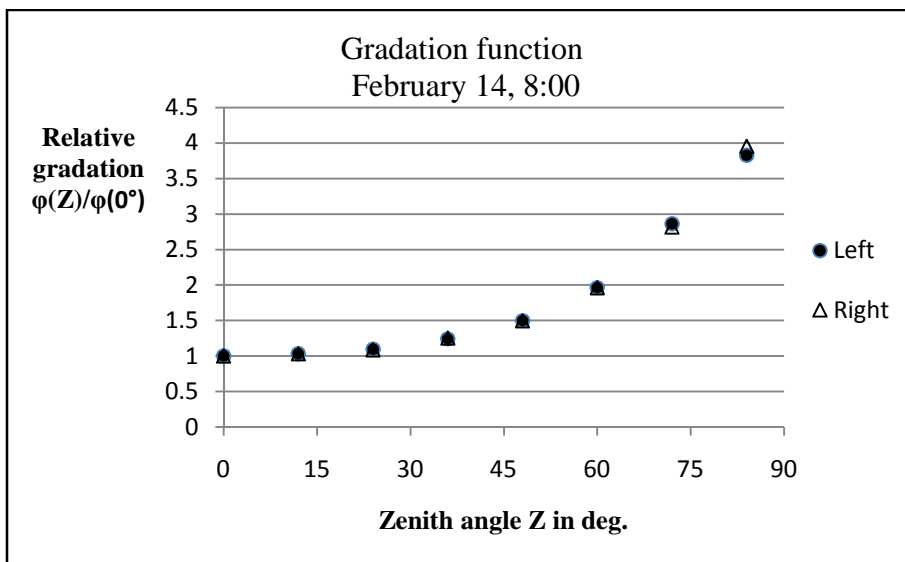


Fig.6.17 – Funzione gradiente del giorno sereno alle ore 8:00.

- **Funzione gradiente, time 12:21, $\gamma_s = 37.33^\circ$, $\alpha_s = 180.91^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.18.

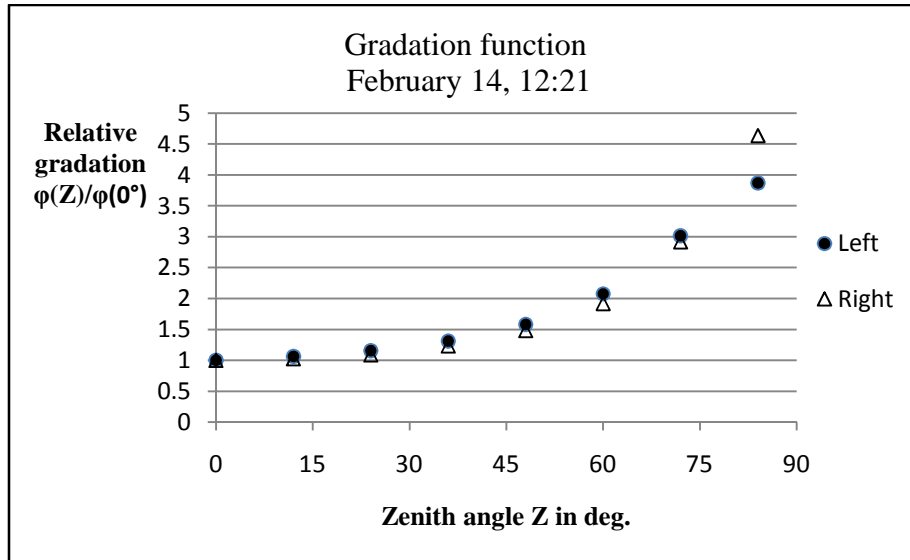


Fig.6.18 – Funzione gradiente del giorno sereno alle ore 12:20.

- **JANUARY 4**

- **Funzione indicatrice, time 8:01, $\gamma_s = 6.56^\circ$, $\alpha_s = 126.46^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.19.

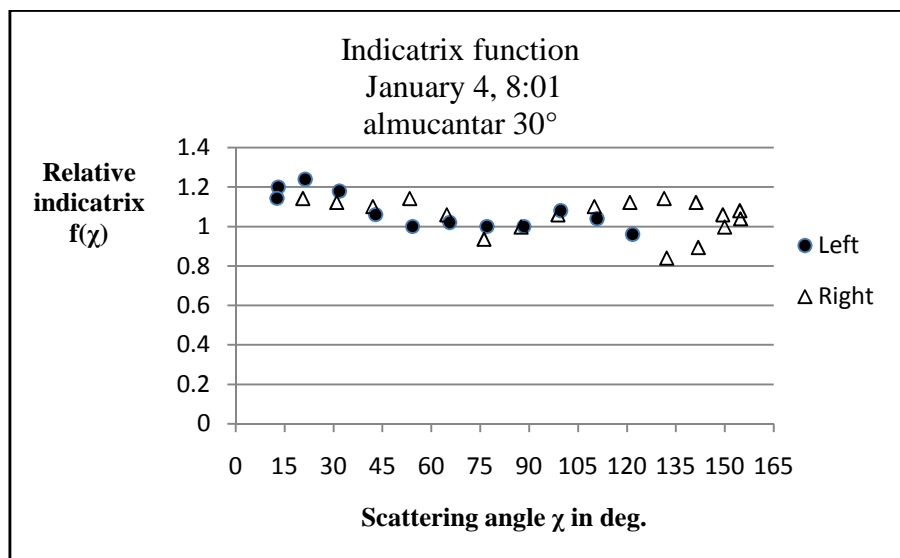


Fig.6.19 – Funzione indicatrice del giorno overcast alle ore 8:01.

- **Funzione indicatrice, time 12:01, $\gamma_s = 28.13^\circ$, $\alpha_s = 180.02^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.20.

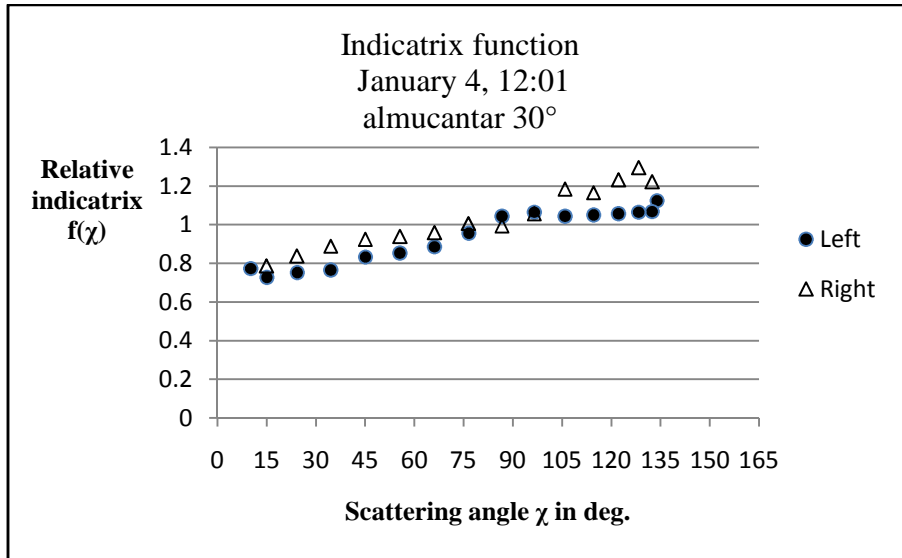


Fig.6.20 – Funzione gradiente del giorno overcast alle ore 12:01.

- **Funzione gradiente, time 8:01, $\gamma_s = 6.56^\circ$, $\alpha_s = 126.46^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.21.

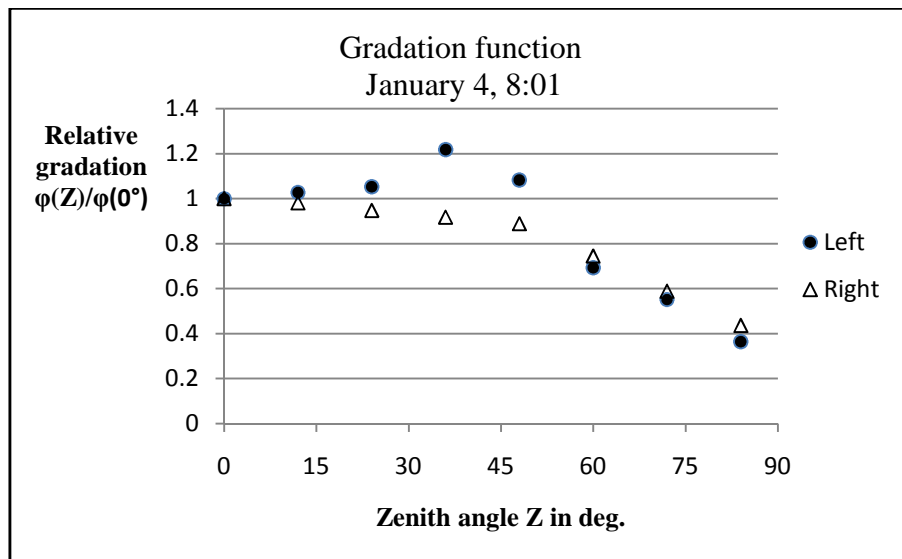


Fig.6.21 – Funzione gradiente del giorno overcast alle ore 8:01.

- **Funzione gradiente, time 12:01, $\gamma_s = 28.13^\circ$, $\alpha_s = 180.02^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.22.

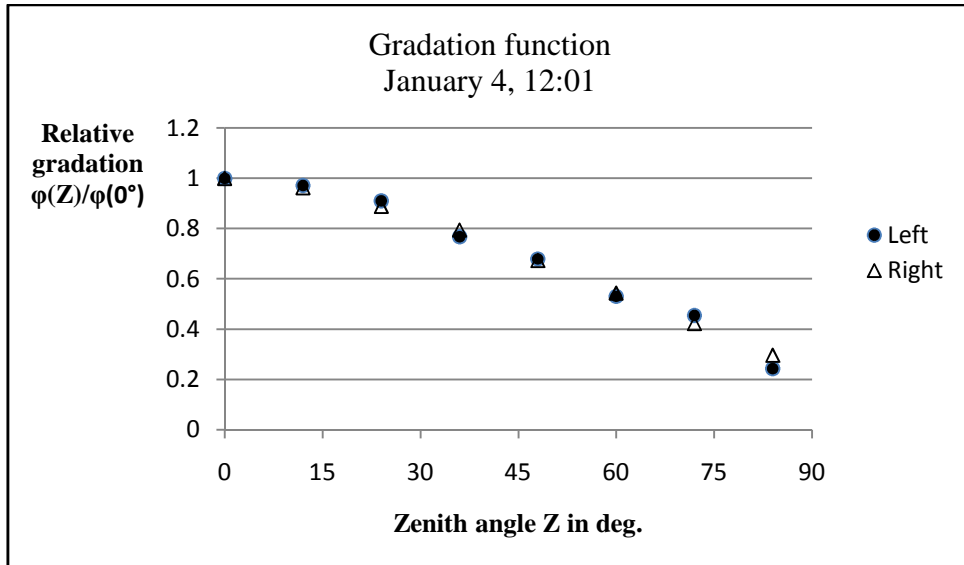


Fig.6.22 – Funzione gradiente del giorno overcast alle ore 12:01.

- **JANUARY 16**

- **Funzione indicatrice, time 8:01, $\gamma_s = 7.03^\circ$, $\alpha_s = 124.57^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.23.

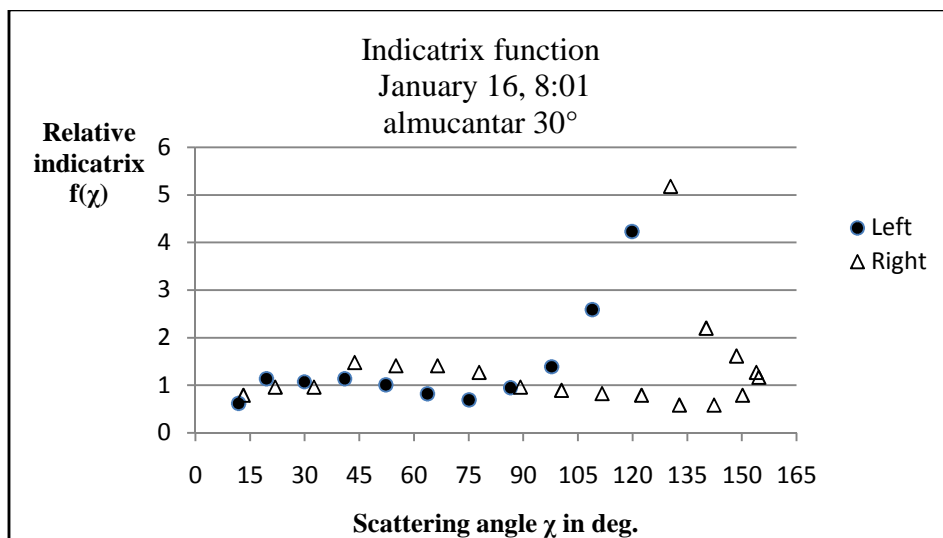


Fig.6.23 – Funzione indicatrice del giorno intermedio alle ore 8:01.

- **Funzione indicatrice, time 12:11, $\gamma_s = 29.75^\circ$, $\alpha_s = 180.41^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.24.

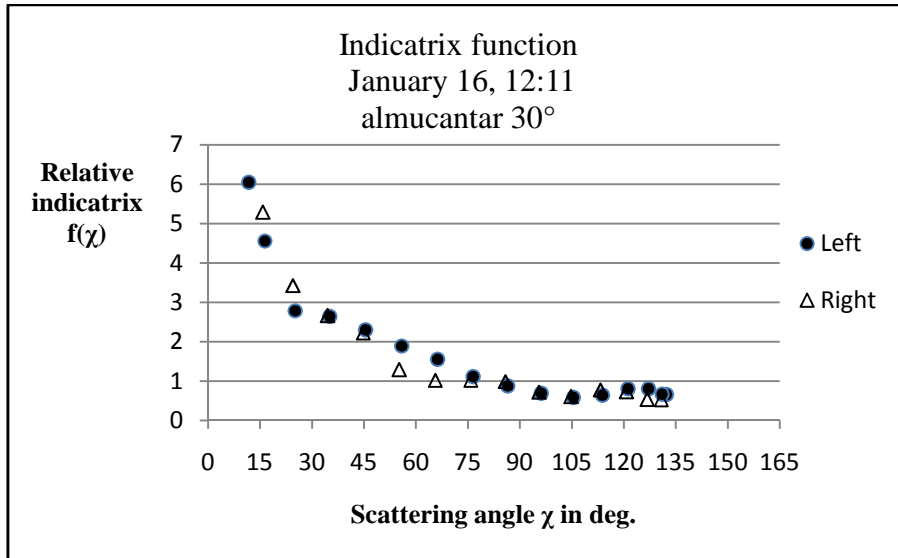


Fig.6.24 – Funzione indicatrice del giorno intermedio alle ore 12:11.

- **Funzione gradiente, time 8:01, $\gamma_s = 7.03^\circ$, $\alpha_s = 124.57^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.25.

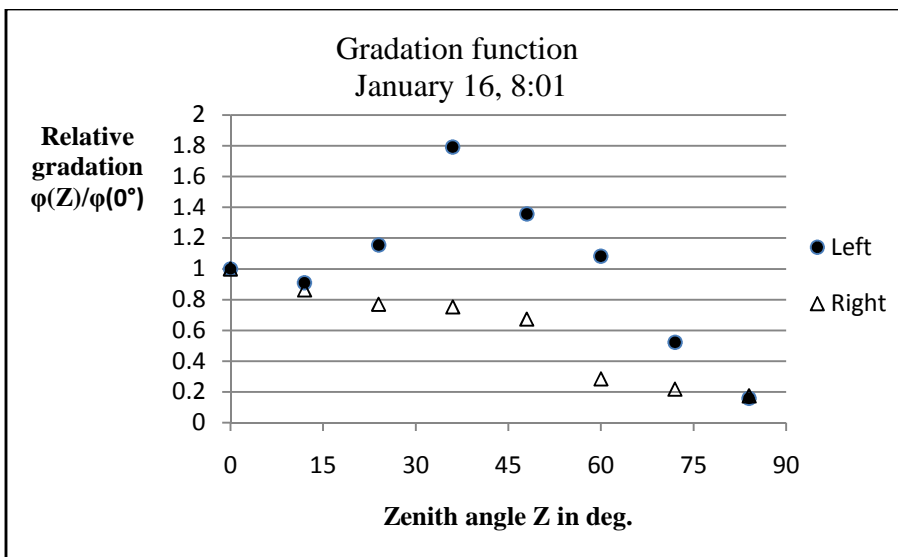


Fig.6.25 – Funzione gradiente del cielo intermedio alle ore 8:01.

- **Funzione gradiente, time 12:11, $\gamma_s = 29.75^\circ$, $\alpha_s = 180.41^\circ$.**

I risultati sono mostrati in Fig.6.26.

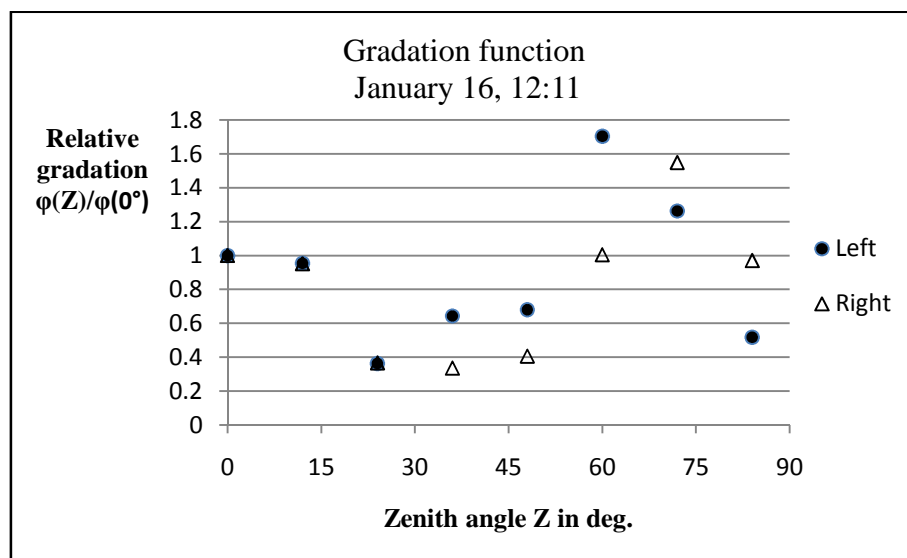


Fig.6.26 – Funzione gradiente del giorno intermedio alle ore 12:11.

Nelle Tab.6.2 e 6.3 sono riportati i valori dell'RMS tra le funzioni calcolate e quelle standard, ed, evidenziato, il valore di RMS minimo per ogni giorno analizzato.

Tab.6.2 – Valori dell'RMS tra funzione indicatrice calcolata e standard.

