

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI PER LO SVILUPPO  
SOSTENIBILE

## Sviluppo e validazione di un simulatore di intensità solare basato sul Ray Tracing.

Tesi in:

Propagazione e pianificazione nei sistemi d'area LM

Relatore:

Prof. Ing. Vittorio Degli Esposti

Presentata da:

Federico Falaschi

Correlatore:

Dott. Ing. Enrico Maria Vitucci

Sessione Terza

Anno Accademico 2011-2012



# INDICE

Introduzione.....	1
1- La radiazione solare e interazione con manufatti. ....	3
1.1- Lo spettro solare.....	3
1.2- L'irraggiamento extraterrestre. ....	4
1.3- L'irraggiamento terrestre. ....	4
1.3.1- Radiazione diretta, riflessa e diffusa. ....	5
1.3.2- L'Air Mass.....	7
1.4- Modelli empirici di irradiazione solare. ....	8
1.4.1- Modello Clear-Sky. ....	8
1.4.2- Modello di estrapolazione da database.....	10
1.5- Interazione della radiazione solare con le superfici. ...	13
1.5.1- L'albedo.....	13
1.5.2- Le riflessioni diffuse.....	15
1.5.3- La radiazione termica. ....	18
1.6- L'isola di calore. ....	19
2- Il Solar Ray Tracing. ....	21
2.1- Introduzione. ....	21
2.2- Il modello a raggi. ....	21
2.2.1- Riflessioni, diffrazioni, trasmissioni e scattering diffuso.	22
2.3- Funzionamento del Solar Ray Tracing. ....	23
2.3.1- Modellizzazione della radiazione diretta.....	24
2.3.2- Modellizzazione della radiazione diffusa.....	25
2.3.3- Modellizzazione dello scenario. ....	26
2.3.4- Collocazione dei ricevitori. ....	27

3- Validazione del Solar Ray Tracing.....	29
3.1- Introduzione.....	29
3.2- Caratterizzazione del Solar Meter di riferimento.....	30
3.3- Modalità di rilevamento. ....	33
3.4- Calcolo della radiazione “reale”.....	35
3.5- Misure sul campo e confronti col simulatore.....	38
3.5.1- Rilevamenti di cielo sereno. ....	38
3.5.1.1- Spiaggia di Cervia, 26 Gennaio 2013, costruzione arancione. ....	39
3.5.1.2- Spiaggia di Cervia, 3 Febbraio 2013, costruzione arancione... ..	44
3.5.1.3- Cesena, 27 Gennaio 2013, costruzione rosa pallido. ....	44
3.5.1.4- Cesena, 4 Febbraio 2013, costruzione bianco pallido.....	46
3.5.1.5- Cesenatico, 16 Febbraio 2013, muro di mattoni. ....	50
3.5.1.6- Savignano, 19 Febbraio 2013, muro color sabbia.....	53
3.5.1.7- Savignano, 16 Febbraio 2013, muro color sabbia.....	56
3.5.1.8- Savignano, 19 Febbraio 2013, muro grigio. ....	58
3.5.1.9- Cervia, 19 Febbraio 2013, muro giallo paglierino.....	60
3.5.2- Rilevamenti con elevata foschia. ....	62
3.5.3- Rilevamenti in cortile interno, Cesena 7 Marzo 2013.....	66
3.6- Prestazioni al variare delle interazioni. ....	71
3.7- Riepilogo sulle validazioni.....	72
4- Energia dissipata e pianificazione urbana.....	75
4.1- Introduzione.....	75
4.2- Metodo di simulazione. ....	75
4.2.1- Parametri di simulazione. ....	76
4.2.2- Scenario di riferimento. ....	76
4.3- Latitudine 44° 8' N; Longitudine 12° 14' E. ....	77
4.3.1- Altezza edifici 6 m; Larghezza strada 30 m. ....	77
4.3.2- Altezza edifici 16 m; Larghezza strada 15 m. ....	79

4.3.3- Analisi prestazionale del simulatore.....	81
4.3.4- Analisi delle orientazioni.....	82
4.3.5- Analisi con vetrate a specchio. ....	85
4.4- Latitudine 30° 4' N; Longitudine 31° 13' E. ....	87
4.4.1- Analisi delle orientazioni.....	87
4.4.2- Analisi con vetrate a specchio. ....	89
4.5- Latitudine 14° 43' N; Longitudine 17° 27' W. ....	90
4.5.1- Analisi delle orientazioni.....	90
4.5.2- Analisi con vetrate a specchio. ....	93
Conclusioni.....	95
Appendice A- File di input del Ray Tracing. ....	97
A.1- File solare.....	97
A.2- File dello scenario. ....	98
A.2.1- File PLANET.....	98
A.2.2- File WallData.....	99
A.2.3- File SingleWalls.....	100
A.2.4- File della vegetazione. ....	101
A.3- File di trasmettitore e ricevitore.....	101
A.4- File delle tipologie di elementi. ....	102
A.5- File dei parametri ausiliari. ....	103
Bibliografia.....	105
Ringraziamenti .....	107



# Introduzione

Il sole rappresenta, per la vita sulla Terra e per l'umanità, una fonte vitale di energia insostituibile ed inesauribile, anche se spesso viene sottovalutata. Basti pensare che il nostro pianeta riceve ogni quattro secondi, una quantità di energia pari al consumo giornaliero mondiale di petrolio. Al momento l'uomo non è riuscito a sfruttare in maniera considerevole tale fonte: il principale ostacolo è rappresentato dall'incapacità di immagazzinare grandi quantità di energia, per poterla sfruttare nei momenti di assenza della fonte energetica solare.

Oggi, a causa dello scarso utilizzo dei pannelli fotovoltaici, le città non traggono beneficio ma anzi subiscono negativamente la radiazione solare, a causa del surriscaldamento degli ambienti nei mesi estivi. L'utilizzo di apparecchiature per il raffrescamento degli edifici (alimentate oltretutto con energie non rinnovabili) provoca a sua volta un ulteriore riscaldamento dell'area cittadina, introducendo una sorta di retroazione positiva, un meccanismo che prende il nome di "isola di calore" urbana.

I grandi vantaggi in termini energetici che si potrebbero ottenere apportando modifiche topologiche alle strutture abitative oppure ai materiali in uso, ci ha spinto a cercare di adattare le capacità simulative del Ray Tracing a tale contesto solare.

Scopo di questa tesi è quindi quello di migliorare questo modello a raggi, solitamente utilizzato per prevedere la copertura radio in ambienti outdoor o indoor, validandone poi l'effettivo funzionamento sul campo.

In particolare, il *capitolo 1* inizia con una descrizione della radiazione solare e le problematiche inerenti il bilancio energetico sulla superficie terrestre, andando poi ad affrontare la tematica di alcuni dei tanti modelli utilizzabili per la previsione della radiazione solare.