	1	2	3	4	5	6
4 Gennaio, 8:01	0.435125	0.233938	0.335243	0.410265	0.434864	0.472454
4 Gennaio, 12:01	0.167834	0.351949	0.414378	0.46032	0.502253	0.574856
16 Gennaio, 8:01	2.989268	1.118995	0.661687	0.542655	0.611175	0.823271
16 Gennaio, 12:11	2.341843	0.831559	0.487711	0.405749	0.41213	0.454219
14 Febbraio, 8:00	3.952683	1.297815	0.548245	0.188075	0.088651	0.296693
14 Febbraio, 12:21	6.340731	2.22556	1.063857	0.4918	0.229531	0.209275

Tab.6.3 – Valori dell’RMS tra funzione gradiente calcolata e standard.

	1	2	3	4	5	6
4 Gennaio, 8:01	0.167115	0.188103	0.287879	0.445901	0.477567	0.50203
4 Gennaio, 12:01	0.131114	0.301569	0.391685	0.524257	0.548024	0.566304
16 Gennaio, 8:01	0.435277	0.468037	0.485021	0.533043	0.547861	0.559841
16 Gennaio, 12:11	0.986859	0.557592	0.428467	0.471587	0.507519	0.538704
14 Febbraio, 8:00	4.164273	2.064824	1.274471	0.299728	0.101545	0.108659
14 Febbraio, 12:21	4.550082	2.264247	1.410664	0.363647	0.148236	0.094982

Il tipo di cielo sarà quindi definito dalla combinazione tra il gruppo della funzione indicatrice e quello della funzione gradiente. I risultati ottenuti vengono di seguito riportati:

- **14 Febbraio 2008 – Cielo sereno**

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 8:00, $\gamma_s = 11.65^\circ$, $\alpha_s = 118.36^\circ$:**

gruppo indicatrice: 5 }
 gruppo gradiente: V } Sky 13: CIE Standard Clear Sky, polluted

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 12:21, $\gamma_s = 37.33^\circ$, $\alpha_s = 180.91^\circ$:**

gruppo indicatrice: 6 }
 gruppo gradiente: VI } Sky 15: White – blue turbid sky with a broad solar corona

- **4 Gennaio 2008 – Cielo coperto**

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 8:01, $\gamma_s = 6.56^\circ$, $\alpha_s = 126.46^\circ$:**

gruppo indicatrice: 2 }
 gruppo gradiente: I } Sky 2: Overcast with the steep luminance gradation and slight brightening towards the sun

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 12:01, $\gamma_s = 28.13^\circ$, $\alpha_s = 180.02^\circ$:**

gruppo indicatrice: 1 }
 gruppo gradiente: I } Sky 1: CIE Standard Overcast Sky

- **16 Gennaio 2008 – cielo intermedio**

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 8:01, $\gamma_s = 7.03^\circ$, $\alpha_s = 124.57^\circ$:**

gruppo indicatrice: 4 gruppo gradiente: I	}	Sky 8: Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
----------------------------------------------	---	---------------------------------------------------------------------------------

- **Gruppo indicatrice/gradiente, time 12:11, $\gamma_s = 29.75^\circ$, $\alpha_s = 180.41^\circ$:**

gruppo indicatrice: 4 gruppo gradiente: III	}	Sky 8: Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
------------------------------------------------	---	---------------------------------------------------------------------------------

Il calcolo del tipo di cielo CIE per mezzo delle funzioni indicatrice e gradiente è caratterizzato da differenti problemi. Il primo di questi è dato dal fatto che non è possibile valutare la funzione indicatrice quando l'altezza solare è alta (maggiore di 45°); il secondo problema è legato alla non possibilità di valutare la funzione gradiente quando, per ogni almucantar, l'altezza solare è più alta di fissati valori (Tab.6.4), infatti quando l'altezza solare è molto alta non si hanno punti a sufficienza per valutare la funzione stessa; il terzo problema riguarda la combinazione del gruppo funzione indicatrice con il gruppo funzione gradiente, infatti esistono dei casi per i quali tale combinazione non è definita nella classificazione CIE. Ad esempio, per il 16 gennaio alle ore 8:01 la combinazione *indicatrice 4/gradiente I* non è definita. In questo caso la migliore combinazione sarà fornita dal gruppo 4 per quanto riguarda la funzione indicatrice e dal gruppo 3 per quanto riguarda la funzione gradiente, generando un valore dell'RMS maggiore rispetto al precedente calcolato, ma comunque minore rispetto al valore ottenibile da altre possibili combinazioni.

Risultato originale: RMS gruppo gradiente = 0.435277.

Nuovo risultato: RMS gruppo gradiente = 0.485021.

Tab.6.4 – Massimi valori dell’altezza solare per ogni almucantar.

Elevation angle of almucantar [°]	Highest sun altitude [°]
6	48
18	54
30	60
42	66
54	72
66	78
78	84
90	90

6.2 Confronto tra L_z/D_v calcolato e standard [17], [18].

Per ogni tipo di cielo, il rapporto standard L_z/D_v è dato dalla seguente formula (6.15):

$$\frac{L_z}{D_v} = \frac{\left[B \frac{(\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} + E \sin \gamma_s \right]}{133.8 \cdot \sin \gamma_s} \quad (6.15)$$

dove:

- L_z rappresenta la luminanza zenitale;
- D_v rappresenta l’illuminamento diffuso orizzontale;
- B, C, D, E sono i parametri per i diversi tipi di cielo (Tab.6.5);
- γ_s rappresenta l’altezza solare.

Tab.6.5 - Parametri per i diversi tipi di cielo.

sky	B	C	D	E
1	54.63	1	0	0
2	12.35	3.68	0.59	50.47
3	48.3	1	0	0
4	12.23	3.57	0.57	44.27
5	42.59	1	0	0
6	11.84	3.53	0.55	38.78
7	21.72	4.52	0.64	34.56
8	29.35	4.94	0.7	30.41
9	10.34	3.45	0.5	27.47
10	18.41	4.27	0.63	24.04
11	24.41	4.6	0.72	20.76
12	23	4.43	0.74	18.52
13	27.45	4.61	0.76	16.59
14	25.54	4.4	0.79	14.56
15	28.08	4.13	0.79	13

L'equazione (6.15) è applicata per ogni altezza solare (APPENDICE 1.15) ed il risultato è rappresentato nella Fig.6.27. Gli input per il sottocodice utilizzato sono "BCDE" (Tab.6.5) e "gs" (0, 5, 10, 15, ..., 70).

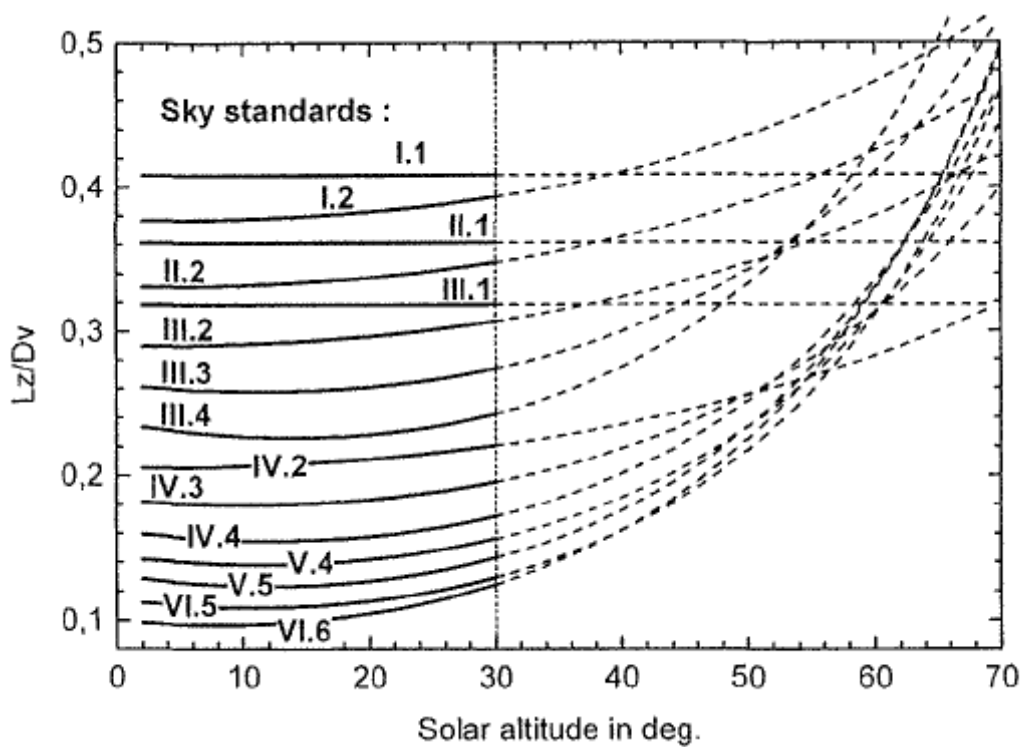


Fig.6.27 - Rapporto L_z/D_v standard.

Per ogni distribuzione si calcola il rapporto L_z/D_v (APPENDICE 1.16). La valutazione del tipo di cielo CIE sarà determinata dal valore minimo dell'RMS (APPENDICE 1.17).

6.2.1 Esempi.

Il metodo del rapporto L_z/D_v è applicato ai giorni riportati nel paragrafo 6.1.3. In Tab.6.6 sono mostrati i valori dell'RMS tra il rapporto L_z/D_v calcolato e quello standard, è possibile valutare anche il valore dell'RMS minimo per ogni giorno analizzato.

Tab.6.6 - Risultati dell'RMS tra il rapporto L_z/D_v calcolato e quello standard.

	1	2	3	4	5	6	7	8
4 Gennaio, 8:01	0.1171	0.0452	0.0014	0.0881	0.1325	0.2418	0.3950	0.5856
4 Gennaio, 12:01	0.0970	0.1465	0.2407	0.2972	0.4071	0.4725	0.6519	0.8652
16 Gennaio, 8:01	0.2040	0.1393	0.0996	0.0192	0.0211	0.1193	0.2576	0.4294
16 Gennaio, 12:11	0.2816	0.2529	0.1875	0.1554	0.0785	0.0418	0.0726	0.2086
14 Febbraio, 8:00	0.7338	0.7129	0.6989	0.6731	0.6585	0.6271	0.5803	0.5228
14 Febbraio, 12:21	0.6970	0.6946	0.6573	0.6563	0.6114	0.6114	0.5751	0.5313
	9	10	11	12	13	14	15	
4 Gennaio, 8:01	0.7519	1.0045	1.3215	1.6014	1.9042	2.3070	2.6971	
4 Gennaio, 12:01	1.0498	1.3240	1.6518	1.9249	2.2126	2.5651	2.7417	
16 Gennaio, 8:01	0.5789	0.8069	1.0927	1.3448	1.6178	1.9805	2.3309	
16 Gennaio, 12:11	0.3318	0.5046	0.7108	0.8833	1.0614	1.2806	1.3762	
14 Febbraio, 8:00	0.4748	0.3979	0.3026	0.2195	0.1288	0.0101	0.1003	
14 Febbraio, 12:21	0.4643	0.4139	0.3535	0.2957	0.2497	0.1823	0.1778	

I tipi di cielo individuati sono i seguenti:

- **14 Febbraio 2008 – Giorno sereno**
- **8:00, $\gamma_s = 11.65^\circ$, $\alpha_s = 118.36^\circ$:**

Sky 14: Cloudless, turbid with a broad solar corona

- **12:21, $\gamma_s = 37.33^\circ$, $\alpha_s = 180.91^\circ$.**

Sky 15: White – blue turbid sky with a broad solar

- **4 Gennaio 2008 – Giorno coperto**

- **8:01, $\gamma_s = 6.56^\circ$, $\alpha_s = 126.46^\circ$:**

Sky 3: Overcast moderately graded with azimuthal uniformity

- **12:01, $\gamma_s = 28.13^\circ$, $\alpha_s = 180.02^\circ$:**

Sky 1: CIE Standard Overcast Sky

- **16 Gennaio 2008 – Giorno intermedio**

- **8:01, $\gamma_s = 7.03^\circ$, $\alpha_s = 124.57^\circ$:**

Sky 4: Overcast moderately graded and slight brightening towards the sun

- **12:11, $\gamma_s = 29.75^\circ$, $\alpha_s = 180.41^\circ$:**

Sky 6: Partly cloudy, no luminance gradation towards zenith, slight brightening towards the sun

In Fig.6.28 sono riportati i valori del rapporto L_z/D_v , calcolato confrontati con le curve standard.

Il principale problema che si incontra nell'applicazione del rapporto L_z/D_v per la ricerca del tipo di cielo CIE, è che quando l'altezza solare è maggiore di 35° , le curve L_z/D_v standard si intersecano e quindi non è possibile definire in maniera univoca il tipo di cielo.

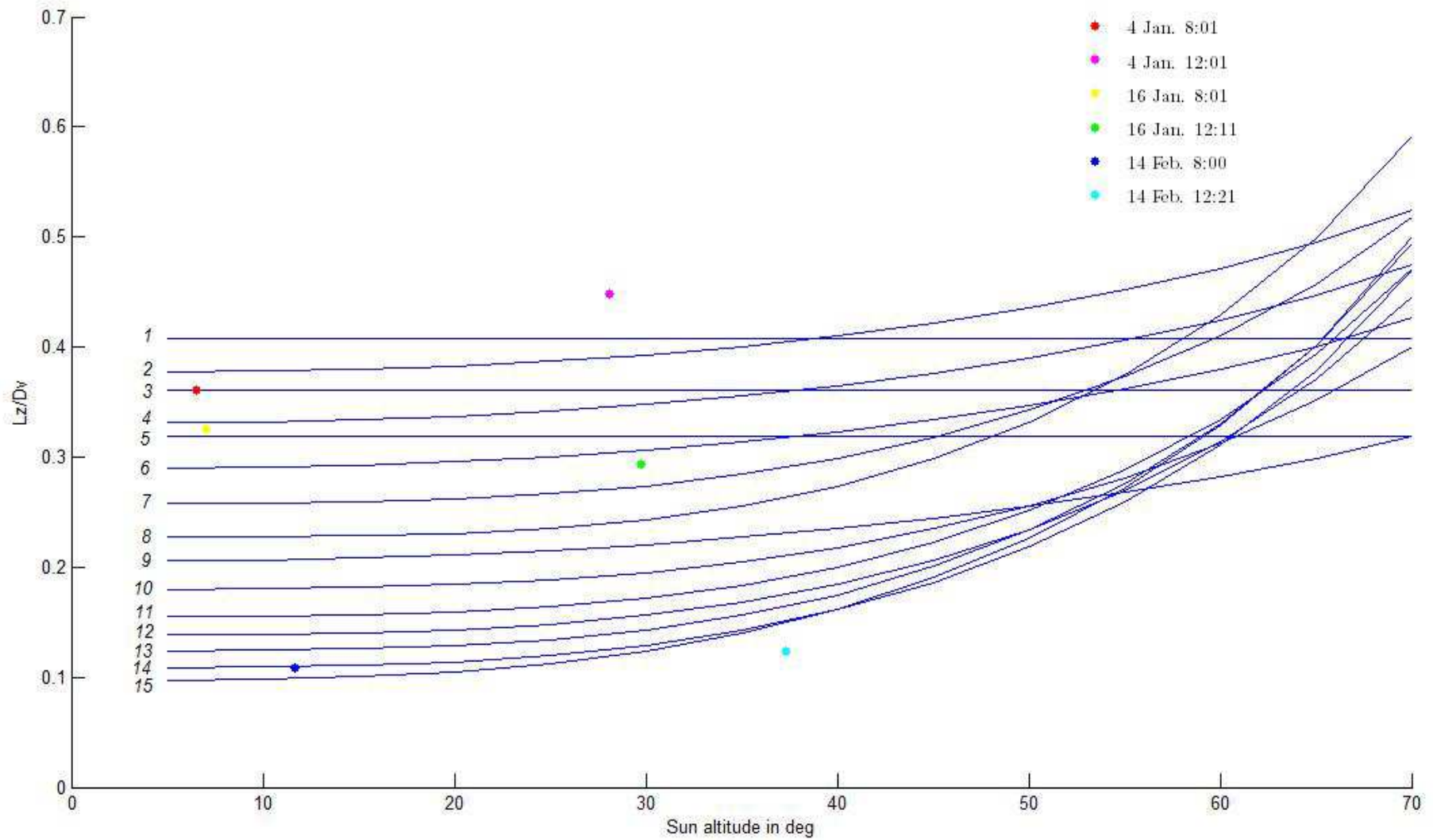


Fig.6.28 – Rappresentazione del rapporto L_z/D_v standard e calcolato.

6.3 Confronto tra L_p/D_v calcolato e L_p/D_v prodotto da ognuno dei 15 tipi di cielo CIE.

La prima fase del metodo di Tregenza [19] è rappresentata dal calcolo dell'illuminamento orizzontale diffuso D_v a partire dai valori delle distribuzione di luminanza misurate.

$$D_v = \frac{S_d}{2\pi} \sum_p D_{vp} \quad (6.16)$$

dove:

- p rappresenta il numero di punti (1:145);
- D_{vp} rappresenta l'illuminamento orizzontale di ogni punto, calcolato con la formula (6.17);
- S_d rappresenta il valore calcolabile con la formula (6.18).

$$D_{vp} = \frac{\pi L_p}{n_p} \left(\sin^2 \left(\frac{b_p \pi}{15} \right) \sin^2 \left(\frac{(b_p - 1)\pi}{15} \right) \right) \quad 1 \leq b_p \leq 7$$

$$D_{vp} = \pi \left(1 - \sin^2 \left(\frac{7\pi}{15} \right) \right) \quad b_p = 8 \quad (6.17)$$

$$S_d = \sum_p \left(\sin \left(\frac{b_p \pi}{15} \right) - \sin \left(\frac{(b_p - 1)\pi}{15} \right) \right) \left(\frac{2\pi}{n_p} \right) \quad (6.18)$$

dove :

- L_p rappresenta la luminanza misurata per ogni singola scansione;
- b_p rappresenta la banda contenente il punto p ;
- n_p rappresenta il numero di punti nella banda b_p .

L'equazione (6.16) è di più semplice implementazione se calcolata con la formula (6.19) [26]:

$$D_v = \pi \left[\sum 0.00144L_{1 \rightarrow 30} + \sum 0.00407L_{31 \rightarrow 60} + \sum 0.00750L_{61 \rightarrow 84} + \right. \\ \left. + \sum 0.00862L_{85 \rightarrow 108} + \sum 0.01099L_{109 \rightarrow 126} + \sum 0.01288L_{127 \rightarrow 138} + \right. \\ \left. + \sum 0.01409L_{139 \rightarrow 144} + \sum 0.01093L_{145} \right] \quad (6.19)$$

D_v è calcolato con il sottocodice “calcEh” (APPENDICE 1.18).

La seconda fase è quella di confrontare D_v calcolato con l'equazione (6.19) con il valore misurato (D_{vscan}). Il confronto è realizzato applicando il seguente test di controllo della qualità dei dati [42]:

$$|D_{vscan} - D_v| < 0.15 \cdot D_v \quad (6.20)$$

Se la verifica non è soddisfatta è necessario un controllo dei dati.