Il tema che si affronterà nel *capitolo 2* riguarda invece il principio di funzionamento generale del Ray Tracing, con a seguito una descrizione più dettagliata delle caratteristiche particolari apportate a questo programma per il corretto funzionamento in ambito solare.

Nel *capitolo 3* verranno innanzitutto esposte le modalità con cui sono stati effettuati i rilevamenti di radiazione solare, per poi usarli per validare i risultati ottenuti dal simulatore.

Per concludere, il *capitolo 4* mostra i dati ottenuti da diverse simulazioni inerenti a varie casistiche di pianificazione urbanistica, con una attenta analisi della quantità di energia dissipata al variare dell'orientazione di strade e palazzi.

# Capitolo 1: La radiazione solare e interazione con manufatti.

## 1.1- Lo spettro solare.

L'energia elettromagnetica emanata dal Sole occupa uno spettro di frequenze molto vasto, che va dai dannosi raggi ultravioletti (200 nm di lunghezza d'onda) sino al profondo infrarosso (2500 nm), passando ovviamente per la luce visibile (da 400 a 700 nm). L'irradianza spettrale del Sole è di conseguenza assimilabile a quella di un corpo nero (di cui si parlerà successivamente nel paragrafo 1.5.2) posto ad una temperatura di 5250 °C, ma l'atmosfera terrestre blocca completamente o attenua alcune porzioni dello spettro, introducendo diverse bande di assorbimento che modificano l'andamento dell'irradianza spettrale (figura 1.1). Una di queste schermature la si ha ad esempio per le radiazioni a lunghezza d'onda più basse, rendendo possibile la vita sulla Terra.

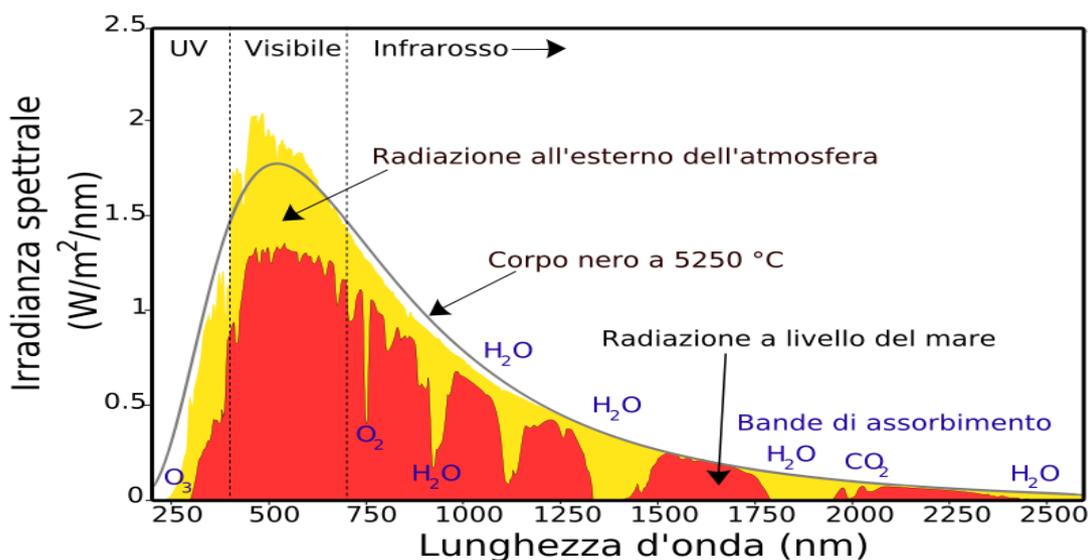


Figura 1.1: Irradianza spettrale solare fuori e dentro l'atmosfera terrestre [1].

Tuttavia nelle applicazioni pratiche (come simulazioni al calcolatore o progettazione di sistemi fotovoltaici) è praticamente impossibile quantificare i contributi di potenza alle singole lunghezze d'onda. Quindi solitamente viene considerato solo un bilancio complessivo, che è quello più interessante dal punto di vista energetico, anche se i materiali utilizzati nella conversione fotovoltaica hanno un comportamento sensibile alla lunghezza d'onda del raggio solare incidente.

## 1.2- L'irraggiamento extraterrestre.

Fuori dall'atmosfera terrestre, il bilancio di potenza ricevuta dal sole si aggira intorno a  $1367 \text{ W/m}^2$  (dato rilevato dal World Radiation Center nel 1981). Tale valore di irraggiamento (extraterrestre) si riferisce alla cosiddetta costante solare ( $SC$ ), ovvero il valore di radiazione solare, per unità di area, ricevuta su una superficie normale alla direzione Sole-Terra quando quest'ultima si trova ad una distanza media dalla stella. A causa però dell'eccentricità dell'orbita terrestre, questa densità di potenza può variare fino ad un massimo del 3% durante l'anno. Per tenere conto di tali variazioni, esiste una formula empirica che esprime l'andamento dell'irraggiamento extraterrestre in funzione del numero del giorno ( $n$ )

$$I_{EXT\_norm} = SC \cdot \left[ 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad [W / m^2]$$

Da questo valore possiamo ricavare facilmente il quantitativo di irraggiamento extraterrestre su una superficie orizzontale andando a moltiplicare l'ultima relazione per il coseno dell'angolo tra la normale alla superficie in esame e la direzione del raggio incidente ( $\theta$ ).

$$I_{EXT\_hor} = I_{EXT\_norm} \cdot \cos(\theta) \quad [W / m^2]$$

## 1.3- L'irraggiamento terrestre.

La presente trattazione si complica considerevolmente nel momento in cui la luce penetra all'interno dell'atmosfera. Nel bilancio energetico solare (figura 1.2) bisogna infatti tenere a conto che parte della radiazione viene da quest'ultima riflessa, assorbita, diffusa e trasmessa, giungendo sulla superficie terrestre con una intensità sensibile alla nuvolosità, all'umidità, alla temperatura, alla pressione atmosferica ed al livello di inquinamento. Tutti questi fattori sono molto difficili da considerare e sono variabili velocemente nel tempo e con la località presa in considerazione. Spesso quindi l'unico approccio possibile per chi deve necessariamente stimare la radiazione solare per un dato sito, è quello di consultare database che raccolgono al loro interno una moltitudine di dati misurati in passato sull'irraggiamento giornaliero medio, per un dato periodo dell'anno e per una particolare posizione geografica.