Il sottocodice applicato per il confronto dei dati è riportato in APPENDICE 1.19 (“controlEh”).

La terza fase è quella di normalizzare la luminanza della scansione:

$$L_{prsc} = \frac{L_p}{D_v} \quad (6.21)$$

Il sottocodice applicato per normalizzare la luminanza è riportato in APPENDICE 1.20 (“calcLprsc”).

La quarta fase prevede il calcolo della distribuzione di luminanza del cielo generale e la sua normalizzazione. La luminanza relativa di un elemento di cielo è data dalla seguente formula [10]:

$$l_r = \frac{L_{pst}}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} \quad (6.22)$$

dove:

- Z rappresenta la distanza angolare tra il punto e lo zenit ($\pi/2 - \gamma$);
- Z_s rappresenta la distanza angolare tra il sole e lo zenith ($\pi/2 - \gamma_s$);
- χ rappresenta la distanza angolare tra il punto e il sole.
- $f(\chi)$ rappresenta la funzione indicatrice, è fornita dall'equazione (6.22);
- $\varphi(Z)$ rappresenta la funzione gradiente, è fornita dall'equazione (6.23).

$$f(\chi) = 1 + \left[c \cdot \exp(d\chi) - \exp\left(d \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \quad (6.23)$$

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad 0 \leq Z \leq \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi(Z) = 1 \quad Z = \frac{\pi}{2} \quad (6.24)$$

Le costanti a, b, c, d, e , dipendono dal tipo di cielo, esse sono riportate in Tab.4.4 (Capitolo 4).

La normalizzazione per ogni distribuzione di luminanza precedentemente calcolata è data dalla formula (6.25):

$$L_{prst} = \frac{L_{pst}}{D_v} \quad (6.25)$$

Per ogni distribuzione, $\frac{L_{pst}}{D_v}$ rappresenta una matrice 15×145 . Questi valori sono confrontati con $\frac{L_p}{D_v}$ e il valore dell'RMS è calcolato come segue:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^{n_p} (L_{prsc} - L_{prst})^2} \quad (6.26)$$

Il valore minore di RMS individua il tipo di cielo per una data distribuzione (APPENDICE 1.21).

6.3.1 Esempi.

Il metodo di Tregenza è applicato ai giorni riportati nel paragrafo 6.1.3. La Tab.6.7 fornisce i risultati ottenuti del confronto tra L_p/D_v calcolato L_p/D_v misurato.

Tab.6.7 - Risultati del confronto tra L_p/D_v calcolato L_p/D_v misurato.

4 Gennaio, 8:01	0.011163
4 Gennaio, 12:01	0.010422
16 Gennaio, 8:01	0.01494
16 Gennaio, 12:11	-0.01178
14 Febbraio, 8:00	-0.02814
14 Febbraio, 12:21	-0.00253

I tipi di cieli ottenuti dall'applicazione del metodo di Tregenza sono i seguenti:

- **14 Febbraio 2008 – Giorno sereno**

- **8:00, $\gamma_s = 11.65^\circ$, $\alpha_s = 118.36^\circ$:**

Sky 14: Cloudless, turbid with a broad solar corona

- **12:21, $\gamma_s = 37.33^\circ$, $\alpha_s = 180.91^\circ$.**

Sky 15: White – blue turbid sky with a broad solar

- **4 Gennaio 2008 – Giorno coperto**

- **8:01, $\gamma_s = 6.56^\circ$, $\alpha_s = 126.46^\circ$:**

Sky 1: CIE Standard Overcast Sky

- **12:01, $\gamma_s = 28.13^\circ$, $\alpha_s = 180.02^\circ$:**

Sky 1: CIE Standard Overcast Sky

- **16 Gennaio 2008 – Giorno intermedio**

- **8:01, $\gamma_s = 7.03^\circ$, $\alpha_s = 124.57^\circ$:**

Sky 1: CIE Standard Overcast Sky

- **12:11, $\gamma_s = 29.75^\circ$, $\alpha_s = 180.41^\circ$:**

 Sky 8: Partly cloudy sky, no gradation towards zenith,
distinct solar corona

6.4 Risultati.

I risultati ottenuti dell'applicazione dei tre metodi, sopra menzionati, per il calcolo del tipo di cielo CIE sono riportati in Tab.6.8.

Tab.6.8 – Risultati del tipo di cielo CIE sono riportati per un giorno coperto, uno sereno ed uno intermedio.

	Giorno coperto	Giorno sereno	Giorno intermedio
	04/01/2008	14/02/2008	16/01/2008
Aletezza solare [°]	6.56	11.65	7.03
L_z/D_v	3	14	4
Gruppo indicatrice-gradiente	2	13	8
Tregenza	1	14	1
Aletezza solare [°]	28.13	37.33	29.75
L_z/D_v	1	15	6
Gruppo indicatrice-gradiente	1	15	8
Tregenza	1	15	8

Dalla Tab.6.8 si evince che, quando l'altezza solare è alta, l'applicazione delle tre metodologie di calcolo del tipo di cielo CIE riporta gli stessi risultati, mentre si riscontra una maggiore variabilità per altezza solare più bassa.

7. NUOVO MODELLO DI CALCOLO A 20 CIELI.

In questo capitolo viene esposto un nuovo modello di calcolo proposto dal Prof. Norio Igawa, al fine di verificare l'accuratezza anche di questo modello. Il modello propone 20 tipi di cielo [12].

7.1 Modello di Igawa a 20 tipi di cielo.

Questo modello prevede l'applicazione delle stesse equazioni espresse nel paragrafo 3.2, cambia solo la determinazione delle grandezze a , b , c , d , e , le quali sono sempre espresse in funzione dell'indice di cielo S_i ma sono delle costanti, i loro valori sono riportati in Tab.7.1.

Tab.7.1 - Valori delle grandezze a , b , c , d , e .

Model_2: All Sky Model							
No.	symbol	S_i	a	b	c	d	e
1	As1	0.1	2.68	-0.89	0.00	-0.36	0.00
2	As2	0.2	2.43	-0.87	0.02	-0.48	0.00
3	As3	0.3	2.14	-0.85	0.08	-0.63	0.01
4	As4	0.4	1.80	-0.83	0.23	-0.82	0.01
5	As5	0.5	1.43	-0.80	0.49	-1.04	0.01
6	As6	0.6	1.05	-0.78	0.91	-1.28	0.02
7	As7	0.7	0.68	-0.75	1.52	-1.54	0.03
8	As8	0.8	0.33	-0.73	2.35	-1.80	0.05
9	As9	0.9	0.03	-0.70	3.42	-2.04	0.07
10	As10	1.0	-0.22	-0.67	4.74	-2.25	0.10
11	As11	1.1	-0.42	-0.63	6.29	-2.44	0.13
12	As12	1.2	-0.58	-0.60	8.03	-2.59	0.18
13	As13	1.3	-0.71	-0.57	9.92	-2.70	0.22
14	As14	1.4	-0.80	-0.54	11.84	-2.80	0.27
15	As15	1.5	-0.86	-0.51	13.65	-2.86	0.32
16	As16	1.6	-0.91	-0.47	15.14	-2.92	0.36
17	As17	1.7	-0.95	-0.44	16.04	-2.95	0.39
18	As18	1.8	-0.97	-0.41	15.93	-2.98	0.42
19	As19	1.9	-0.99	-0.38	14.24	-3.00	0.44
20	As20	2.0	-1.01	-0.35	10.02	-3.01	0.45

8. MODELLI CIE - S_i .

In questo nuovo capitolo si è posto il problema della individuazione di un modello di calcolo della luminanza del cielo attraverso il quale il tipo di cielo sia direttamente determinato per mezzo dei dati di irraggiamento a disposizione. Di seguito viene proposto un metodo di scelta dei cieli CIE a partire dai dati di irradianza, basato sull'uso dell'indice di cielo S_i di Igawa; di questo metodo sono state sviluppate tre versioni, denominate CIE- S_i A, CIE- S_i B, CIE- S_i C.

8.1 Modello CIE – S_i A.

Questo modello proposto dal Prof. N. Igawa, prevede il calcolo del parametro S_i come esposto nel capitolo relativo al modello di Igawa (Capitolo 4, equazione (4.28)), in funzione di tale parametro si sceglie il tipo di cielo secondo la tabella Tab.8.1. Per ogni distribuzione si valuta il tipo di cielo e quindi si riapplica il modello CIE e si ricalcolano le luminanze.

Tab.8.1 – Scelta del tipo di cielo CIE in funzione del parametro S_i .

S_i	Type of General Sky	S_i	Type of General Sky
$S_i < 0.35$	1	$1.10 \leq S_i < 1.30$	8
$0.35 \leq S_i < 0.60$	3	$1.30 \leq S_i < 1.40$	10
$0.60 \leq S_i < 0.75$	4	$1.40 \leq S_i < 1.70$	11
$0.75 \leq S_i < 0.90$	6	$1.70 \leq S_i < 1.92$	13
$0.90 \leq S_i < 1.10$	7	$S_i > 1.92$	12

In Fig.8.1 è mostrata la relazione tra il parametro S_i e il tipo di cielo CIE.

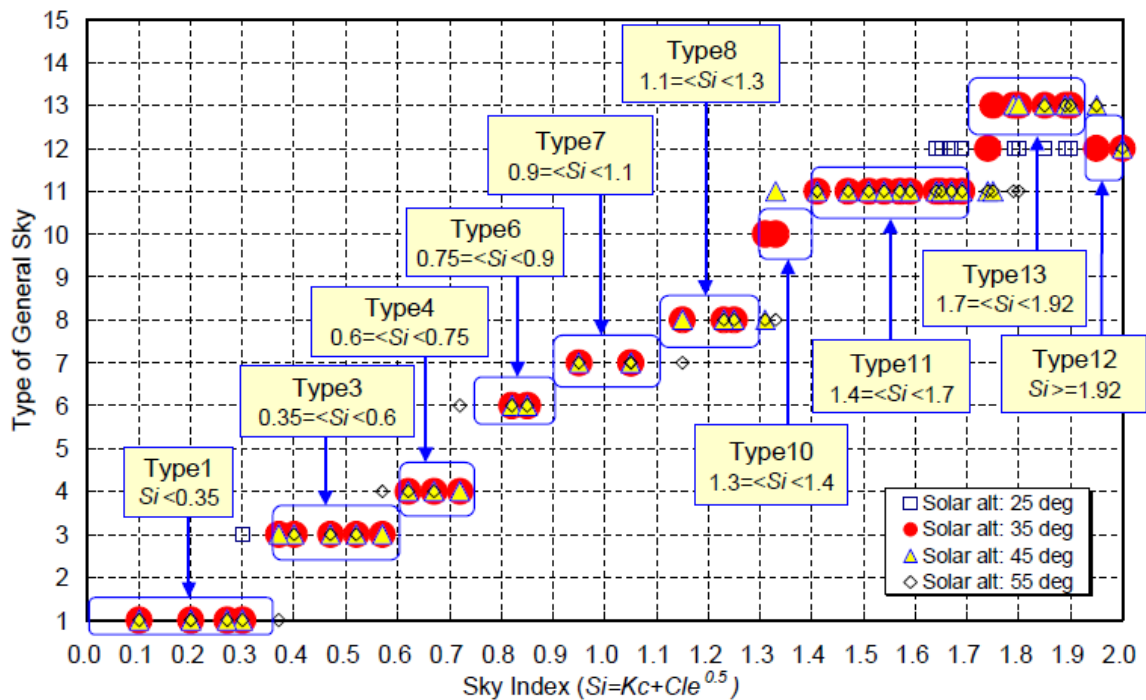


Fig.8.1 – Relazione tra il parametro S_i ed il tipo di cielo CIE.

8.2 Modello CIE – S_i B.

Il modello CIE - S_i B è stato sviluppato dall'Unità di Ricerca del PRIN 2008 del dipartimento di Ingegneria Meccanica presso l'Università della Calabria.

Per sviluppare tale modello, si è tentato di correlare i tipi di cielo CIE a diversi parametri.

I parametri considerati sono:

- indice di serenità (ϵ);
- brillantezza del cielo (Δ);
- indice di cielo (S_i);
- rapporto tra irradianza diffusa sul piano orizzontale e irradianza extratmosferica (K_d);
- rapporto tra irradianza globale sul piano orizzontale e irradianza extratmosferica (K_g);
- rapporto tra irradianza diffusa ed irradianza globale sul piano orizzontale (K'_d).

L'analisi è stata svolta per i dati della città di Osaka nell'anno 2007. Per ogni distribuzione è noto il tipo di cielo attraverso la valutazione dell'RMS minimo con il modello CIE, per la stessa distribuzione si calcolano i parametri sopra esposti. I risultati ottenuti sono i seguenti (Fig.8.2, Fig.8.3, Fig.8.4, Fig.8.5, Fig.8.6, Fig.8.7):

cieli	1-1.15	1.15-1.3	1.3-1.45	1.45-1.6	1.6-1.75	1.75-1.9	1.9-2.05	2.05-2.2	2.2-2.35	2.35-2.5	2.5-2.65	2.65-2.8	2.8-2.95	2.95-3.1	3.1-3.25	3.25-3.4	3.4-3.55	3.55-3.7	3.7-3.85	3.85-4	4-4.15	4.15-4.3	4.3-4.45	4.45-4.6	4.6-4.75	4.75-4.9	4.9-5.05	>5.05
1	2943	5	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	688	13	8	5	8	3	5	4	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2642	1	0	2	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1178	26	12	6	12	2	3	3	1	2	0	4	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	643	2	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1005	23	13	3	2	6	2	2	1	1	1	2	1	1	0	2	4	2	0	1	0	0	0	1	0	1	0	6
7	841	129	71	54	26	24	11	11	6	9	11	5	3	1	1	2	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
8	831	193	171	132	105	73	54	46	42	29	32	15	20	10	8	8	1	2	2	2	2	5	3	0	3	3	0	6
9	379	15	8	5	7	6	5	7	8	3	7	5	3	2	2	3	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	2
10	244	17	12	14	5	7	7	2	7	2	4	2	2	2	1	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
11	368	72	101	65	83	65	55	43	35	29	31	26	21	8	9	4	9	5	5	4	0	2	1	0	2	0	1	3
12	180	34	28	26	35	33	27	29	36	46	31	47	40	38	33	40	21	22	30	17	19	17	17	10	17	6	10	93
13	455	70	123	129	174	233	211	229	253	211	216	177	143	138	111	103	88	92	56	54	45	44	42	38	35	20	17	106
14	154	43	43	40	48	65	64	82	135	127	142	148	144	161	142	170	203	137	141	176	120	145	125	135	134	104	102	741
15	188	41	35	48	43	58	82	90	94	103	128	124	111	94	98	98	88	79	89	67	62	51	51	36	53	28	25	462

Fig.8.2 – Rappresentazione dell' indice di serenità (ε) e del tipo di cielo CIE.

cieli	0-0.05	0-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.3	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-0.55	0.55-0.6	0.6-0.65	0.65-0.7	0.7-0.75	0.75-0.8	0.8-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1	> 1
1	295	568	627	523	410	314	157	42	16	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	53	80	72	84	108	114	91	67	44	14	7	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	393	576	524	417	361	226	121	25	6	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	26	49	71	83	144	200	268	243	111	29	13	7	2	5	2	0	0	0	0	0	0
5	107	152	139	124	84	33	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	27	46	72	109	135	164	211	187	87	32	6	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	4	7	19	27	67	126	218	292	226	123	52	26	11	10	2	1	0	0	0	0	0
8	4	4	17	31	97	266	401	400	307	152	72	22	7	14	4	0	0	0	0	0	0
9	11	26	57	124	146	61	35	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	3	31	66	85	55	51	25	8	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	2	2	7	55	195	254	278	154	52	22	8	8	6	4	0	0	0	0	0	0	0
12	0	15	151	290	321	134	59	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	18	194	494	965	892	556	241	92	49	34	34	27	14	1	1	0	0	0	0	0
14	0	182	1122	1269	875	374	81	33	9	2	3	3	4	8	6	0	0	0	0	0	0
15	5	139	383	540	591	417	237	98	37	7	8	8	11	37	7	0	0	1	0	0	0

Fig.8.3 – Rappresentazione della brillantezza del cielo (Δ) e del tipo di cielo CIE.

cieli	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1	1-1.1	1.1-1.2	1.2-1.3	1.3-1.4	1.4-1.5	1.5-1.6	1.6-1.7	1.7-1.8	1.8-1.9	1.9-2	2-2.1	2.1-2.2	>2.2
1	222	570	844	637	375	199	50	19	17	8	3	4	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
2	40	48	92	139	151	81	58	39	26	4	13	5	10	1	1	7	7	4	3	4	2	2	0
3	281	485	819	543	328	122	39	15	4	1	3	5	0	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0
4	16	40	70	150	232	230	205	122	53	47	19	8	12	11	7	8	6	8	6	2	1	0	0
5	76	149	165	128	68	24	15	8	5	2	4	3	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6	14	28	89	105	169	198	186	113	58	34	21	13	6	6	2	6	2	11	11	8	0	0	0
7	2	5	11	31	61	109	164	149	160	115	80	62	58	38	38	37	26	22	19	14	10	0	0
8	4	1	3	22	69	102	111	129	125	121	147	128	126	90	111	97	88	101	109	51	38	22	3
9	2	15	49	73	64	51	31	28	25	12	11	10	14	17	15	16	11	13	6	5	3	0	0
10	2	2	18	31	45	51	29	30	19	16	12	7	14	11	7	6	6	10	7	7	2	1	0
11	1	1	4	16	42	47	56	51	52	49	49	59	73	87	72	83	83	87	75	40	15	5	0
12	0	0	3	20	35	36	31	31	25	20	24	23	23	27	37	36	79	125	187	157	62	1	0
13	0	1	0	3	19	31	46	49	71	70	85	89	117	186	211	346	518	810	658	274	25	4	0
14	0	0	1	8	30	37	16	21	28	36	44	31	39	54	63	136	264	544	1099	1314	201	5	0
15	3	1	2	2	10	23	19	28	25	36	53	35	46	42	54	111	246	548	770	442	30	0	0

Fig.8.4 – Rappresentazione dell'indice di cielo (S_i) e del tipo di cielo CIE.