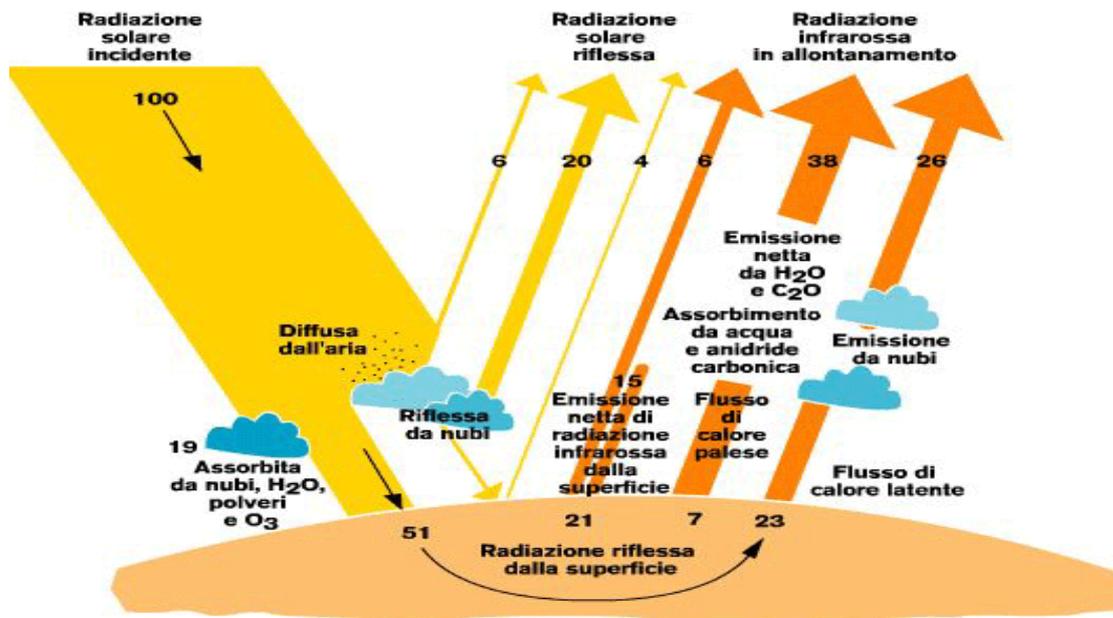


Figura 1.2: Bilancio energetico della radiazione solare incidente sulla Terra [2].

### 1.3.1- Radiazione diretta, riflessa e diffusa.

Il contributo principale al suolo è solitamente costituito dalla radiazione diretta, cioè quella che giunge a noi a seguito del fenomeno di trasmissione che subisce la luce solare incidendo sull'atmosfera. Esclusa la porzione riflessa dalle nubi o dall'aerosol, una parte giunge invece sulla crosta terrestre solo dopo essere stata diffusa dall'atmosfera, fenomeno che dà luminosità al cielo e ci consente di avere una buona illuminazione anche in zone ombrate, escluse cioè dalla luce diretta. I raggi che compongono tale contributo giungono quindi da ogni direzione e non sono assolutamente trascurabili, soprattutto nelle giornate nuvolose o di foschia, quando la radiazione diffusa costituisce la totalità o quasi della radiazione totale incidente sul suolo (figura 1.3). La somma delle due componenti al suolo prende il nome di radiazione globale.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m <sup>2</sup>	600 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup>	400 W/m <sup>2</sup>	300 W/m <sup>2</sup>	200 W/m <sup>2</sup>	100 W/m <sup>2</sup>	50 W/m <sup>2</sup>
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 1.3: Componenti della radiazione solare al variare delle condizioni meteorologiche.

Quindi si rende necessario introdurre dei semplici parametri che diano un'idea dell'impatto dei due contributi sulla radiazione globale, come ad esempio l'indice di chiarezza, definito come:

$$k_t = \frac{I_{GND\_global\_hor}}{I_{EXT\_hor}} = \frac{I_{GND\_beam\_hor} + I_{GND\_diffuse\_hor}}{I_{EXT\_hor}}$$

Questo parametro è importante per quantificare il livello di attenuazione che subisce la radiazione solare, dando una stima appunto della chiarezza del cielo per un particolare luogo e istante di tempo. Matematicamente si esprime come il rapporto tra l'irraggiamento globale (su una superficie orizzontale posta al suolo) e l'irraggiamento extraterrestre (sempre su di una superficie orizzontale).

Un altro importante parametro è invece il coefficiente di diffusione, che indica la porzione della radiazione diffusa che giunge al suolo rispetto a quella globale (sempre al suolo), definito come segue:

$$k_d = \frac{I_{GND\_diffuse\_hor}}{I_{GND\_global\_hor}} = \frac{I_{GND\_diffuse\_hor}}{I_{GND\_beam\_hor} + I_{GND\_diffuse\_hor}}$$

Non è difficile intuire che questi due parametri siano legati fortemente tra loro. A titolo di esempio, la presenza di un cielo sereno comporta un indice di chiarezza

elevato, a scapito di una riduzione del coefficiente di diffusione. In condizioni di cielo coperto invece, si ha per i due parametri l'effetto opposto.

Noti i due fattori e l'irraggiamento extraterrestre (definito su piano orizzontale), è possibile a questo punto risalire alla quantità di radiazione diffusa incidente sul suolo:

$$I_{GND\_diffuse\_hor} = I_{EXT\_hor} \cdot k_d \cdot k_t \quad [W / m^2]$$

Da questa relazione e dalla definizione del coefficiente di diffusione, si ottiene anche la radiazione orizzontale diretta sul suolo:

$$\begin{aligned} I_{GND\_beam\_hor} &= I_{GND\_global\_hor} - I_{GND\_diffuse\_hor} = \\ &= \frac{I_{GND\_diffuse\_hor}}{k_d} - I_{GND\_diffuse\_hor} = I_{GND\_diffuse\_hor} \cdot \left( \frac{1 - k_d}{k_d} \right) \quad [W / m^2] \end{aligned}$$

Sostituendo a quest'ultima l'espressione della radiazione diffusa mostrata precedentemente, si ottiene infine:

$$I_{GND\_beam\_hor} = I_{EXT\_hor} \cdot k_t \cdot (1 - k_d) \quad [W / m^2]$$

### 1.3.2- L'Air Mass.

La radiazione globale sulla superficie terrestre può variare anche a causa di altri aspetti, questa volta del tutto geometrici. Infatti, quando il sole ha un'altezza ridotta, i suoi raggi giungono al suolo attraversando uno spessore maggiore di atmosfera rispetto al caso in cui il sole sia allo zenit reale. L'indice di massa d'aria (Air Mass AM) esprime appunto questo fenomeno, quantificabile in prima approssimazione con una semplice relazione, funzione dell'angolo tra lo zenit e la direzione del sole ( $\vartheta$ ):

$$AM = \frac{1}{\cos(\vartheta)}$$

In realtà, questa formula non tiene in considerazione la curvatura della massa atmosferica, dettaglio non trascurabile soprattutto per i primi e ultimi momenti della giornata. Per una trattazione più accurata è infatti necessaria una formula più complessa [3], che tenga conto del fatto che all'alba e al tramonto, seppur  $\vartheta$  sia un angolo retto, il path ottico non risulti ovviamente di lunghezza infinita:

$$AM = \frac{1}{\cos(\vartheta) + 0.50572 \cdot (96,07995 - \vartheta)^{-1,6364}}$$

## 1.4- Modelli empirici di irradiazione solare.

A seguito di quanto appena esposto, è facile intuire che la modellizzazione matematica della radiazione solare non è di facile implementazione. Tuttavia esistono modelli empirici capaci di generare risultati che si avvicinano a casi particolari riscontrati nella realtà.

### 1.4.1- Modello Clear-Sky.

Il modello di cielo sereno si utilizza in quei contesti meteorologici caratterizzati da un cielo del tutto privo di nuvolosità e di foschia. Sebbene queste condizioni si verifichino difficilmente, tale caratterizzazione empirica si è mostrata molto fedele alla realtà, sia per quanto riguarda la radiazione diretta che per quella diffusa.

Per iniziare, il modello prevede il calcolo della radiazione diretta su una superficie normale, mediante una equazione [4] funzione esponenziale decrescente dell'indice di massa d'aria ( $AM$ ):

$$I_{GND\_beam\_norm} = A \cdot e^{-k \cdot AM} \quad [W / m^2]$$

In particolare, il coefficiente  $A$  rappresenta il flusso extraterrestre apparente, funzione a sua volta del numero del giorno dell'anno ( $n$ ). Il suo significato fisico è del tutto analogo all'irradiazione extraterrestre, anche se presenta valori leggermente inferiori per tenere in considerazione alcuni aspetti inerenti la curvatura terrestre:

$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (n - 275)}{365}\right] \quad [W / m^2]$$

Il secondo coefficiente ( $k$ ) che compare nell'equazione e moltiplica l'indice di massa d'aria ad esponente, prende il nome di profondità ottica. Questo fattore descrive l'opacità di un mezzo, dando una misura della quantità di luce dispersa durante un determinato percorso ottico. Anche in questo caso viene fornita una relazione funzione del giorno dell'anno ( $n$ ):

$$k = 0.174 + 0.035 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (n - 100)}{365}\right]$$

Passando invece al calcolo della radiazione diffusa, la trattazione è molto più semplificata e deriva direttamente dalla formulazione utilizzata per la radiazione diretta:

$$I_{GND\_diffuse\_hor} = C \cdot I_{GND\_beam\_hor} \quad [W / m^2]$$

In quest'ultima relazione compare il fattore di diffusione celeste, ancora una volta funzione di  $n$ :

$$C = 0.095 + 0.04 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (n - 100)}{365}\right]$$

Per dare un'idea di quanto questo metodo sia accurato, è stata effettuato un confronto con alcuni dati resi disponibili dall' Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia Romagna (ARPA), per una giornata estiva di cielo sereno (figura 1.4.1). Entrambe le curve si riferiscono alla radiazione globale su di una superficie orizzontale. Si può quindi constatare come il modello abbia una elevata fedeltà con le rilevazioni soprattutto nelle ore mattutine, ma mantiene comunque una discreta precisione nella seconda metà della giornata.

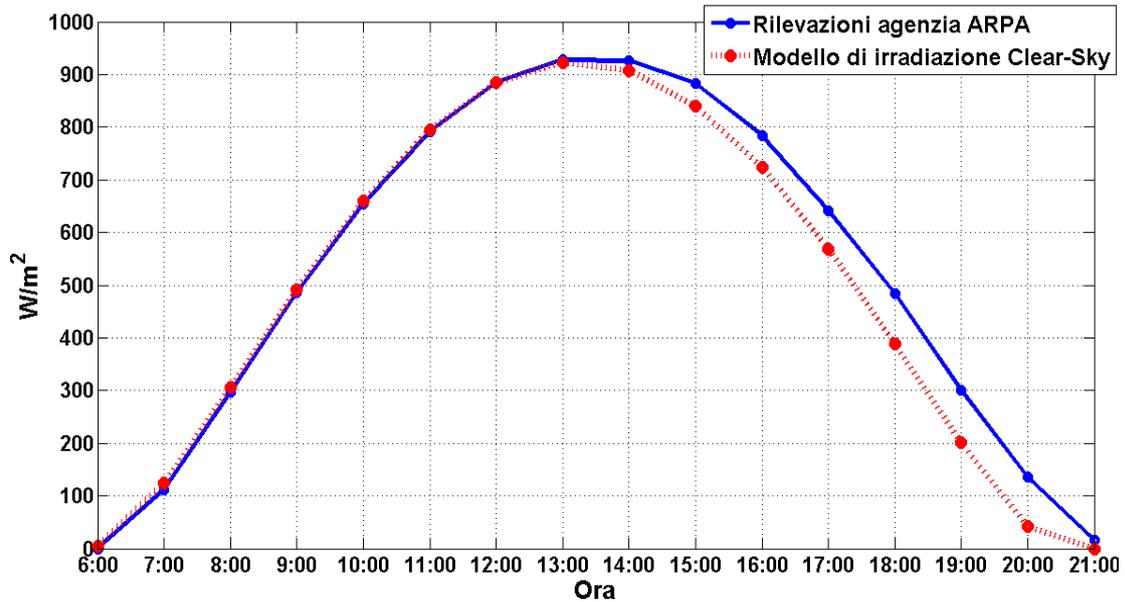
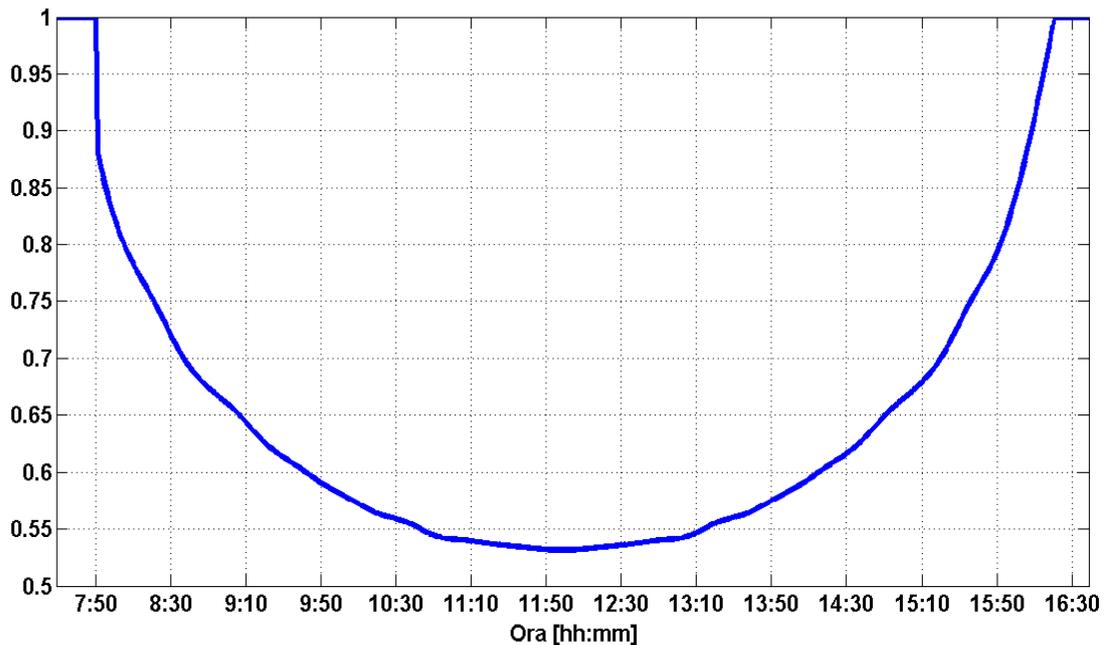


Figura 1.4: Irradiazione globale su superficie orizzontale sulla città di Cesena il 17 Giugno 2012.