cieli	0-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.3	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-0.55	0.55-0.6	0.6-0.65	0.65-0.7	0.7-0.75	0.75-0.8	0.8-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1	>1
1	804	570	521	423	355	181	57	26	7	3	3	0	1	1	0	0	0	1	0	0
2	116	72	80	91	105	94	74	50	28	12	4	4	2	4	0	0	0	0	0	1
3	996	477	400	360	227	129	39	10	1	4	0	0	2	0	0	1	1	0	1	4
4	68	76	84	117	193	249	252	129	42	17	8	7	3	4	0	1	1	1	0	1
5	271	137	102	81	32	10	4	2	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	7
6	79	80	84	117	149	197	182	117	33	12	7	6	4	1	0	0	2	1	0	9
7	14	19	28	57	99	200	274	236	140	79	31	16	10	4	2	0	1	0	0	1
8	8	24	46	99	223	359	354	312	184	87	44	22	20	10	3	0	0	0	0	3
9	43	44	70	74	73	46	31	15	8	9	8	6	4	4	5	2	1	3	2	23
10	7	40	56	57	51	51	34	12	6	5	3	1	2	1	1	1	1	0	2	2
11	7	26	79	141	206	252	168	72	36	17	19	10	8	0	0	2	1	0	0	3
12	26	181	246	232	162	70	31	17	3	3	1	1	4	1	1	1	0	1	0	1
13	19	202	512	929	850	520	249	108	71	46	40	34	22	10	1	0	0	0	0	0
14	175	1089	1296	837	387	113	40	7	2	2	1	3	6	9	4	0	0	0	0	0
15	136	376	536	568	446	230	106	42	8	7	16	11	25	13	5	0	0	1	0	0

Fig.8.5 – Rappresentazione del rapporto tra irradianza diffusa sul piano orizzontale e irradianza extratmosferica (K_d) e del tipo di cielo CIE.

cieli	0-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.3	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-0.55	0.55-0.6	0.6-0.65	0.65-0.7	0.7-0.75	0.75-0.8	0.8-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1	> 1
1	805	568	524	420	335	184	65	27	11	6	2	1	1	2	0	1	1	0	0	0
2	116	73	74	90	102	84	65	45	22	17	12	7	7	8	3	4	5	1	2	0
3	1001	466	408	338	232	130	51	5	2	4	3	1	2	0	1	0	2	1	1	4
4	68	74	83	108	178	209	238	123	79	23	15	15	12	12	5	7	2	1	0	1
5	270	137	100	80	31	12	3	5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	7
6	73	77	82	103	127	166	172	133	48	26	17	6	9	18	6	1	2	5	0	9
7	14	16	21	45	73	130	136	160	178	136	76	67	55	36	27	18	11	7	2	3
8	8	15	25	59	89	118	152	196	170	174	154	130	133	134	105	50	48	14	12	12
9	44	42	64	62	64	37	28	17	9	10	10	6	11	6	8	9	5	6	2	31
10	7	33	49	47	40	36	28	11	10	17	9	10	10	4	11	3	3	2	1	2
11	7	18	35	68	68	88	75	69	68	61	78	94	88	105	59	38	15	6	2	5
12	8	31	59	80	75	76	38	56	54	37	49	59	91	117	80	33	16	9	1	13
13	1	4	7	31	64	105	126	175	194	320	387	526	650	666	267	57	19	7	5	2
14	3	1	30	52	71	72	93	124	171	199	335	432	660	977	566	149	29	6	0	1
15	5	2	6	13	27	35	25	53	47	60	100	187	427	841	535	115	34	10	4	0

Fig.8.6 – Rappresentazione del rapporto tra irradianza globale sul piano orizzontale e irradianza extratmosferica (K_g) e del tipo di cielo CIE.

cieli	0-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.3	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-0.55	0.55-0.6	0.6-0.65	0.65-0.7	0.7-0.75	0.75-0.8	0.8-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1	> 1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	3	3	3	3	14	12	51	1428	1432
2	0	0	0	1	1	0	0	2	6	6	4	4	5	10	4	10	10	32	342	300
3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	4	1	0	2	5	16	54	1296	1269
4	0	0	1	0	2	2	3	2	5	0	10	5	8	9	7	26	26	87	723	337
5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	4	1	0	10	292	339
6	1	5	0	2	8	3	3	2	3	3	5	2	6	5	11	15	25	87	661	233
7	0	1	1	2	3	5	18	13	20	24	22	37	46	38	57	67	81	144	526	106
8	0	1	6	15	12	42	58	68	63	87	77	98	100	125	114	128	135	163	405	101
9	0	0	0	0	3	2	1	4	6	7	8	11	14	15	13	12	12	31	197	135
10	0	0	0	0	3	7	5	6	6	5	8	7	11	9	5	10	15	34	126	76
11	0	1	2	8	27	41	53	55	67	67	75	50	54	71	62	65	64	62	158	65
12	1	18	76	53	94	84	72	63	63	47	45	41	33	41	29	26	27	33	107	29
13	0	33	105	261	329	406	424	388	296	251	202	171	131	106	91	69	78	60	191	21
14	22	261	679	763	588	443	309	240	160	119	64	58	34	27	23	25	22	34	94	6
15	26	197	270	308	393	320	287	164	125	74	46	41	27	22	25	28	18	48	101	6

Fig.8.7 – Rappresentazione del rapporto tra irradianza diffusa ed irradianza globale sul piano orizzontale (K'_d) e del tipo di cielo CIE.

Dai risultati ottenuti si evince che solo l'indice di cielo S_i varia in maniera crescente al variare del tipo di cielo CIE. I dati ottenuti sono stati inseriti nel software "DATAFIT" al fine di valutare la curva che meglio interpola i punti e quindi sfruttare tale curva in modo che, al variare del parametro S_i , per ogni distribuzione si possa valutare il tipo di cielo e quindi riapplicare il modello CIE e calcolare le luminanze.

In Fig. 8.8 è riportata la curva di interpolazione.

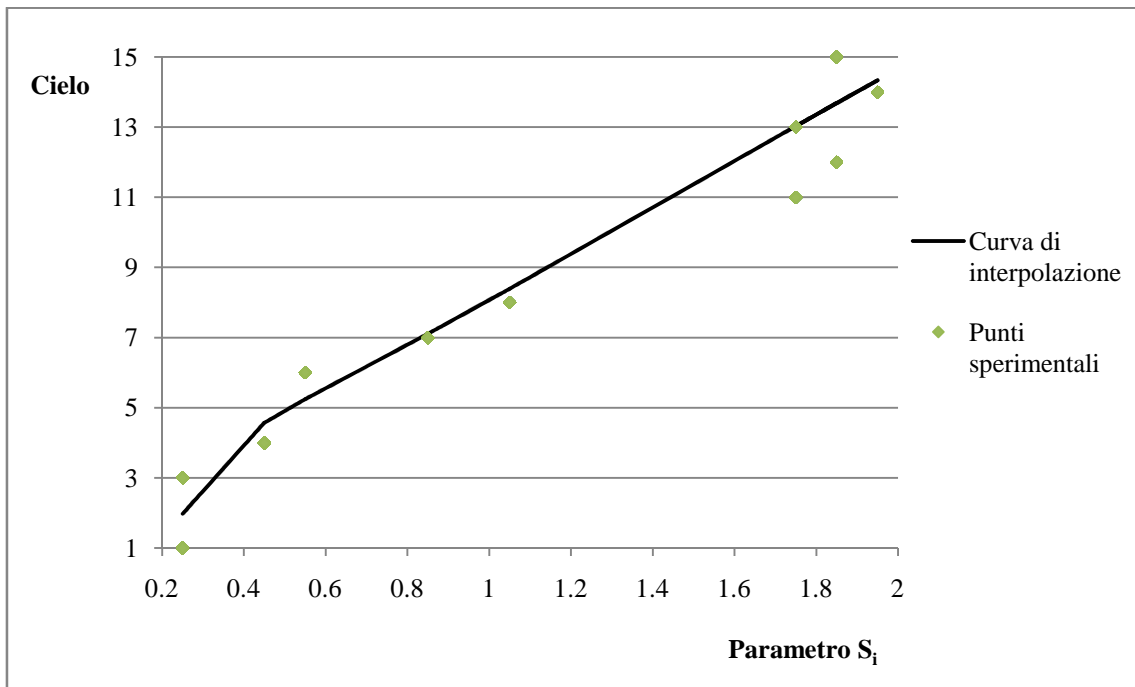


Fig. 8.8 Curva di interpolazione.

E' stata ottenuta una correlazione empirica utilizzando i dati di luminanza misurati ad Osaka nel 2007. Il tipo di cielo CIE (da 1 a 15) viene determinato come il numero intero più vicino al numero reale N calcolato con la seguente correlazione (8.1):

- per $S_i \leq 0.2$: $N=1$
- per $S_i > 0.2$:

$$N = 14.558344 + 6.9639239 \ln^2(S_i) - \frac{6.4914481}{S_i} \quad (8.1)$$

- per $N > 15$: $N=15$

8.3 Modello CIE – S_i C.

Il modello CIE - S_i C consiste nel riordinare i tipi di cielo CIE ponendo i valori della costante c in ordine crescente con il parametro S_i (Tab.8.2). L'applicazione del modello prevede quindi una successione alterata dei cieli CIE. Il primo step del calcolo consiste nella valutazione di N con l'equazione (8.1) ed il secondo step consiste nella determinazione del tipo di cielo CIE utilizzando la corrispondenza della Tabella 8.2. Dalla tabella si può notare, ad esempio, che il tipo di cielo 3 si ottiene quando N è pari a 2.

Tab.8.2 – Riordino dei 15 tipi di cielo CIE per valori crescenti della costante c (CIE- S_i C).

Tipo di cielo ricavato dall'equazione del modello CIE - S_i B	Tipo di cielo da applicare nel modello CIE - S_i C	a	b	c	d	e
1	1	4,00	-0,70	0,00	-1,00	0,00
2	3	1,1	-0,80	0,00	-1,00	0,00
3	5	0,0	-1,00	0,00	-1,00	0,00
4	2	4,0	-0,70	2,00	-1,50	0,15
5	4	1,10	-0,80	2,00	-1,50	0,15
6	6	0,00	-1,00	2,00	-1,50	0,15
7	9	-1,00	-0,55	2,00	-1,50	0,15
8	7	0,00	-1,00	5,00	-2,50	0,30
9	10	-1,00	-0,55	5,00	-2,50	0,30
10	8	0,00	-1,00	10,00	-3,00	0,45
11	11	-1,00	-0,55	10,00	-3,00	0,45
12	12	-1,00	-0,32	10,00	-3,00	0,45
13	13	-1,00	-0,32	16,00	-3,00	0,30
14	14	-1,00	-0,15	16,00	-3,00	0,30
15	15	-1,00	-0,15	24,00	-2,80	0,15

9. NUOVA METODOLOGIA DI CONFRONTO DEI MODELLI.

Nel capitolo seguente viene spiegata una diversa metodologia di confronto dei dati sperimentali e calcolati.

9.1 Generalità.

Si affronta un nuovo metodo di confronto che prevede uno stesso set di dati sul quali ogni modello viene valutato. La metodologia prevede che, data una certa località, ai suoi dati vengono applicati i diversi modelli e calcolato un errore non più relativo ma assoluto (9.1):

$$\mathcal{E}_{\text{assoluto}} = Lp_{\text{calcolato}} - Lp_{\text{sperimentale}} \quad (9.1)$$

Per ogni distribuzione quindi si avrà un diverso valore dell'errore medio (9.2) e dell'RMS (9.3):

$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{\sum_{31}^{145} \mathcal{E}_{\text{assoluto}, i}}{115} \quad (9.2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{31}^{145} (\mathcal{E}_{\text{assoluto}, i})^2}{115}} \quad (9.3)$$

Nell'equazioni (9.2) e (9.3) la sommatoria comprende solo i punti del cielo aventi $\alpha > 6^\circ$ (le motivazioni sono state già esposte nei capitoli precedenti).

Calcolati gli RMS di ogni distribuzione con i diversi modelli, la nuova metodologia di calcolo prevede lo scarto di quelle distribuzioni aventi un RMS medio tra quello di Igawa, Igawa a 20 tipi di cieli e CIE, minore di 6 kcd/m^2 , in tal modo si elidono le distribuzioni per le quali l'improvvisa variabilità del tempo può generare errori elevati. La scelta del limite 6 kcd/m^2 dipende dal fatto che, considerando un RMS medio pari a 2 kcd/m^2 , è noto che per una distribuzione gaussiana la quasi totalità dei dati (il 99%) è compreso nell'intorno della media di ampiezza 3 volte il valore della deviazione standard (6 kcd/m^2).

9.2 Risultati.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia espressa nel paragrafo 9.1 relativi ai dati della città di Osaka (anno 2007 (Tab.9.2) ed anno 2008 (Tab.9.3)) e della città di Arcavacata di Rende (anno 2008 (Tab.9.4)). I modelli confrontati durante questa fase di analisi sono il modello di Perez, il modello di Igawa, il modello di Igawa a 20 tipi di cielo, il modello CIE-S_i B, il modello CIE.

In Tab.9.1 è riportato il numero dei dati sperimentali di luminanza della città di Osaka riferiti a tutti i mesi del 2008. I dati relativi alla città di Osaka nell'anno 2007 ed alla città di Arcavacata di Rende nell'anno 2008 sono stati già riportati nel Capitolo 3.

Tab.9.1- Dati di Osaka 2008 (Giappone).

Mese (2008)	N
Gennaio	166750
Febbraio	135815
Marzo	185150
Aprile	203780
Maggio	225170
Giugno	260475
Luglio	219535
Agosto	208840
Settembre	190440
Ottobre	163875
Novembre	147430
Dicembre	159390
Totale	2266650

Tab.9.2- Risultati relativi alla città di Osaka anno 2007.

	Perez		Igawa		Igawa - 20 cieli		CIE-S _i B		CIE		N
	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	
Gennaio	0.893	2.811	-0.57	2.452	-0.569	2.455	-0.136	2.338	-0.106	1.711	1437
Febbraio	0.837	2.624	-0.507	2.282	-0.513	2.292	-0.114	2.17	-0.096	1.705	1313
Marzo	0.78	2.778	-0.503	2.569	-0.505	2.565	-0.081	2.526	-0.09	1.97	1556
Aprile	0.21	3.03	-0.314	2.508	-0.312	2.513	-0.068	2.697	-0.122	1.967	1681
Maggio	-0.147	3.078	-0.365	2.532	-0.367	2.538	-0.046	2.71	-0.107	2.041	1767
Giugno	-0.819	3.219	-0.536	2.449	-0.543	2.449	0	2.519	-0.078	1.886	2074
Luglio	-0.765	2.709	-0.575	2.207	-0.579	2.207	-0.004	2.376	-0.087	1.706	2140
Agosto	0.133	3.561	-0.803	3.072	-0.809	3.074	-0.025	3.003	-0.106	2.381	1710
Settembre	0.3	3.048	-0.68	2.907	-0.682	2.912	-0.053	2.906	-0.108	2.185	1445
Ottobre	0.391	2.555	-0.631	2.458	-0.628	2.458	-0.087	2.377	-0.096	1.795	1488
Novembre	0.425	2.27	-0.538	2.177	-0.542	2.187	-0.115	2.013	-0.086	1.493	1287
Dicembre	0.794	2.606	-0.512	2.103	-0.507	2.1	-0.144	1.967	-0.093	1.43	1506
Anno	0.172	2.884	-0.543	2.478	-0.545	2.481	-0.066	2.484	-0.097	1.866	19404

Tab.9.3 - Risultati relativi alla città di Osaka anno 2008.

	Perez		Igawa		Igawa - 20 cieli		CIE-S _i B		CIE		N
	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	
Gennaio	0.893	2.811	-0.57	2.452	-0.456	2.04	-0.095	2.004	-0.084	1.489	1437
Febbraio	0.837	2.624	-0.507	2.282	-0.471	2.376	-0.103	2.332	-0.08	1.771	1313
Marzo	0.78	2.778	-0.503	2.569	-0.459	2.471	-0.071	2.504	-0.098	1.923	1556
Aprile	0.21	3.03	-0.314	2.508	-0.417	2.274	-0.052	2.398	-0.103	1.818	1681
Maggio	-0.147	3.078	-0.365	2.532	-0.555	2.27	-0.034	2.44	-0.097	1.806	1767
Giugno	-0.819	3.219	-0.536	2.449	-0.473	2.177	0.027	2.525	-0.095	1.806	2074
Luglio	-0.765	2.709	-0.575	2.207	-0.781	2.905	0.046	2.946	-0.093	2.232	2140
Agosto	0.133	3.561	-0.803	3.072	-0.733	2.815	-0.014	2.898	-0.119	2.186	1710
Settembre	0.3	3.048	-0.68	2.907	-0.586	2.279	-0.054	2.312	-0.089	1.718	1445
Ottobre	0.391	2.555	-0.631	2.458	-0.558	2.113	-0.067	2.117	-0.092	1.576	1488
Novembre	0.425	2.27	-0.538	2.177	-0.523	2.174	-0.092	2.102	-0.087	1.586	1287
Dicembre	0.794	2.606	-0.512	2.103	-0.596	2.258	-0.121	2.069	-0.097	1.545	1506
Anno	0.172	2.884	-0.543	2.478	-0.555	2.36	-0.044	2.422	-0.095	1.811	19404

Tab.9.4 - Risultati relativi alla città di Arcavacata di Rende anno 2008 (marzo, aprile 2011).

	Perez		Igawa		Igawa - 20 cieli		CIE-S _i B		CIE		N
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	
Gennaio	1.091	2.627	0.088	2.16	0.123	2.117	-0.117	1.995	-0.074	1.505	1515
Febbraio	2.5	3.874	0.505	2.498	0.549	2.445	-0.116	2.225	-0.093	1.741	1192
Marzo	0.354	2.716	-0.074	2.866	-0.066	2.859	-0.116	2.786	-0.051	2.382	1159
Aprile	0.714	3.092	0.051	3.108	0.059	3.118	-0.040	3.094	-0.036	2.844	665
Maggio	0.471	3.269	-0.144	3.069	-0.146	3.065	-0.120	3.058	-0.100	2.398	1235
Giugno	0.106	4.134	-0.961	3.702	-0.975	3.719	-0.039	3.201	-0.086	2.606	1221
Luglio	0.402	3.325	-0.59	3.181	-0.599	3.184	-0.005	2.886	-0.029	2.267	657
Settembre	1.55	3.367	0.175	2.879	0.179	2.879	-0.115	2.843	-0.072	2.186	1309
Ottobre	1.553	3.385	-0.259	2.951	-0.256	2.929	-0.174	2.657	-0.123	2.152	1148
Novembre	1.571	3.275	0.079	2.371	0.083	2.36	-0.149	2.323	-0.086	1.751	895
Dicembre	0.807	2.214	0.156	2.172	0.256	2.011	-0.104	1.943	-0.061	1.702	510
Anno	1.054	3.253	-0.085	2.818	-0.071	2.798	-0.105	2.641	-0.078	2.121	11506

In Tab.9.5 è riportata l'analisi su base annuale ottenuta dall'applicazione della procedura precedentemente spiegata.

Tab.9.5 – Riassunto analisi dati di Osaka (2007/2008) e di Arcavacata di Rende (2008/2011).

	Perez		Igawa		Igawa - 20 cieli		CIE-S _i B		CIE	
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]
Arcav.	1.054	3.253	-0.085	2.818	-0.071	2.798	-0.105	2.641	-0.078	2.121
Osaka 2008	0.168	2.865	-0.554	2.359	-0.555	2.360	-0.044	2.422	-0.095	1.811
Osaka 2007	0.172	2.884	-0.543	2.478	-0.545	2.481	-0.066	2.484	-0.097	1.866

Da Tab. 9.5 si evince che i migliori risultati si ottengono sempre dall'applicazione del modello CIE ma, come ribadito varie volte, per essere applicato è necessaria la disposizione dei dati sperimentali. Inoltre i risultati ottenuti dal modello CIE-S_i B sono confrontabili con quelli ottenibili con il modello di Igawa (sia originale, sia quello a 20 tipi di cielo).

10. NUOVA METODOLOGIA DI CORREZIONE DEI DATI SPERIMENTALI.

Nel capitolo seguente viene spiegata una diversa metodologia di correzione dei dati sperimentali.

10.1 Generalità.

Nelle analisi precedentemente esposte, i dati sperimentali sono corretti tenendo conto che, poiché i sensori di luminanza e di radianza hanno un'apertura di 11° , quando la distanza angolare tra la posizione del sole ed un punto di misura ha un valore inferiore a 5.5° , i valori di luminanza e di radianza risultano molto alti nelle giornate serene, essendo influenzati dalla radiazione diretta del sole, per questo motivo, il loro valore viene sostituito dal valore massimo di luminanza e di radianza misurato nella stessa scansione. In questa seconda metodologia, invece, la correzione delle luminanze sperimentali tiene conto del limite massimo di misurazione (50 kcd/m^2), imponendo il valore di 50 kcd/m^2 nell'eventualità lo stesso venga superato. Oltre il valore limite, infatti, si parla di saturazione del sensore, il quale non fornisce misure attendibili in quanto si perde la linearità tra ingresso ed uscita.

Inoltre sono stati eliminati i punti con una distanza dal sole inferiore ai 18° , in quanto è stato osservato sperimentalmente che, per distanze inferiori ai 18° , la luminanza è influenzata dalla luce diretta [43].

10.2 Risultati.

L'analisi è stata applicata ai dati della città di Arcavacata (anno 2008 e 2012), della città di Osaka (anno 2007 e 2008), della città di Pamplona (anno 2008), della città di Lione (anno 2005). I dati sperimentali a disposizione sono stati confrontati con i seguenti modelli: modello di Perez, modello di Igawa, modello CIE-Si A, modello CIE-Si B, modello CIE-Si C, modello CIE. Anche in questo caso, il confronto è stato sviluppato in termini di errore relativo medio e corrispettivo valore di RMS. Inoltre, durante l'analisi non è stato scartato nessun dato, se non quelli aventi altezza solare α minore di 6° , questo al fine di garantire un confronto a pari dataset. I risultati ottenuti sono riportati in Tab.10.1, Tab.10.2, Tab.10.3, Tab.10.4, Tab.10.5, Tab.10.6. In Tab.10.7 l'analisi è riportata su base annuale.

Tab. 10.1 – Analisi dati relativi alla città di Arcavacata di Rende 2008.

	Perez		Igawa		CIE		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N dist
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Gen.	0.520	1.634	0.273	1.541	0.087	0.987	0.127	1.314	0.042	1.424	0.027	1.402	174903	1592
Feb.	1.062	2.038	0.600	1.882	0.145	1.005	0.180	1.335	0.057	1.528	0.052	1.525	136668	1248
Mag.	0.251	2.120	0.047	2.088	0.674	1.684	0.825	2.038	0.795	2.146	0.760	2.136	265728	2441
Giu.	-0.321	2.439	-0.539	2.377	0.363	1.689	0.479	2.034	0.461	2.074	0.431	2.053	143524	1319
Lug.	0.172	1.552	-0.040	1.455	0.416	1.077	0.523	1.340	0.536	1.370	0.532	1.357	73573	669
Set.	0.856	2.280	0.491	2.195	0.191	1.450	0.289	1.938	0.230	1.937	0.227	1.906	149090	1368
Ott.	0.544	1.996	0.121	1.809	0.149	1.199	0.248	1.611	0.188	1.572	0.180	1.558	130199	1191
Nov.	0.506	1.711	0.252	1.692	0.085	1.127	0.115	1.468	0.039	1.552	0.031	1.543	99634	912
Dic.	0.667	1.529	0.415	1.426	0.181	0.877	0.156	1.082	0.067	1.273	0.064	1.261	64399	586
Anno	0.453	1.989	0.163	1.902	0.295	1.310	0.380	1.665	0.323	1.744	0.307	1.728	1237718	11326

Tab. 10.2 – Analisi dati relativi alla città di Arcavacata di Rende 2012.

	Perez		Igawa		CIE		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N dist
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Giu.	1.626	2.710	1.318	2.586	0.604	1.394	0.634	1.551	0.511	1.635	0.514	1.641	184629	1698

Tab. 10.3 – Analisi dati relativi alla città di Osaka 2007.

	Perez		Igawa		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N distribuzioni
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Gen.	-0.099	1.414	-0.332	1.384	0.097	1.269	0.059	1.344	0.034	1.303	195775	1788
Feb.	-0.085	1.560	-0.357	1.533	0.099	1.418	0.063	1.484	0.062	1.490	191504	1754
Mar.	0.001	1.715	-0.301	1.646	0.182	1.585	0.157	1.740	0.132	1.723	232009	2130
Apr.	-0.352	1.959	-0.250	1.775	-0.015	1.761	0.001	1.871	0.007	1.907	244711	2248
Mag.	-0.171	1.833	-0.092	1.631	0.268	1.672	0.298	1.782	0.242	1.777	269683	2480
Giu.	-0.651	2.286	-0.334	1.899	0.201	1.876	0.236	1.994	0.211	2.005	273062	2505
Lug.	-0.788	2.214	-0.341	1.865	0.173	1.835	0.178	1.982	0.109	2.034	276822	2544
Ago.	-0.248	1.976	-0.488	1.898	0.256	1.843	0.298	1.944	0.238	1.933	261826	2406
Set.	-0.161	2.209	-0.463	2.248	0.177	2.196	0.236	2.294	0.145	2.265	225800	2074
Ott.	-0.119	1.695	-0.413	1.706	0.127	1.623	0.117	1.726	0.069	1.710	213908	1961
Nov.	-0.075	1.434	-0.369	1.450	0.098	1.310	0.061	1.405	0.049	1.365	188126	1720
Dic.	-0.051	1.320	-0.327	1.322	0.036	1.235	-0.014	1.301	-0.025	1.273	190288	1736
Anno	-0.259	1.840	-0.336	1.719	0.149	1.664	0.152	1.770	0.115	1.766	2763514	25346

Tab. 10.4 – Analisi dati relativi alla città di Osaka 2008.

	Perez		Igawa		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N dist
	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ε [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Gen.	-0.041	1.390	-0.306	1.358	0.071	1.294	-0.002	1.477	-0.006	1.462	194209	1774
Feb.	-0.103	2.345	-0.439	2.378	0.032	2.322	-0.060	2.543	-0.071	2.535	190959	1749
Mar.	-0.045	1.712	-0.277	1.634	0.154	1.588	0.117	1.710	0.110	1.706	233332	2142
Apr.	-0.343	1.865	-0.272	1.584	0.134	1.562	0.135	1.712	0.148	1.718	246507	2264
Mag.	-0.361	1.677	-0.434	1.457	0.125	1.386	0.167	1.582	0.106	1.563	272382	2504
Giu.	-0.545	1.940	-0.402	1.681	0.068	1.738	0.131	1.981	0.008	1.954	273172	2506
Lug.	-0.401	2.028	-0.538	1.902	0.247	1.840	0.336	1.977	0.271	1.931	276698	2543
Ago.	-0.347	2.195	-0.578	2.164	0.171	2.111	0.219	2.250	0.131	2.206	261175	2400
Set.	-0.179	1.945	-0.481	1.920	0.114	1.853	0.143	1.978	0.098	1.949	233222	2142
Ott.	-0.135	1.581	-0.476	1.557	0.079	1.454	0.074	1.615	0.059	1.600	199345	1827
Nov.	-0.108	1.398	-0.405	1.422	0.068	1.340	0.007	1.477	-0.002	1.455	183772	1680
Dic.	-0.113	1.299	-0.413	1.322	0.071	1.176	-0.018	1.344	-0.034	1.326	189849	1732
Anno	-0.248	1.805	-0.422	1.709	0.117	1.654	0.119	1.819	0.078	1.798	2754622	25263

Tab. 10.5 – Analisi dati relativi alla città di Pamplona 2008.

	Perez		Igawa		CIE		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N dist
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Gen	0.575	1.885	0.447	1.366	0.303	0.866	0.359	1.277	0.333	1.295	0.321	1.318	176936	1605
Feb	0.477	1.490	0.165	1.272	0.122	1.023	0.156	1.276	0.153	1.418	0.106	1.411	98233	898
Mar	0.505	2.010	0.176	1.805	0.214	1.483	0.153	1.804	0.172	1.948	0.136	1.951	165410	1517
Apr	0.623	2.192	0.269	2.014	0.296	1.664	0.279	2.030	0.259	2.144	0.208	2.148	227007	2085
Mag	0.399	2.283	0.216	2.101	0.253	1.782	0.247	2.149	0.267	2.308	0.215	2.313	282498	2594
Giu	0.480	2.181	0.295	1.989	0.314	1.680	0.314	1.988	0.317	2.129	0.258	2.094	288996	2656
Lug	0.787	2.009	0.425	1.762	0.458	1.495	0.455	1.763	0.440	1.870	0.395	1.866	285800	2626
Ago	0.780	2.001	0.399	1.762	0.410	1.469	0.411	1.744	0.416	1.884	0.355	1.858	264608	2430
Set	0.698	2.037	0.291	1.860	0.286	1.463	0.283	1.848	0.264	2.016	0.223	1.994	232639	2134
Ott	0.496	1.561	0.182	1.413	0.171	1.155	0.166	1.409	0.144	1.531	0.124	1.524	201175	1840
Nov	0.357	1.214	0.139	1.115	0.152	0.898	0.121	1.099	0.074	1.221	0.071	1.206	180957	1647
Dic	0.183	1.016	0.093	0.964	0.064	0.740	0.064	0.946	0.047	0.996	0.042	0.979	174637	1580
Anno	0.549	1.892	0.273	1.687	0.275	1.377	0.271	1.683	0.263	1.805	0.224	1.795	2578896	23612

Tab. 10.6 – Analisi dati relativi alla città di Lione 2005.

	Perez		Igawa		CIE		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C		N	N dist
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]		
Set.	-0.286	2.122	-0.874	2.236	-0.700	1.731	-0.630	1.999	-0.629	2.018	-0.628	2.027	33539	308
Ott.	0.029	1.427	-0.133	1.360	-0.245	1.221	-0.211	1.430	-0.182	1.642	-0.199	1.575	6322	58
Nov.	0.066	0.587	0.111	0.450	-0.181	0.464	-0.164	0.510	-0.153	0.641	-0.157	0.582	5087	46
Dic.	-0.401	1.192	-0.544	1.179	-0.556	0.975	-0.505	1.102	-0.535	1.100	-0.546	1.095	14047	127
Anno	-0.249	1.697	-0.633	1.740	-0.573	1.390	-0.516	1.599	-0.518	1.644	-0.522	1.636	58995	539

Tab. 10.7 – Analisi su base annuale.

	Perez		Igawa		CIE-Si A		CIE-Si B		CIE-Si C	
	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]	ϵ [kcd/m ²]	RMS [kcd/m ²]
Arcav.2008	0.453	1.989	0.163	1.902	0.38	1.665	0.323	1.744	0.307	1.728
Osaka 2007	-0.259	1.84	-0.336	1.719	0.149	1.664	0.152	1.77	0.115	1.766
Osaka 2008	-0.248	1.805	-0.422	1.709	0.117	1.654	0.119	1.819	0.078	1.798
Pamplona 2008	0.345	1.944	0.09	1.771	0.284	1.765	0.274	1.897	0.233	1.889
Lione 2005	-0.249	1.697	-0.633	1.74	-0.516	1.599	-0.518	1.644	-0.522	1.636

In Fig.10.1 è mostrato il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli precedentemente definiti per la città di Arcavacata di Rende (anno 2008).

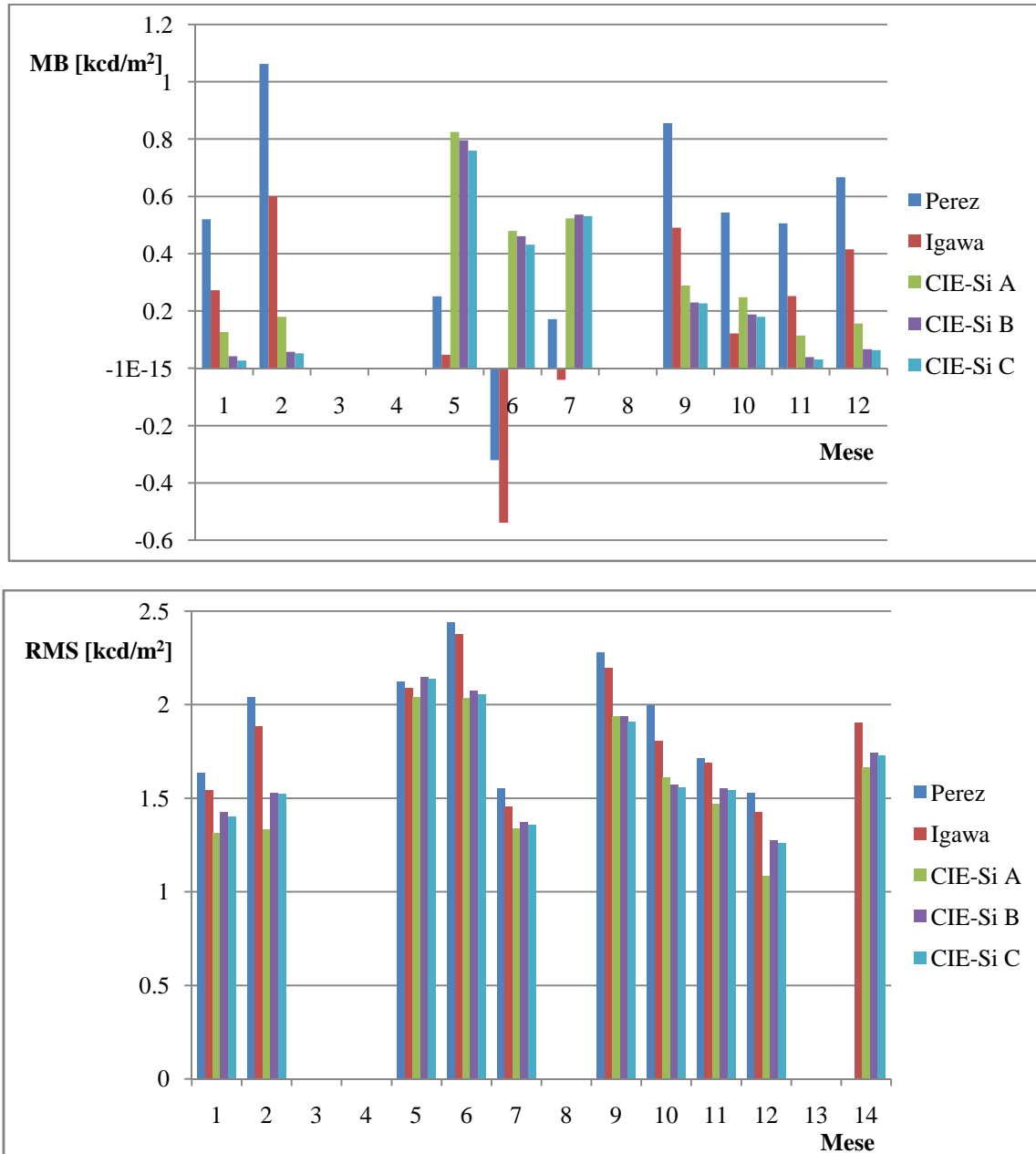


Fig. 10.1 - Confronto modelli per la città di Arcavacata di Rende (anno 2008).

Da Fig. 10.1 si evince che i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo di Igawa; al secondo posto viene il metodo CIE-S_i C, al terzo il modello CIE-S_i B, al quarto il modello CIE-S_i A e al quinto il metodo di Perez, i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i A.

I valori medi annuali (Tab.10.1) sono:

- modello di Perez: MB= 0.453 kcd/m² ed RMS=1.989 kcd/m²;
- modello di Igawa: MB= 0.163 kcd/m² ed RMS=1.902 kcd/m²;
- modello CIE-S_i A: MB= 0.380 kcd/m² ed RMS=1.665 kcd/m²;
- modello CIE-S_i B: MB= 0.323 kcd/m² ed RMS=1.744 kcd/m²;
- modello CIE-S_i C: MB= 0.307 kcd/m² ed RMS=1.728 kcd/m².

In Fig.10.2 è mostrato il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli precedentemente definiti per la città di Osaka (anno 2007).