#### 1.4.2- Modello di estrapolazione da database.

Malgrado il buon comportamento del modello Clear-Sky, il suo uso non è possibile per descrivere situazioni di cielo torbido, variabile o completamente coperto. Si rende quindi necessario, per un corretto approccio simulativo, l'utilizzo del coefficiente di diffusione o dell'indice di chiarezza effettivamente misurati sul luogo, oppure ottenuti come medie temporali da database accurati disponibili a livello europeo [5]. Solitamente si dispone solo di dati orari dell'irradiazione globale (ad esempio i dati regionali ARPA), tuttavia un'importante agenzia europea (Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS) fornisce pure i dati riguardanti l'irradiazione oraria diffusa (sotto forma di medie mensili), rendendo possibile il calcolo dell'andamento medio, nell'arco della giornata, del coefficiente di diffusione (figura 1.5).



**Figura 1.5: andamento giornaliero medio del coefficiente di diffusione nel mese di Gennaio a Cesena (e zone limitrofe) [5].**

Per risalire all'indice di chiarezza esistono diversi modelli empirici che mettono in relazione i due parametri fondamentali, evidentemente correlati fisicamente tra loro. Dopo un'attenta analisi delle prestazioni dei possibili modelli utilizzabili in tale contesto, in questo lavoro si è scelto di utilizzare la correlazione Iqbal [6], scelta effettuata anche dall'Ente Nazionale per le Energie Alternative (ENEA) nei suoi studi, perché si è dimostrata essere valida nel generare valori realistici di radiazione solare a partire dalla disponibilità di uno solo dei due parametri:

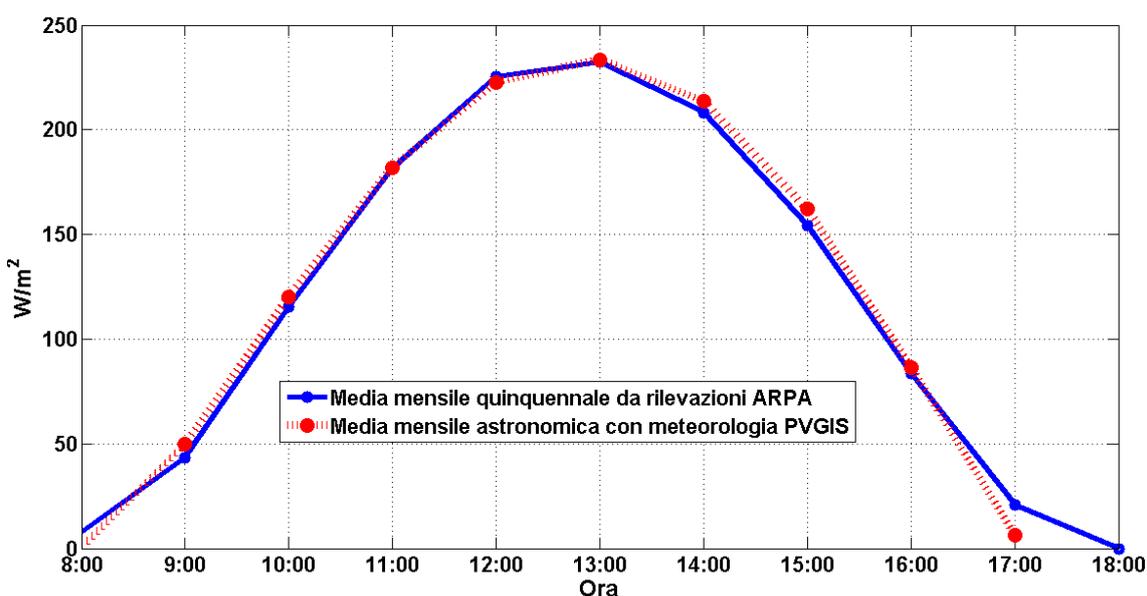
$$k_d = 0.958 - 0.982 \cdot k_t$$

Ovviamente da qui, se è reso solo noto il valore del coefficiente di diffusione, è possibile ricavare l'indice di chiarezza tramite la semplice inversione della formula.

Anche in questo caso è stato condotto un confronto per stimare il comportamento del modello. Sebbene si disponga solamente dell'andamento giornaliero medio mensile del coefficiente di diffusione per un dato luogo, è possibile fare una stima giorno per giorno, dell'andamento giornaliero della radiazione globale al suolo, mettendo in conto i valori esatti di radiazione extraterrestre su piano orizzontale. In sostanza, l'approccio utilizzato in questo lavoro, per le previsioni di radiazione solare, si basa su simulazioni giornaliere esatte dal punto di vista geometrico-astronomico, in

unzione però a condizioni meteo medie per un dato mese, laddove non siano disponibili dati più specifici per la giornata in questione.

Nel seguente grafico (figura 1.6) è quindi stata rappresentata in due diversi modi la radiazione giornaliera media del mese di Gennaio: la linea blu rappresenta l'andamento medio ottenuto direttamente dai dati reperiti dall'agenzia regionale, mentre la curva tratteggiata rossa indica i valori ottenuti dal modello astronomico, unito con il database europeo "meteorologico" PVGIS, che fornisce i coefficienti di diffusione medi del mese.



**Figura 1.6: andamento giornaliero medio della radiazione solare nel mese di Gennaio, sulla città di Cesena.**

Un ulteriore conferma di massima del corretto funzionamento viene descritto dal grafico mese per mese dell'irraggiamento medio giornaliero, con un confronto dei dati ottenuti da questo modello statistico-deterministico con i dati registrati dall'ente regionale ARPA, dall'ente nazionale ENEA e da quelli europei del PVGIS (figura 1.7).