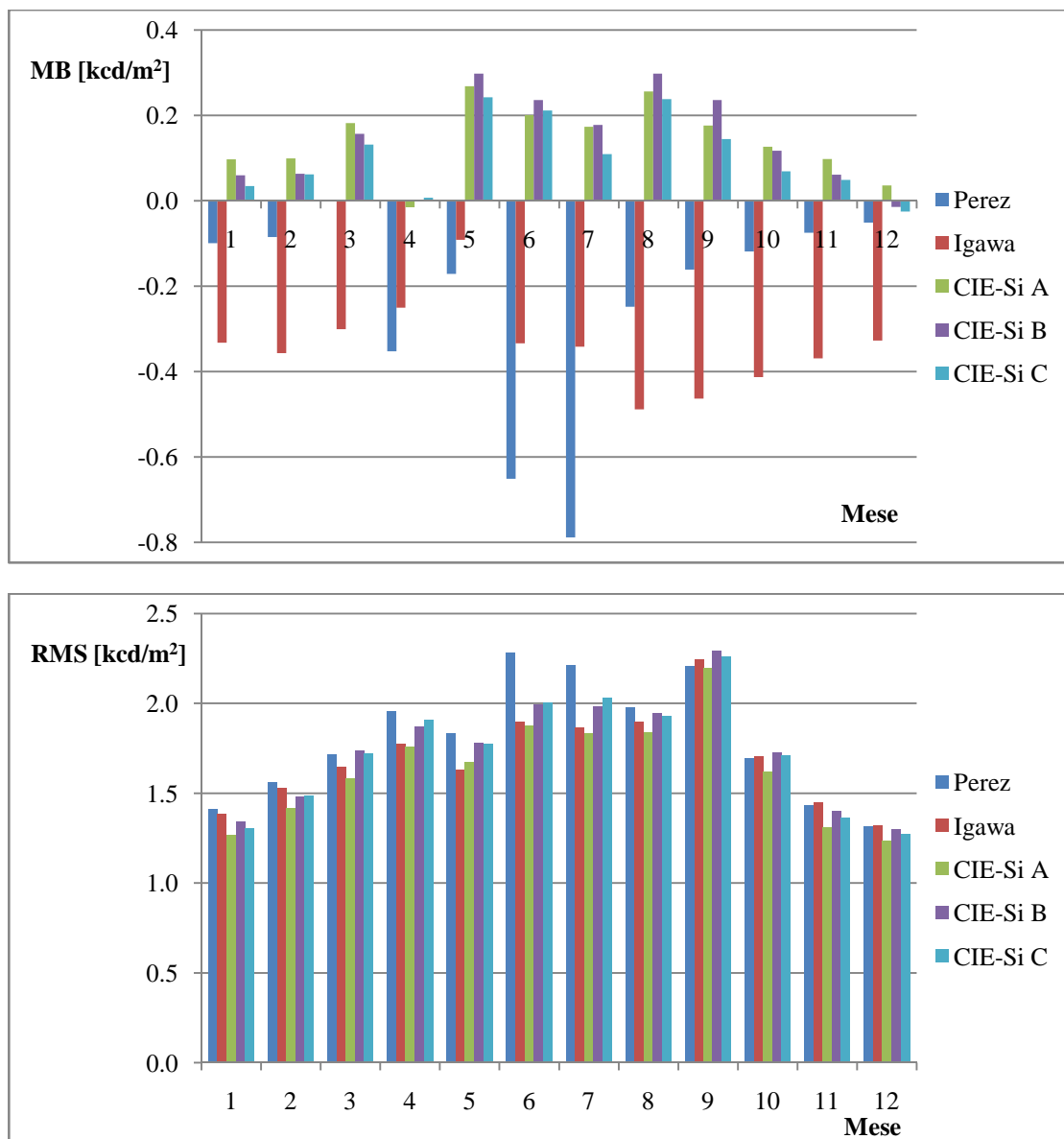


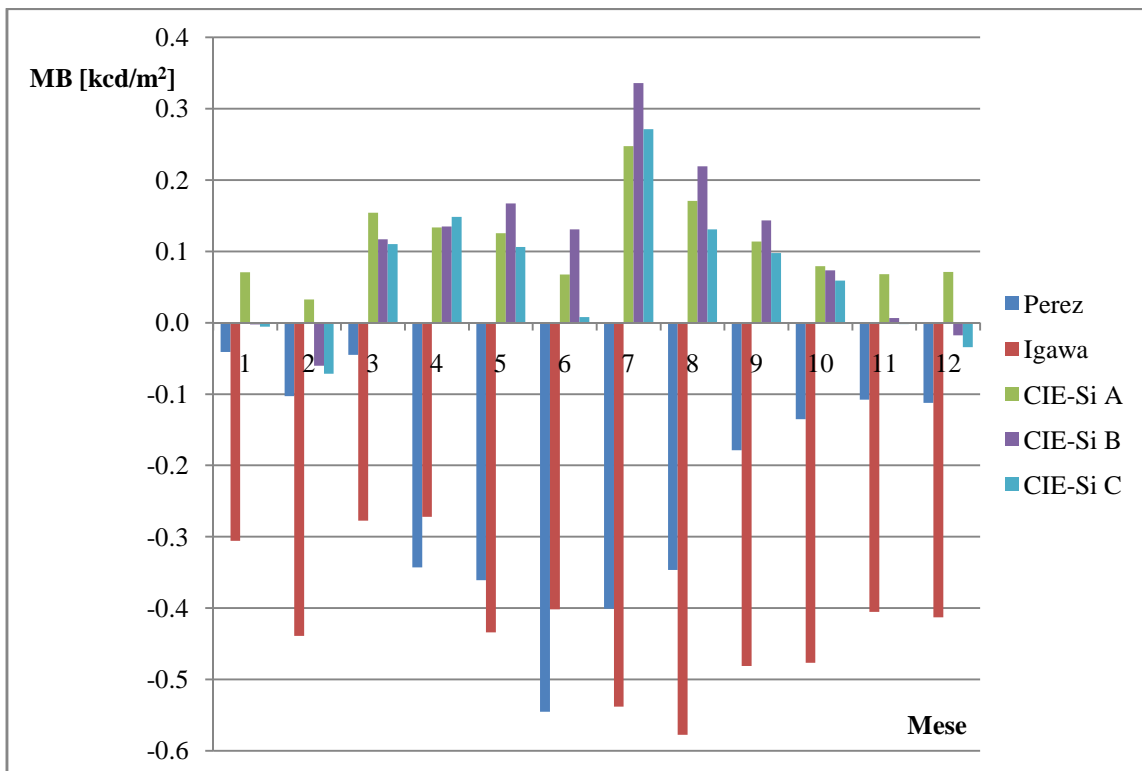
Fig. 10.2 - Confronto modelli per la città di Osaka (anno 2007).

Da Fig. 10.2 si evince che i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i C; al secondo posto viene il metodo CIE-S_i A, al terzo il modello CIE-S_i B, al quarto il modello di Perez e al quinto il metodo di Igawa, i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i A.

I valori medi annuali (Tab.10.1) sono:

- modello di Perez: MB= -0.259 kcd/m² ed RMS=1.840 kcd/m²;
- modello di Igawa: MB= -0.336 kcd/m² ed RMS=1.719 kcd/m²;
- modello CIE-S_i A: MB= 0.149 kcd/m² ed RMS=1.664 kcd/m²;
- modello CIE-S_i B: MB= 0.152 kcd/m² ed RMS=1.770 kcd/m²;
- modello CIE-S_i C: MB= 0.115 kcd/m² ed RMS=1.766 kcd/m².

In Fig.10.3 è mostrato il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli precedentemente definiti per la città di Osaka (anno 2008).



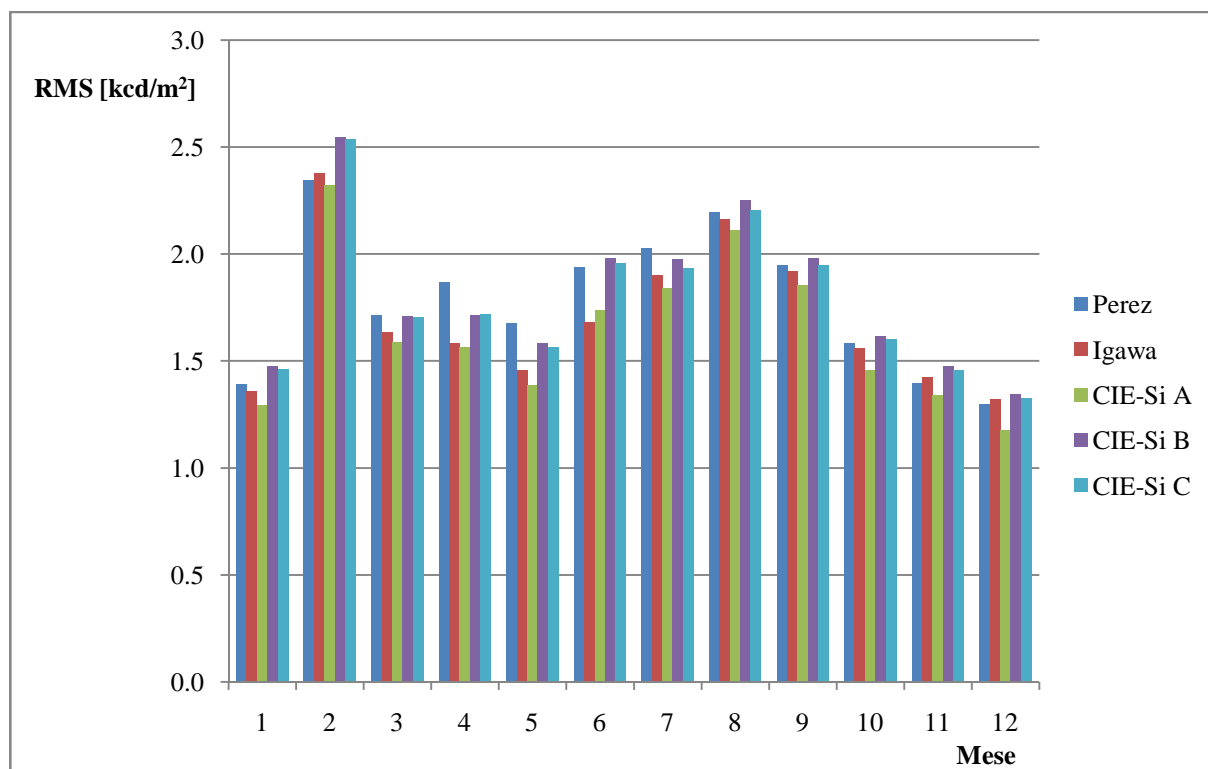


Fig. 10.3 - Confronto modelli per la città di Osaka (anno 2008).

Da Fig. 10.3 si evince che i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i C; al secondo posto viene il metodo CIE-S_i A, al terzo il modello CIE-S_i B, al quarto il modello di Perez e al quinto il metodo di Igawa, i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i A.

I valori medi annuali (Tab.10.1) sono:

- modello di Perez: MB= -0.248 kcd/m² ed RMS=1.805 kcd/m²;
- modello di Igawa: MB= -0.422 kcd/m² ed RMS=1.709 kcd/m²;
- modello CIE-S_i A: MB= 0.117 kcd/m² ed RMS=1.654 kcd/m²;
- modello CIE-S_i B: MB= 0.119 kcd/m² ed RMS=1.819 kcd/m²;
- modello CIE-S_i C: MB= 0.078 kcd/m² ed RMS=1.798 kcd/m².

In Fig.10.4 è mostrato il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli precedentemente definiti per la città di Pamplona (anno 2008).

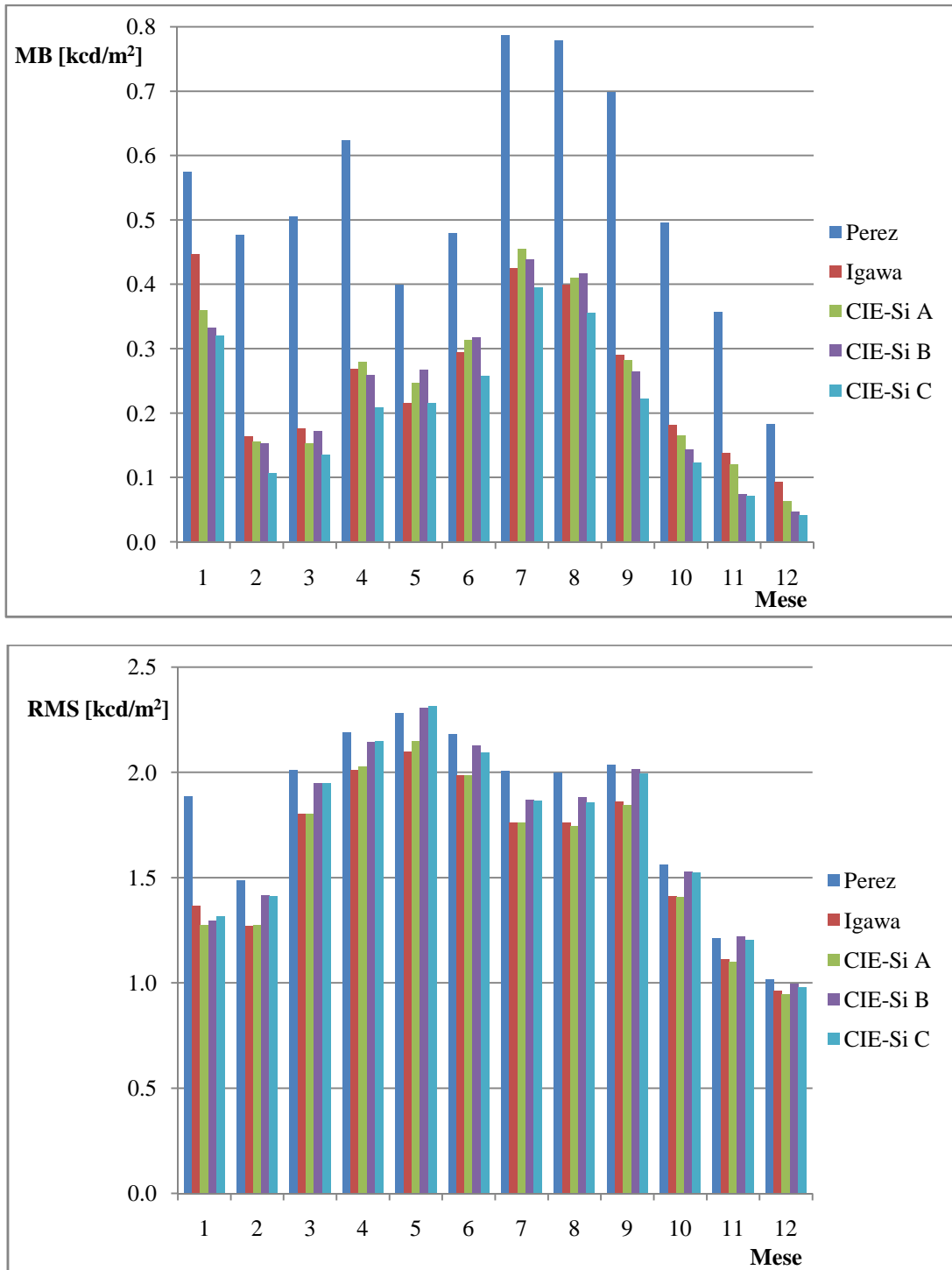


Fig. 10.4 - Confronto modelli per la città di Pamplona (anno 2008).

Da Fig. 10.4 si evince che i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i C; al secondo posto viene il metodo CIE-S_i B, al terzo il modello CIE-S_i A, al quarto il modello di Igawa e al quinto il metodo di Perez, i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i A.

I valori medi annuali (Tab.10.1) sono:

- modello di Perez: MB= 0.549 kcd/m² ed RMS=1.892 kcd/m²;
- modello di Igawa: MB= 0.273 kcd/m² ed RMS=1.687 kcd/m²;
- modello CIE-S_i A: MB= 0.271 kcd/m² ed RMS=1.683 kcd/m²;
- modello CIE-S_i B: MB= 0.263 kcd/m² ed RMS=1.805 kcd/m²;
- modello CIE-S_i C: MB= 0.224 kcd/m² ed RMS=1.795 kcd/m².

In Fig.10.5 è mostrato il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli precedentemente definiti per la città di Lione (anno 2005).

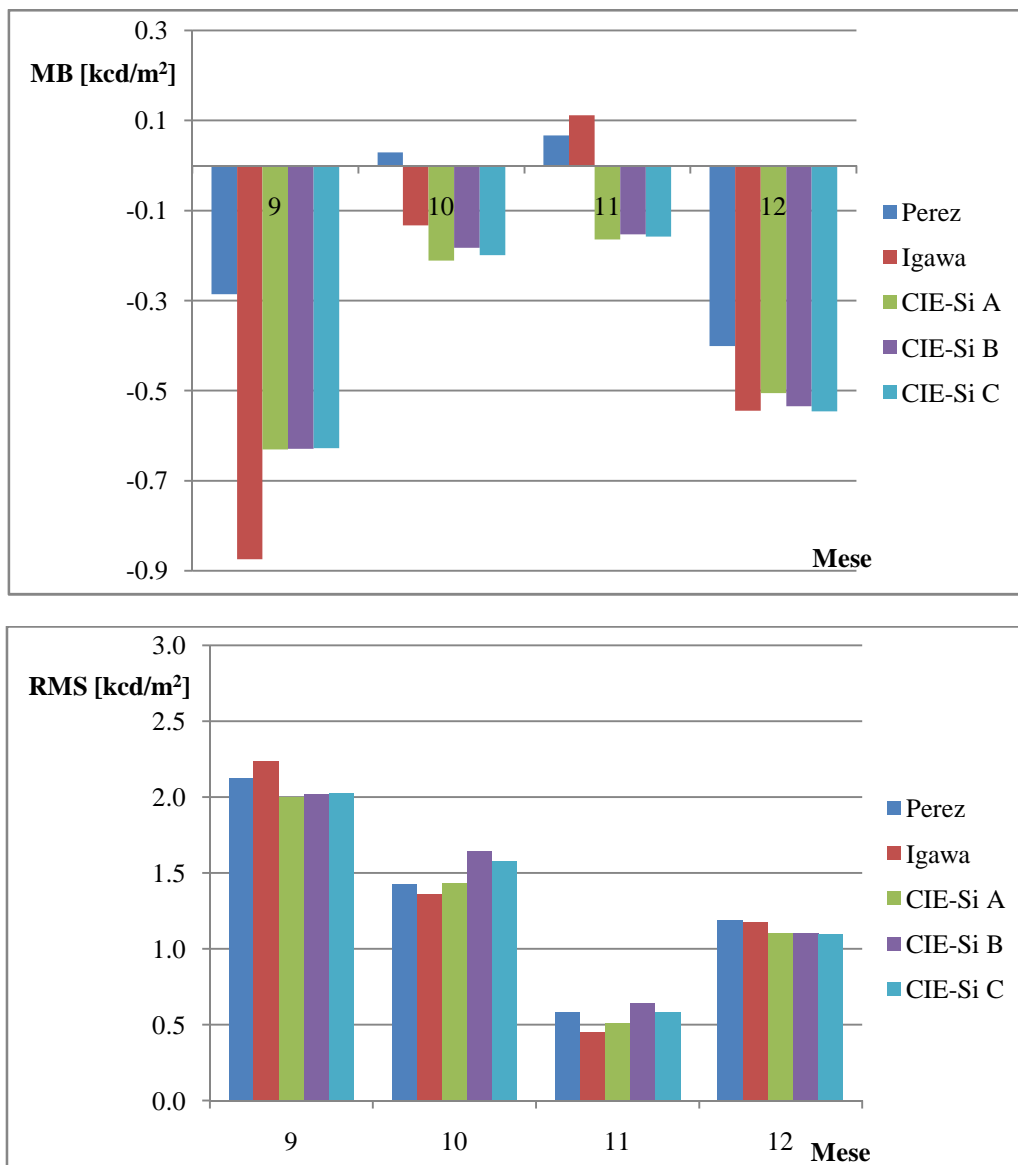


Fig. 10.5 - Confronto modelli per la città di Lione (anno 2005).

Da Fig. 10.5 si evince che i valori di MB più piccoli sono presentati dal metodo di Perez; al secondo posto viene il metodo CIE-S_i A, al terzo il modello CIE-S_i B, al quarto il modello CIE-S_i C e al quinto il metodo di Igawa, i valori di RMS più piccoli sono presentati dal metodo CIE-S_i A.

I valori medi annuali (Tab.10.1) sono:

- modello di Perez: MB= -0.249 kcd/m² ed RMS=1.697 kcd/m²;
- modello di Igawa: MB= -0.633 kcd/m² ed RMS=1.740 kcd/m²;
- modello CIE-S_i A: MB= -0.516 kcd/m² ed RMS=1.599 kcd/m²;
- modello CIE-S_i B: MB= -0.518 kcd/m² ed RMS=1.644 kcd/m²;
- modello CIE-S_i C: MB= -0.522 kcd/m² ed RMS=1.636 kcd/m².

Il confronto con i dati sperimentali indica che i modelli CIE-S_i A, CIE-S_i B e CIE-S_i C dimostrano una buona capacità di predire i dati di luminanza: i risultati ottenuti, in termini di errore medio e di errore quadratico medio, sono spesso migliori di quelli ottenuti con i modelli di Igawa e di Perez. Inoltre, poiché essi sono di più facile applicazione rispetto agli altri modelli, possono essere usati come un metodo approssimato, ma particolarmente semplice ed efficace, per calcolare la luminanza utilizzando i 15 cieli CIE.