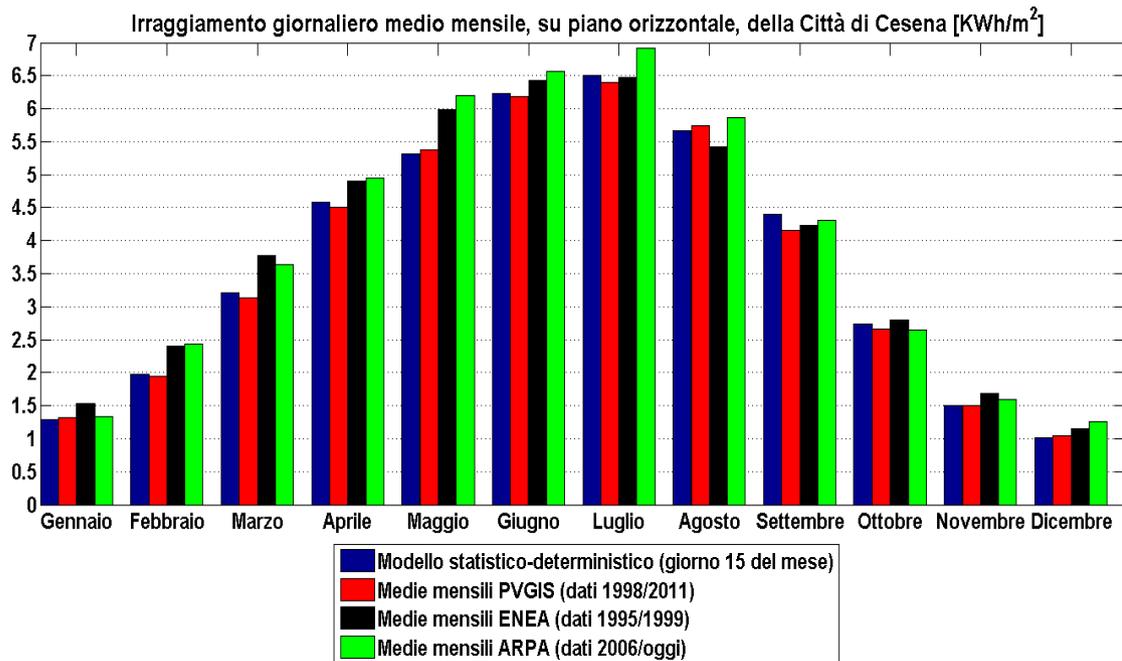


Figura 1.7: Validazione del modello di estrapolazione da database.

Ovviamente i dati contenuti in tale grafico devono essere analizzati con cautela, dato che non si conoscono i modi operativi ed il margine di errore delle rilevazioni eseguite dai vari enti. Ciò però ci consente di dimostrare che i risultati ottenuti non sono fuori dalla realtà, e la presenza di oscillazioni dei dati da un'agenzia all'altra può essere causata da innumerevoli fattori, come ad esempio il diverso intervallo temporale e la quantità di dati mediati.

## 1.5- Interazione della radiazione solare con le superfici.

Fenomeni di riflessione e diffusione non avvengono solo nel momento in cui la luce interagisce con l'atmosfera, ma in buona parte anche quando questa colpisce le svariate tipologie di superfici che compongono la crosta terrestre.

### 1.5.1- L'albedo.

I vari tipi di materiali rispondono ovviamente in maniera diversa alla radiazione solare. L'albedo in questo caso indica appunto la porzione di radiazione riflessa rispetto a quella incidente:

$$\alpha = P_{rifl} / P_{inc}$$

La sua definizione però è da intendersi come una stima media della riflettività, perché quest'ultima è specifica della frequenza dell'onda incidente e dell'angolo di incidenza con l'ostacolo. Il calcolo rigoroso è quindi analiticamente possibile ma non banale, per via dell'elevata larghezza spettrale della luce solare. In questo contesto, dove si è utilizzato un simulatore nato per funzionare esclusivamente ad una singola lunghezza d'onda, è stata necessaria una formula che rappresentasse un adattamento che consentisse di ricreare un livello di riflettività del tutto simile a quello che si otterrebbe considerando rigorosamente ogni singola frequenza dello spettro. A partire dalla conoscenza della costante dielettrica relativa del materiale, si ricava il parametro di albedo (o viceversa):

$$\alpha = \left( \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right)^2$$

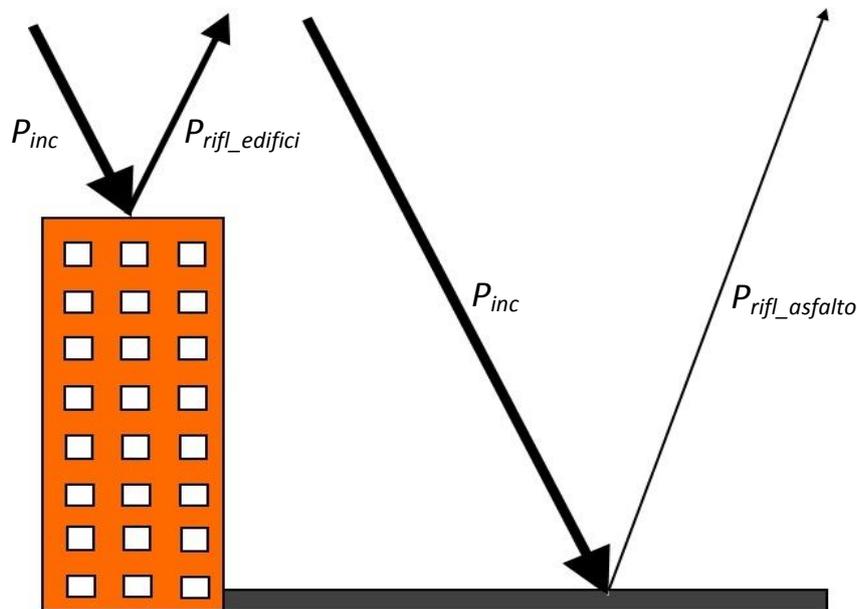
Di seguito è riportata una tabella con alcuni valori tipici di albedo per le superfici più comuni:

Superficie	Albedo
Neve (caduta di fresco o con un film di ghiaccio)	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (creta,marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno / campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti e terrazze in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superfici scure di edifici (mattoni scuri, vernice scure)	0,27
Superfici chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare)	0,60

**Tabella 1.1: Valori tipici di albedo [norma UNI 8477].**

Oltre al materiale, un fattore che può incidere sull'albedo è pure il colore del manufatto (figura 1.8): basti pensare alla tonalità dell'intonaco di un edificio, che ne fa aumentare la porzione di luce riflessa nel caso in cui quest'ultimo sia di colorazione più chiara. Un altro esempio può essere l'asfalto: quello più vecchio e

quindi più chiaro possiede un albedo maggiore rispetto al tipico asfalto appena posato.



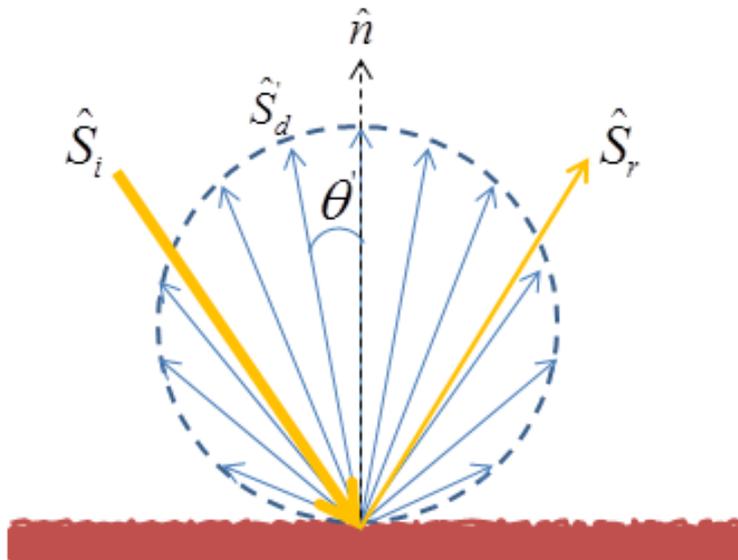
**Figura 1.8: A parità di potenza incidente, la potenza riflessa varia a seconda del tipo di materiale e del colore del manufatto.**

### 1.5.2- Le riflessioni diffuse.

Quando l'onda elettromagnetica possiede una lunghezza d'onda paragonabile con le irregolarità e le rugosità della superficie, una parte della potenza incidente non viene riflessa geometricamente rispetto al piano di incidenza ma viene diffusa, ovvero distribuita irregolarmente in tutte le direzioni. Tale fenomeno diviene sempre più rilevante con l'aumentare della rugosità superficiale, e può provocare addirittura l'annullamento della potenza puramente riflessa dall'ostacolo. La caratterizzazione della distribuzione della radiazione diffusa è ovviamente impossibile da riprodurre esattamente, tuttavia esistono diversi schemi approssimativi utilizzati ad esempio nei simulatori al computer che fanno uso dei modelli a raggi (come ad esempio il Ray Tracing del quale si parlerà nel paragrafo successivo):

1. modello di scattering lambertiano;
2. modello di scattering a singolo lobo;
3. modello di scattering a doppio lobo (ovvero direttivo con in aggiunta un lobo di backscattering).

Quello più utilizzato per la sua semplicità è il modello di scattering lambertiano: il punto di incidenza del raggio ottico è fonte di una moltitudine di raggi, la cui distribuzione non dipende dall'angolo di incidenza tra l'ostacolo e l'onda originaria, ma solamente dall'angolo ( $\theta'$ ) che il generico raggio creato possiede rispetto alla normale della superficie (figura 1.9).



**Figura 1.9: raggi di scattering modellati mediante approccio lambertiano.**

Come si può ben notare dalla figura, la distribuzione dell'intensità di potenza trasportata da ciascuno dei raggi diffusi segue la legge del coseno o di Lambert:

$$I_{\hat{S}_d} \propto \cos(\theta')$$

Mediante l'approccio direttivo si suppone invece che la potenza diffusa sia maggiore nella direzione del raggio riflesso (figura 1.10).

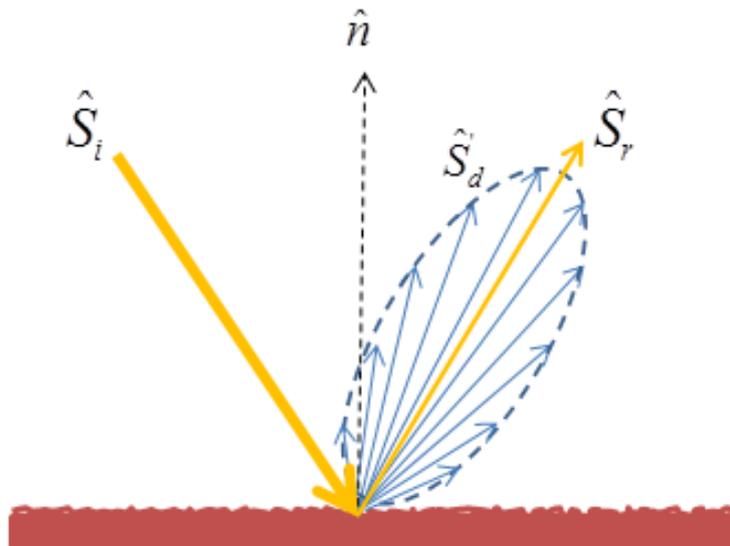


Figura 1.10: raggi di scattering modellati mediante approccio direttivo a singolo lobo (nel solo semispazio di incidenza).

In questi casi l'intensità decresce (rispetto alla direzione di massimo) secondo una funzione il cui andamento richiama la classica forma di un lobo principale del diagramma di radiazione di un'antenna direttiva. Il carattere più o meno pronunciato della funzione è modellabile da parte dell'utente variando un parametro interno. Il terzo tipo di modello è quello del backscattering, con il quale si considera che i raggi creati dall'incontro del raggio incidente con lo scatter abbiano due direzioni privilegiate: la prima è quella del raggio riflesso (come nel caso direttivo); la seconda è quella del raggio incidente, ma con verso opposto (figura 1.11).

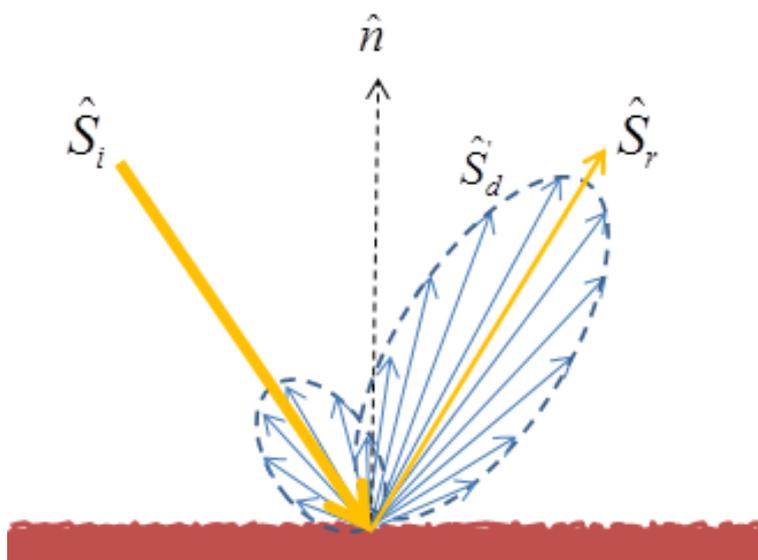


Figura 1.11: raggi di scattering modellati mediante l'approccio a doppio lobo o di backscattering (nel solo semispazio di incidenza).

Solitamente si modellano i lobi in modo tale che quello proiettato verso il raggio incidente sia comunque meno pronunciato rispetto a quello in direzione del raggio riflesso, stando a significare quindi che il fenomeno dello scattering direttivo è prevalente nel calcolo della potenza associata ai raggi diffusi.