CONCLUSIONI.

Il tema principale del presente lavoro di tesi è quello di verificare l'accuratezza dei modelli di calcolo della luminanza del cielo. Per far ciò è stato necessario avere a disposizione un numero abbastanza consistente di dati sperimentali. Sono state ottenute misure di luminanza del cielo nella città di Osaka (Giappone), nella città di Arcavacata di Rende (Italia), nella città di Lione (Francia) e nella città di Pamplona (Spagna), ricavate per mezzo di uno Sky Scanner il quale effettua, con una frequenza di 10 minuti, la scansione dei valori di luminanza e radianza della volta celeste in 145 punti (cielo di Tregenza).

Gli studi condotti nel presente lavoro possono essere suddivisi in due fasi: nella prima fase è stato affrontato uno studio approfondito, al fine di verificare quale tra i modelli di calcolo della luminanza del cielo più conosciuti in letteratura, il modello di Perez, il modello di Igawa ed il modello CIE, sia quello che predice al meglio la luminanza del cielo.

Nella seconda fase l'analisi è stata estesa ad altri due modelli, il modello di Igawa a 20 cieli, messo a punto per semplificare il modello originale di Igawa, ed i modelli CIE-S_i, sviluppati al fine di individuare il tipo di cielo CIE calcolabile con i dati di irraggiamento a disposizione. Durante la prima fase del presente lavoro, l'analisi è stata svolta confrontando luminanze calcolate e sperimentali in termini assoluti, relativi e zenitali. Dall'analisi si evince che gli errori più piccoli, sia per quanto riguarda lo scarto medio che lo scarto quadratico medio, sono forniti dal modello CIE. Tuttavia il metodo CIE non è un vero metodo di previsione della luminanza poiché esso non fornisce un criterio generale, sempre applicabile, per decidere a quale tipo di cielo bisogna fare riferimento in determinate circostanze meteorologiche, caratterizzate dai valori di irradianza, ed esso può essere usato solo se sono disponibili, in una data località, i valori sperimentali della luminanza, al contrario dei metodi di Perez e di Igawa, i quali calcolano le luminanze a partire dai dati di irradianza. Tra questi due ultimi, il più preciso, per il calcolo della luminanza assoluta e della luminanza zenitale, appare il metodo di Igawa, mentre il metodo di Perez risulta più preciso per il calcolo della luminanza relativa.

Inoltre, i dati misurati di luminanza, prima del loro confronto con i modelli, vanno corretti, ad ogni scansione, in modo che il valore di illuminamento sul piano orizzontale ottenuto per integrazione dei dati di luminanza sulla volta celeste siano uguali ai valori di illuminamento diffuso orizzontale misurato per mezzo di fotometri. Nel presente lavoro è stato proposto un metodo semiempirico per valutare gli errori MB ed RMS dei modelli di calcolo anche nel caso in cui non sia possibile correggere i valori della luminanza, per la mancanza delle misure

dell'illuminamento diffuso orizzontale. Dall'applicazione della metodologia proposta si ottengono valori medi annuali di MB e di RMS prossimi ai valori esatti.

Nella seconda parte del lavoro è stata verificata l'accuratezza anche del modello di Igawa a 20 cieli. L'analisi ha rilevato che i risultati ottenibili attraverso l'applicazione di quest'ultimo modello sono prossimi ai valori ottenibili con il modello di Igawa.

La seconda fase del presente lavoro ha avuto come obiettivo principale quello di individuare un metodo di calcolo del tipo di cielo CIE, in quanto l'applicazione dello stesso modello CIE necessita della conoscenza del tipo di cielo esistente tra 15 possibili, per ogni data distribuzione di luminanza. Il metodo proposto è basato sull'uso del parametro di cielo S_i di Igawa, funzione dell'irradianza globale e dell'irradianza diffusa sul piano orizzontale ed è presentato in tre varianti: il metodo CIE- S_i A, il metodo CIE- S_i B (sviluppato dall'Unità di Ricerca del PRIN 2008 del dipartimento di Ingegneria Meccanica presso l'Università della Calabria), il metodo CIE- S_i C.

La determinazione del tipo di cielo CIE può avvenire attraverso differenti metodologie esistenti in letteratura ma ognuna delle stesse, per poter essere applicata, necessita della conoscenza dei dati sperimentali di luminanza.

Le metodologie per il calcolo del tipo di cielo CIE sviluppate e pubblicate sono: calcolo della funzione indicatrice e della funzione gradiente, confronto L_z/D_v calcolato e standard, metodo di Tregenza.

I metodi sopra citati presentano, però, alcuni limiti nella loro applicazione.

Infatti, non è possibile stimare la funzione indicatrice quando l'altezza solare è maggiore di 45° ; quando l'altezza solare è maggiore di alcuni valori opportunamente stabiliti, la funzione gradiente non è calcolabile, in quanto non si ha a disposizione un numero sufficiente di dati; inoltre, esistono casi in cui la combinazione indicatrice/gradiente non è definita dalla classificazione CIE.

Infine, quando l'altezza solare è maggiore di 35° le curve standard di L_z/D_v possono intersecarsi e quindi non è possibile definire un unico tipo di cielo.

Le misure di luminanza del cielo rilevate nel corso di due anni ad Osaka (Giappone), nel corso di un anno ad Arcavacata di Rende (Italia), a Pamplona (Spagna) ed a Lione (Francia), sono state confrontate con il modello di Perez, il modello di Igawa, il metodo CIE, e con le tre nuove applicazioni del metodo CIE proposte, CIE- S_i A, CIE- S_i B, CIE- S_i C.

Il confronto ha mostrato un buon accordo tra dati sperimentali e dati calcolati con i modelli CIE- S_i , inoltre i risultati ottenuti, in termini di errore medio e di errore quadratico medio, sono a volte migliori di quelli ottenuti con i modelli di Igawa e di Perez. Inoltre i modelli proposti

sono di più semplice applicazione rispetto ai modelli di Igawa e Perez, notevolmente più complessi.

APPENDICE

1.1 Calcolo dei valori di luminanza nel nuovo sistema di coordinate.

```

function [LuminanceNEW]=L_NEWmonth(skyElementsNEW,Luminance,elements)
n=find(elements(:,4)==180)
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==6
        for j=1:(n(1,1)-1)
            LuminanceNEW(1,j+3)=Luminance(1,n(1,1)-1+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(1,1)-1+j+3)=Luminance(1,j+3);
            LuminanceNEW(1,1)=Luminance(1,1);
            LuminanceNEW(1,2)=Luminance(1,2);
            LuminanceNEW(1,3)=Luminance(1,3);
        end
    end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==18
        for j=1:15
            LuminanceNEW(1,n(2,1)+1-j+3)=Luminance(1,30+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(2,1)+j+3)=Luminance(1,61-j+3);
        end
    end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==30
        for j=1:12
            LuminanceNEW(1,60+j+3)=Luminance(1,n(3,1)-1+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(3,1)-1+j+3)=Luminance(1,60+j+3);
        end
    end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==42
        for j=1:12
            LuminanceNEW(1,n(4,1)+1-j+3)=Luminance(1,84+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(4,1)+j+3)=Luminance(1,109-j+3);
        end
    end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==54
        for j=1:9
            LuminanceNEW(1,108+j+3)=Luminance(1,n(5,1)-1+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(5,1)-1+j+3)=Luminance(1,108+j+3);
        end
    end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==66
        for j=1:6

```



```

        LuminanceNEW(1,n(6,1)+1-j+3)=Luminance(1,126+j+3);
        LuminanceNEW(1,n(6,1)+j+3)=Luminance(1,139-j+3);
    end
end
end
for i=1:145
    if skyElementsNEW(i,2)==78
        for j=1:3
            LuminanceNEW(1,138+j+3)=Luminance(1,n(7,1)-1+j+3);
            LuminanceNEW(1,n(7,1)-1+j+3)=Luminance(1,138+j+3);
        end
    end
end
end
LuminanceNEW(1,148)=Luminance(1,148)
end

```

1.2 Calcolo dell'angolo A_z .

```

function [distanceangle]=distanceanglemonth(solarcoordinate,skyElementsNEW)
for i=1:145
    distanceangle(i+3)=abs(skyElementsNEW(i,3)-solarcoordinate(1,5));
    distanceangle(1,1)=solarcoordinate(1,1);
    distanceangle(1,2)=solarcoordinate(1,2);
    distanceangle(1,3)=solarcoordinate(1,3);
end
end

```

1.3 Calcolo dell'angolo χ .

```

function [chi]=chimonth(solarcoordinate,skyElementsNEW,distanceangle)
for i=1:145;
a=(90-solarcoordinate(1,4))*pi/180;
c(i)=(90-skyElementsNEW(i,2))*pi/180;
chi(i+3)=acos(cos(c(i))*cos(a)+sin(c(i))*sin(a)*cos(distanceangle(1,i+3)*pi/180))*180/pi;
chi(1,1)=solarcoordinate(1,1);
chi(1,2)=solarcoordinate(1,2);
chi(1,3)=solarcoordinate(1,3);
end
end

```

1.4 Calcolo della funzione indicatrice.

```

function [indicatrix]=indicatrixmonth(chi,LuminanceNEW)
[n2,n3,n4,n5,n6,n7]=dist_90(chi,LuminanceNEW)
for i=1:30
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n2(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n2(2,1);
    end
end
for i=31:60
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n3(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n3(2,1);
    end
end
for i=61:84
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n4(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n4(2,1);
    end
end
for i=85:108
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n5(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n5(2,1);
    end
end
for i=109:126
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n6(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n6(2,1);
    end
end
for i=127:138
    if chi(1,i+3)>chi(1,i+1+3)
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n7(1,1);
    else
        indicatrix(1,i+3)=LuminanceNEW(1,i+3)/n7(2,1);
    end
end
indicatrix(1,1)=LuminanceNEW(1,1);
indicatrix(1,2)=LuminanceNEW(1,2);
indicatrix(1,3)=LuminanceNEW(1,3);
end

```

1.5 Calcolo della funzione indicatrice sull'almucantar solare.

```

function
[Lsolaralmuc]=interpolationmonth(skyElementsNEW,elements,solarcoordinate,Lu
minanceNEW)
for i =1:145
    if skyElementsNEW(i,3)==0
        skyElementsNEW(i,3)=360;
    end
end
n=[6,18,30,42,54,66,78,90];
alm=[];
for i=1:8
    if (solarcoordinate(1,4)>n(i) & solarcoordinate(1,4)<n(i+1))
        cont=i;
        alm=[n(i) n(i+1)];
    end
end
for i=1:145;
    if elements(i,2)==alm(1,1)
        t(i)=skyElementsNEW(i,3);
        p(i)=LuminanceNEW(1,i+3);
    end
    if elements(i,2)==alm(1,2)
        t1(i)=skyElementsNEW(i,3);
        p1(i)=LuminanceNEW(1,i+3);
    end
end
tT=t';
pT=p';
t1T=t1';
p1T=p1';
i=find(tT(:)==0);j=find(pT(:)==0);o=find(t1T(:)==0);t=find(p1T(:)==0);
tT(i)=[];pT(j)=[];t1T(o)=[];p1T(t)=[];
r=[0:15:360];
    Linterpolate=interp1(tT,pT,r);
    Linterpolatel=interp1(t1T,p1T,r);
for i=1:25
    Linterp(i,1)=Linterpolate(i);
    Linterp(i,2)=Linterpolatel(i);
    Linterp(1,1)=pT(1,1);
    Linterp(1,2)=p1T(1,1);
end
for i=1:(size(Linterp,1))
Linterp(i,3)=(solarcoordinate(1,4)-alm(1,1))/(alm(1,2)-
alm(1,1))*(Linterp(i,2)-Linterp(i,1))+Linterp(i,1);
Linterp(:,4)=[0:15:360];
Linterp(:,5)=abs(Linterp(:,4)-solarcoordinate(1,5));
end
a=(90-solarcoordinate(1,4))*pi/180;
b=Linterp(:,5)*pi/180;
c=a;
chi=acos(cos(c)*cos(a)+sin(c)*sin(a).*cos(b))*180/pi;

```

```

for i=1:(size(Linterp,1))
Linterp(i,6)=chi(i);
end
for i=1:24
    if Linterp(i,6)>=90 & Linterp(i+1,6)<90
        n(1,1)=Linterp(i,6);
        n1(1,1)=Linterp(i,3);
    end
    if Linterp(i+1,6)<90 & Linterp(i,6)>90
        n(1,2)=Linterp(i+1,6);
        n1(1,2)=Linterp(i+1,3);
    end
    if Linterp(i,6)<=90 & Linterp(i+1,6)>90
        n(2,1)=Linterp(i,6);
        n1(2,1)=Linterp(i,3);
    end
    if Linterp(i+1,6)>90 & Linterp(i,6)<90
        n(2,2)=Linterp(i+1,6);
        n1(2,2)=Linterp(i+1,3);
    end
end
n2(1,1)=(90-n(1,1))/(n(1,2)-n(1,1))*(n1(1,2)-n1(1,1))+n1(1,1);
n2(2,1)=(90-n(2,2))/(n(2,1)-n(2,2))*(n1(2,1)-n1(2,2))+n1(2,2);
for i=1:24
    if Linterp(i,6)>Linterp(i+1,6)
        Linterp(i,7)= Linterp(i,3)/n2(1,1);
    else
        Linterp(i,7)=Linterp(i,3)/n2(2,1);
    end
    Linterp(25,7)=Linterp(25,3)/n2(2,1);
end
for i=1:25
Lsolaralmuc(1,i+3)=Linterp(i,7);
Lsolaralmuc(1,i+26+3)=Linterp(i,6);
Lsolaralmuc(1,1)=solarcoordinate(1,1);
Lsolaralmuc(1,2)=solarcoordinate(1,2);
Lsolaralmuc(1,3)=solarcoordinate(1,3);
end
end

```

1.6 Calcolo dell'angolo azimutale A_z .

```

function [abs]=distanceanglegrad(solarcoordinate,almucantar)
for i=1:16
    a=(90-solarcoordinate(1,4))*pi/180;
    b=(90-almucantar(i,1))*pi/180;
    abs(i+3)=acos((cos(a)-cos(a)*cos(b))/(sin(a)*sin(b)))*180/pi;
    abs=abs;
    abs(1,1)=solarcoordinate(1,1);
    abs(1,2)=solarcoordinate(1,2);

```

```

    abs(1,3)=solarcoordinate(1,3);
end
end

```

1.7 Calcolo dell'angolo azimutale per ogni punto con distanza angolare dal sole pari a Z_s .

```

function [point]=alfapoint(solarcoordinate,abs)
for i=1:8
    point(1,i*2-1+3)=abs(1,i*2-1+3)+solarcoordinate(1,5);
    point(1,i*2+3)=solarcoordinate(1,5)-abs(1,i*2-1+3);
    point(1,1)=solarcoordinate(1,1);
    point(1,2)=solarcoordinate(1,2);
    point(1,3)=solarcoordinate(1,3);
end
end

```

1.8 Calcolo della luminanza di ogni punto interpolato.

```

function [Lpointexact]=alfapointexact(point,skyElementsNEW,LuminanceNEW)
for i=1:30
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,4) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,4)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,5) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,5)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,4)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,4))
Lpointexact(1,5)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,5))
for i=31:60
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,6) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,6)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,7) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,7)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
    end
end

```

```

        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,6)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,6))
Lpointexact(1,7)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,7))
for i=61:85
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,8) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,8)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,9) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,9)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,8)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,8))
Lpointexact(1,9)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,9))
for i=86:108
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,10) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,10)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,11) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,11)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,10)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,10))
Lpointexact(1,11)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,11))
for i=109:126
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,12) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,12)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,13) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,13)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,12)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,12))
Lpointexact(1,13)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,13))

```

```

for i=127:138
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,14) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,14)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,15) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,15)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,14)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,14))
Lpointexact(1,15)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,15))
for i=139:144
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,16) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,16)
        n(1,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(1,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(1,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(1,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
    if skyElementsNEW(i,3)<=point(1,17) & skyElementsNEW(i+1,3)>point(1,17)
        n(2,1)=skyElementsNEW(i,3);
        n1(2,1)=LuminanceNEW(1,i+3);
        n(2,2)=skyElementsNEW(i+1,3);
        n1(2,2)=LuminanceNEW(1,i+1+3);
    end
end
Lpointexact(1,16)=interp1(n(1,:),n1(1,:),point(1,16))
Lpointexact(1,17)=interp1(n(2,:),n1(2,:),point(1,17))
Lpointexact(1,1)=LuminanceNEW(1,1);
Lpointexact(1,2)=LuminanceNEW(1,2);
Lpointexact(1,3)=LuminanceNEW(1,3);
end

```

1.9 Determinazione dei punti a destra e sinistra del sole.

```

function [L]=LR(Lpointexact)
for i=1:7
    L(1,i+3)=(Lpointexact(1,i*2-1+3));
    L(1,i+8+3)=(Lpointexact(1,i*2+3));
    L(1,1)=Lpointexact(1,1);
    L(1,2)=Lpointexact(1,2);
    L(1,3)=Lpointexact(1,3);
end
end

```

1.10 Calcolo della funzione gradiente.

```
function [gradation]=finalgrad(LuminanceNEW,L)
for i=1:15
    gradation(1,i+3)=L(1,i+3)/LuminanceNEW(1,148);
    gradation(1,1)=LuminanceNEW(1,1);
    gradation(1,2)=LuminanceNEW(1,2);
    gradation(1,3)=LuminanceNEW(1,3);
end
    gradation(1,11)=1;
    gradation(1,19)=1;
end
```

1.11 Calcolo delle funzioni indicatrici standard.

```
function [IND_STAND]=indicatrixSTAND(type_IND,CHI)
for i=1:6
    for j=1:max(size(CHI))
        IND_STAND(i,j)=1+type_IND(i,2)*(exp(type_IND(i,3)*(CHI(1,j)*pi/180))-
exp(type_IND(i,3)*pi/2))+type_IND(i,4)*(cos(CHI(1,j)*pi/180))^2;
    end
end
    IND_STAND= IND_STAND';
end
```

1.12 Calcolo delle funzioni gradienti standard.

```
function [GRAD_STAND]=gradationSTAND(type_GRAD,Zen)
for i=1:6
    for j=1:max(size(Zen))
GRAD_STAND(i,j)=(1+type_GRAD(i,2)*exp(type_GRAD(i,3)/cos(Zen(1,j)*pi/180)))
/(1+type_GRAD(i,2)*exp(type_GRAD(i,3)))
    end
end
    GRAD_STAND= GRAD_STAND';
end
```

1.13 Calcolo dell'RMS minimo e del gruppo per la funzione indicatrice.

```

function [skyIND,RMSminIND]=interpEveryInd(Lsolaralmuc,IND_STAND,CHI)
IND_STAND=IND_STAND';
x=CHI(1,:);
for k=1:size(Lsolaralmuc,1)
n=Lsolaralmuc(k,30:54);
for i=1:6
    y(:,i)=IND_STAND(i,:);
    interp=interp1(x,y,n);
end

for i=1:6
    for j=1:25
        value1(j,i)=Lsolaralmuc(k,j+3)-interp(j,i);
        value2(j,i)=value1(j,i)/interp(j,i);
        value3(j,i)=value2(j,i)^2;
    end
end
for i=1:6
    B(k,i)=sqrt(sum(value3(1:25,i))/25)
end
skyIND(k,4)=1;RMSminIND(k,1)=B(k,1);
for i=1:6
    if B(k,i)<RMSminIND(k,1)
        RMSminIND(k,1)=B(k,i);
        skyIND(k,4)=i;
    end
    skyIND(k,1)=Lsolaralmuc(k,1);
    skyIND(k,2)=Lsolaralmuc(k,2);
    skyIND(k,3)=Lsolaralmuc(k,3);
end
end
end

```

1.14 Calcolo dell'RMS minimo e del gruppo per la funzione gradiente.

```

function
[skyGRAD,RMSminGRAD]=interpEveryGrad(gradation,GRAD_STAND,Zen,solarcoordinata)
GRAD_STAND=GRAD_STAND';
x=Zen(1,:);
for k=1:size(solarcoordinate,1)
n=[0,12,24,36,48,60,72,84];
for i=1:6
    y(:,i)=GRAD_STAND(i,:);
    interp=interp1(x,y,n);
end

```

```

for i=1:6
    for j=1:8%canghe 8 with 7 to eliminate almucantar 6°
        value1(j,i)=gradation(k,12-j)-interp(j,i);
        value2(j,i)=value1(j,i)/interp(j,i);
        value3(j,i)=value2(j,i)^2;
    end
end
for i=1:6
    B1(k,i)=sqrt(sum(value3(1:8,i))/8)%canghe 8 with 7 to eliminate almucantar 6°
end
for i=1:6
    for j=1:8%canghe 8 with 7 to eliminate almucantar 6°
        value11(j,i)=gradation(k,20-j)-interp(j,i);
        value21(j,i)=value11(j,i)/interp(j,i);
        value31(j,i)=value21(j,i)^2;
    end
end
for i=1:6
    B2(k,i)=sqrt(sum(value31(1:8,i))/8)%canghe 8 with 7 to eliminate almucantar 6°
end
for i=1:6
    B(k,i)=(B1(k,i)+B2(k,i))/2
end
skyGRAD(k,4)=1;RMSminGRAD(k,1)=B(k,1);
for i=1:6
    if B(k,i)<RMSminGRAD(k,1)
        RMSminGRAD(k,1)=B(k,i);
        skyGRAD(k,4)=i;
    end
end

end
skyGRAD(k,1)=gradation(k,1);
skyGRAD(k,2)=gradation(k,2);
skyGRAD(k,3)=gradation(k,3);
end
end

```

1.15 Calcolo del rapporto L_z/D_v standard.

```

function [standardLzDv]=standard(BCDE,gs)
for j=1:size(BCDE,1)
    for i=1:(size(gs,2))
        standardLzDv(j,i)=(BCDE(j,2)*(sin(gs(1,i)*pi/180))^BCDE(j,3)/(cos(gs(1,i)*pi/180))^BCDE(j,4)+BCDE(j,5)*sin(gs(1,i)*pi/180))/(133.8*sin(gs(1,i)*pi/180))
    end
end
end

```

1.16 Calcolo del rapporto L_z/D_v misurato.

```
function [calculatedLzDv]=calculated(Dv,Lz,sunaltitude)
for i=1:size(Dv,1)
    calculatedLzDv(i,5)=Lz(i,4)/Dv(i,4)
    calculatedLzDv(i,1)=Lz(i,1)
    calculatedLzDv(i,2)=Lz(i,2)
    calculatedLzDv(i,3)=Lz(i,3)
    calculatedLzDv(i,4)=sunaltitude(i,1)
end
i=find(sunaltitude(:,1)<6);
calculatedLzDv(i,:)=[];
end
```

1.17 Calcolo del tipo di cielo CIE con il rapporto L_z/D_v .

```
function [skyLzDv,B]=sky(calculatedLzDv,gs,standardLzDv)
x=gs(1,:);
for j=1:size(calculatedLzDv,1)
    n=calculatedLzDv(j,4);
    for i=1:15
        y(:,i)=standardLzDv(i,:);
        interp=interp1(x,y,n);
    end
    for i=1:15
        value1(1,i)=calculatedLzDv(j,5)-interp(1,i);
        value2(1,i)=value1(1,i)/interp(1,i);
        value3(1,i)=value2(1,i)^2;
    end
    for i=1:15
        B(j,i)=sqrt(value3(1,i))
    end
    skyLzDv(j,4)=1;RMSmin(j,1)=B(j,1);
    for i=1:15
        if B(j,i)<RMSmin(j,1)
            RMSmin(j,1)=B(j,i);
            skyLzDv(j,4)=i;
        end
        skyLzDv(j,1)=calculatedLzDv(j,1);
        skyLzDv(j,2)=calculatedLzDv(j,2);
        skyLzDv(j,3)=calculatedLzDv(j,3);
    end
end
end
```

1.18 Calcolo di D_v .

```

function [Eh]=calcEh(LuminanceNEW)
for k=1:size(LuminanceNEW,1)
    for i=1:30
        Dv1(k,i)=0.00144*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv11(k,1)=sum(Dv1(k,:))
    for i=31:60
        Dv2(k,i)=0.00407*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv21(k,1)=sum(Dv2(k,:))
    for i=61:84
        Dv3(k,i)=0.00750*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv31(k,1)=sum(Dv3(k,:))
    for i=85:108
        Dv4(k,i)=0.00862*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv41(k,1)=sum(Dv4(k,:))
    for i=109:126
        Dv5(k,i)=0.01099*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv51(k,1)=sum(Dv5(k,:))
    for i=127:138
        Dv6(k,i)=0.01288*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv61(k,1)=sum(Dv6(k,:))
    for i=139:144
        Dv7(k,i)=0.01409*LuminanceNEW(k,i+3)
    end
    Dv71(k,1)=sum(Dv7(k,:))
    Dv8(k,1)=0.01093*LuminanceNEW(k,148)
    Eh(k,1)=pi*(Dv11(k,1)+Dv21(k,1)+Dv31(k,1)+Dv41(k,1)+Dv51(k,1)+Dv61(k,1)+Dv71(k,1)+Dv8(k,1))
end
end

```

1.19 Confronto tra D_v calcolato e D_v misurato.

```

function [Dv_Eh]=controllEh(Eh,Dv)
for k=1:size(Eh,1)
    Dv_Eh(k,1)=(Eh(k,1)-Dv(k,4))/Dv(k,4)*100
end
end

```

1.20 Calcolo di L_{prsc} .

```
function [Lprsc]=calcLprsc(LuminanceNEW,Eh)
for k=1:size(Eh,1)
for i=1:145
    Lprsc(k,i)=LuminanceNEW(k,i+3)/Eh(k,1)
end
end
```

1.21 Calcolo dei tipo di cielo CIE con il metodo di Tregenza.

```
function
    [sky]=skyTREGENZA(solarcoordinate,skyElementsNEW,constants,Lprsc,Eh,LuminanceNEW)
for t=1:size(solarcoordinate,1)
for i=1:145
    A(t,i+3)=abs(skyElementsNEW(i,3)-solarcoordinate(t,5));
    A(t,1)=solarcoordinate(t,1);
    A(t,2)=solarcoordinate(t,2);
    A(t,3)=solarcoordinate(t,3);
end
for i=1:145;
a=(90-solarcoordinate(t,4))*pi/180;
c(i)=(90-skyElementsNEW(i,2))*pi/180;

chi(t,i+3)=acos(cos(c(i))*cos(a)+sin(c(i))*sin(a)*cos(A(t,i+3)*pi/180))*180/pi;
chi(t,1)=solarcoordinate(t,1);
chi(t,2)=solarcoordinate(t,2);
chi(t,3)=solarcoordinate(t,3);
end
for i=1:15
    for j=1:145
        f(i,j)=1+(constants(i,4)*exp(constants(i,5)*chi(t,j+3)*pi/180)-exp(constants(i,5)*pi/2))+constants(i,6)*(cos(chi(t,j+3)*pi/180))^2
        if ((pi/2-skyElementsNEW(j,2)*pi/180)==pi/2)
            fi(i,j)=1
        else
            fi(i,j)=1+constants(i,2)*exp(constants(i,3)/cos(pi/2-skyElementsNEW(j,2)*pi/180))
        end
        fl(i,j)=1+(constants(i,4)*exp(constants(i,5)*(90-solarcoordinate(t,4))*pi/180)-exp(constants(i,5)*pi/2))+constants(i,6)*(cos((90-solarcoordinate(t,4))*pi/180))^2
        fil(i,j)=1+constants(i,2)*exp(constants(i,3))
        lr(i,j)=f(i,j)*fi(i,j)/(fl(i,j)*fil(i,j))*LuminanceNEW(t,148)
    end
end
end
for i=1:15
```

```
    for j=1:145
        Lprst(i,j)=lr(i,j)/Eh(t,1)
    end
end
for i=1:15
    for j=1:145
        value1(i,j)=(Lprsc(t,j)-Lprst(i,j))^2
    end
    rms(i,1)=sqrt((sum(value1(i,:)))/145)
end
sky(t,1)=1;RMSmin(1,1)=rms(1,1);
for i=1:15
    if rms(i,1)<RMSmin(1,1)
        RMSmin(1,1)=rms(i,1);
        sky(t,1)=i;
    end
end
end
end
```

BIBLIOGRAFIA.

- [1] Ward G. RADIANCE reference manual. Lighting Systems Research Group, Lawrence Berkeley Laboratory, USA, 1988.
- [2] SUPERLITE 2.0, Predicting Daylighting and Lighting Performance in Complex Building Spaces, Lawrence Berkeley Laboratory, USA, 1994.
- [3] ADELIN 3.0, SCH Task 21, International Energy Agency, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2002.
- [4] DIALUX 4.0, DIAL GmbH, Germany, 2005.
- [5] RELUX Professional, Version 2007.5, Relux Informatik AG, Switzerland, 2007.
- [6] Marsh A. ECOTECT, Version 5.50, 2006, SQUARE ONE, U.K., 2006.
- [7] Ferraro V, Igawa N, Marinelli V, INLUX- DBR- A Calculation Code To Calculate Indoor Natural Illuminance Inside Buildings Under Various Sky Conditions. Energy 35 (2010), pp 3722 –3730.
- [8] Perez R. et al., 1993. All-weather model for sky luminance distribution- Preliminary configuration and validation. Solar Energy.50, 235-245.
- [9] Igawa N. et al., 2004. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. Solar Energy. 77, 137-157.
- [10] CIE Standard S 011/E, 2003. Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, Vienna.
- [11] ISO, 2004. Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, ISO Standard 15469, Geneva.
- [12] Igawa N. and Matsuzawa T., 2005, Meteorological data on daylight and solar radiation for environmental design applications, Part.1. Sky models and daylight luminous efficacies. In Proc. of 5th LUX PACIFICA Conference, Cairns (Australia), 24-26 July.
- [13] M. Cucumo, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, M. Mele, “Un metodo di calcolo per la determinazione dei cieli CIE”. Atti del convegno "67° Congresso Nazionale ATI", Trieste (CS), 11-14 Settembre, 2012.

- [14] CIE, (1973) Commission Internationale de l'Eclairage: Standardisation of luminance distribution on clear skies. CIE Publ. 22, Paris.
- [15] R. Kittler, Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and prediction strategy. *Lighting Res Technol*, 1985.
- [16] CIE DS 011.1/E:2003 Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky, Standard, CIE Central Bureau, Vienna, 2003.
- [17] Kittler R., Darula S., Perez R., A set of standard skies, characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design, American-Slovak grant project, US-SK 92 052, 1998.
- [18] Kittler R., Perez R., Darula S., A New Generation of Sky Standards, Proceedings Conference Lux Europa 1997, pp 359-373, Amsterdam, 1997.
- [19] Tregenza, P.R., Analysing sky luminance scans to obtain frequency distribution of CIE Standard General Sky. *Lighting Research and Technology*, 2004. 36 (4): pp 271-281.
- [20] Cucumo Mario A., Marinelli Valerio, Oliveti Giuseppe, INGEGNERIA SOLARE - Principi ed applicazioni, Bologna: Pitagora, 1994.
- [21] Mondaca Lo Giudice G., DE Lieto Vollaro A., Illuminotecnica, Masson Editoriale ESA, 1993.
- [22] Instruction Manual of Sky Scanner MS-321 LR, EKO Instruments Trading Co., Tokyo (2003).
- [23] P. R. Tregenza, R. Perez, J. Michalshy and R. Seals (2003), Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE TC-3.07.
- [24] Li D.H.W. et al., 2001. Evaluation of overcast sky luminance models against measured Hong Kong data. *Applied Energy*. 70, 321-331.
- [25] Li D.H.W et al., 2004. Overcast sky conditions and luminance distribution in Hong Kong data. *Building and Environment*. 39, 101-108.
- [26] Wittkopf S.K. and Soon L.K., 2007. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore. *Lighting Research and Technology*. 39(1), 31-51.

-
- [27] S. Chirarattananon and P. Chaiwiwatworakul, Distributions of sky luminance and radiance of North Bangkok under standard distributions, *Renewable Energy*. 32, p.p.1328-1345, 2007.
- [28] Markou M.T. et al., 2007. A new statistical methodology for classification of sky luminance distributions based on scan data. *Atmospheric Research*.86, 261-277.
- [29] Kobav M.B. et al., 2009. Complete analysis of the luminance measurements gained with a sky scanner. In *Proc. of 11th European Lighting Conference Lux Europa 2009*, Istanbul, September 9-11, pp. 273-278.
- [30] Torres J.L. et al., 2010. Sky luminance distribution in Pamplona (Spain) during the summer period. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.72, 382-388.
- [31] Torres J.L. et al., 2010. Sky luminance distribution in the North of Iberial Peninsula during winter. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.72, 1147-1154.
- [32] Cucumo M.A. et al., 2007. Misure sperimentali di luminanza e radianza della volta celeste. In: 62nd National Congress ATI, Salerno, Italy.
- [33] Perez R. et al., 1990. Modelling daylight availability and irradiance components from direct ad global irradiance. *Solar Energy*. 44, 271-289.
- [34] Perez R. et al., 1993. ERRATUM To All-weather model for sky luminance distribution- Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*. 50 (3), 235-245.
- [35] Igawa N. and Matsuzawa T., 2005. Meteorological data on daylight and solar radiation for environmental design applications, Part 1. Sky models and daylight luminous efficacies. In *Proc. of 5th LUX PACIFICA Conference*, Cairns (Australia), 24-26 July.
- [36] CIE 110, 1994. Spatial Distribution of Daylight Luminance Distributions of Various Reference Skies. Technical Report.
- [37] Moon P. and Spencer D.E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Illumination Engineering*. 37,707-726.
- [38] J. Krochmann (1963), *Über die Horizontalbeleuchtungsstärke der tagesbeleuchtung*, *Lichttechnik*, 15 (11), pp. 559-562.

- [39] H. Nakamura, M. Oki, Y. Hayashi, T. Iwata (1986), The mean sky composed depending on the absolute luminance values of the sky elements and application to the daylighting prediction, Proceedings of International Daylighting Conference, Long Beach, USA.
- [40] A. Soler, K. K. Gopinathan, S. T. Claros (2001), A study on zenith luminance on Madrid overcast skies, *Renewable Energy* 23, pp. 49-55.
- [41] Darula S. and Kittler R., 2002. CIE General Sky Standard defining luminance distributions. Proceedings of the Canadian Conference on building energy Simulation. September 11-13, Montreal, Canada.
- [42] CIE 108-1994, Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement. Publication of the CIE Central Bureau, Vienna.
- [43] Ineichen P. and Molineaux B.,1993. Characterisation and Comparison of two Sky Scanner: PRC Krochmann & EKO Instruments. IEA Task XVII Expert Meeting, Geneva, August 1993.

RINGRAZIAMENTI.

Si ringraziano per aver fornito dati sperimentali necessari allo svolgimento del presente lavoro:

Dr. Prof. Norio Igawa, Graduate School of Human Life Science, Osaka City University, Osaka, Japan.

Dr. Prof. Dominique Dumortier, Ecole Nationale des Travaux Puplics de l'Etat (ENTPE), Vaulx-en, Velin, France.

Dr. Prof. Josè Luis Torres and Profesora Marian de Blas, Universidad Pùblica de Navarra, UPNA Pamplona, Spain.

Si ringrazia, inoltre, per aver seguito lo svolgimento dell'attività di ricerca all'estero, il Dr. Prof. Stanislav Darula e il Dr. Prof. Richard Kittler, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovak.

PUBBLICAZIONI.**• Articoli**

- ✓ Ferraro V., Mele M., Marinelli V., " Analysis of sky luminance experimental data and comparison with calculation methods". Energy, 2012, Vol. 37, pp. 287-298;
- ✓ Ferraro V., Mele M., Marinelli V., " Sky luminance measurements and comparisons with calculation models". Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, Vol. 73, pp. 1780-1789.
- ✓ Cucumo M. A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Mele M., Marinelli V., "Analisi di dati sperimentali di luminanza del cielo e confronto con metodi di calcolo ". La Termotecnica, Aprile 2012 – Maggio 2012.
- ✓ Darula S., Mele M., "Model system for sky type determination". Journal Data & Knowledge Engineering. Under Review.
- ✓ Ferraro V., Marinelli V., Mele M., "A method of applying the CIE standard general sky model". Journal of Atmospheric and Solar -Terrestrial Physics. Under Review.

• Atti convegno

- ✓ Cucumo M. A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Mele M., Marinelli V., "Analisi di dati sperimentali di luminanza del cielo e confronto con metodi di calcolo ". Atti del convegno "66° Congresso Nazionale ATI", Rende (CS), 5-9 Settembre, 2011, Barcello Editore: Rose (CS), 2011, Vol. Atti su CD-Rom.
- ✓ Cucumo M. A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Mele M., Marinelli V., " Due metodi di calcolo per l'analisi termica dei collettori parabolici". Atti del convegno "66° Congresso Nazionale ATI", Rende (CS), 5-9 Settembre, 2011, Barcello Editore: Rose (CS), 2011, Vol. Atti su CD-Rom.
- ✓ M. Cucumo, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, M. Mele, "Un metodo di calcolo per la determinazione dei cieli CIE". Atti del convegno "67° Congresso Nazionale ATI", Trieste (CS), 11-14 Settembre, 2012.

- ✓ M. Cucumo, R. Bentreovato, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, M. Mele, E. Ramundo. “Un modello in scala per la misura dell’illuminamento naturale all’interno degli edifici”. Atti del convegno "67° Congresso Nazionale ATI", Trieste (TS), 11-14 Settembre, 2012.