La scelta del tipo di modello di scattering da adottare nei vari contesti simulativi deve essere fatta in relazione al tipo di rugosità del manufatto rapportata alla lunghezza d'onda del raggio in questione. Come è noto, se la deviazione standard della rugosità superficiale è di gran lunga superiore alla lunghezza d'onda (come accade sempre per frequenze ottiche), il lobo che descrive lo scattering tende a divenire sempre meno schiacciato, passando da un modello direttivo allargato fino a giungere a quello lambertiano. Quest'ultimo ha infatti generato sperimentalmente, nel contesto solare, i migliori raffronti con la realtà

### 1.5.3- La radiazione termica.

Qualsiasi superficie che possieda una temperatura superiore allo zero assoluto emana energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, con una intensità e distribuzione spettrale dipendente dalla temperatura del corpo e dalle caratteristiche dello stesso. Si definisce quindi la radianza spettrale la potenza irradiata nell'angolo solido infinitesimo  $d\Omega$  dalla superficie infinitesima  $dA$  del corpo stesso alla temperatura  $T$ . È inoltre possibile definire la radianza spettrale  $L(T, \lambda)$  come la derivata della radianza rispetto alla lunghezza d'onda  $\lambda$ , tale che  $L(T, \lambda)d\lambda$  sia la radianza del corpo nell'intervallo di lunghezze d'onda tra  $\lambda$  e  $\lambda+d\lambda$ .

Se si definisce il concetto di corpo nero, ovvero un oggetto ideale che ha la capacità di assorbire tutta la radiazione incidente e di irradiarne la stessa quantità mantenendo la sua temperatura costante, si può descrivere la radianza spettrale con la nota legge di Planck:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \left[ \frac{W}{m^3 Sr} \right]$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto,  $h$  è la costante di Planck,  $k$  è la costante di Boltzmann e  $T$  è la temperatura assoluta del corpo.

Ponendo a zero la derivata (rispetto a  $\lambda$ ) dell'equazione, si giunge alla legge di Wien, che consente di calcolare il valore di lunghezza d'onda a cui corrisponde l'intensità massima di radianza spettrale:

$$\lambda_{MAX} = \frac{b}{T} \quad [m] \quad b = 2.898 \cdot 10^{-3} [K \cdot m]$$

dove  $b$  è la costante di Wien. Questa semplice relazione descrive in realtà un fenomeno molto importante: più un corpo è caldo, più il suo spettro di emissione è spostato verso lunghezze d'onda minori. Quindi, come si potrà ben immaginare, lo spettro di emissione di una superficie urbana sarà notevolmente spostata verso l'infrarosso lontano rispetto allo spettro solare, tipicamente da 4 a 80  $\mu\text{m}$ . Come già visto, la lunghezza d'onda che corrisponde al picco di emissione varia con la temperatura, ma è intorno ai 14  $\mu\text{m}$  per temperature tipiche della superficie terrestre.

## 1.6- L'isola di calore.

Il fenomeno appena descritto al paragrafo precedente è una delle cause scatenanti del maggior riscaldamento nelle città (il cosiddetto effetto "isola di calore"). Ma questo non è il solo, infatti anche altri aspetti influiscono negativamente (figura 1.12):

1. Lo skyline urbano incrementa notevolmente la superficie colpita dal sole rispetto ad un normale paesaggio rurale.
2. I raggi rimangono intrappolati e non vengono riflessi indietro in modo adeguato, a causa degli alti palazzi che ne intercettano il ritorno verso l'atmosfera.
3. Il riscaldamento dei manufatti provoca l'aumento della radiazione termica, rilasciata nello spettro di frequenza infrarossa, causando una maggiore percezione di calore nel corpo umano.
4. Le superfici urbane possiedono una certa capacità termica e rilasciano il loro calore anche durante le ore notturne.
5. La presenza degli edifici ostacola il raffrescamento dovuto al vento.

Tutti questi aspetti, analizzati complessivamente, provocano un aumento della temperatura media notturna anche di 12 gradi centigradi rispetto alle zone rurali e di 2-3 gradi durante il giorno [7]. Visto in inverno, tale effetto può essere positivo, dato che può ridurre leggermente i consumi per il riscaldamento domestico, ma nel

periodo estivo provoca un aumento considerevole dei consumi dovuti all'accensione degli impianti di condizionamento, il cui uso innesca tra l'altro una retroazione positiva dei consumi, dovuto alla bassa efficienza energetica degli scambiatori di calore.

Questo processo può essere però parzialmente ridotto nel caso in cui ci sia presenza di vegetazione, perché l'energia assorbita su queste aree non viene dissipata sotto forma di calore ma utilizzata in buona parte per l'evapotraspirazione e per il processo di fotosintesi clorofilliana. Il fogliame esposto al sole infatti non si riscalda e quindi non deve raffreddarsi come qualsiasi altro materiale artificiale urbano che viene investito dalla radiazione solare.

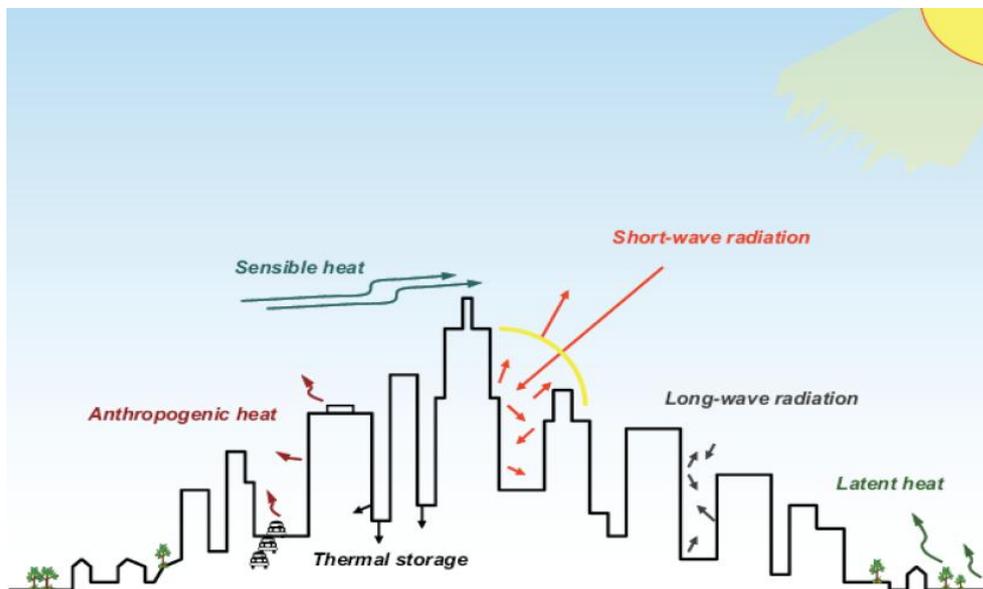


Figura 1.12: Illustrazione dell'effetto "isola di calore" causato dai vari fattori sopra descritti [7].

## Capitolo 2: Il Solar Ray Tracing.

### 2.1- Introduzione.

Come è noto, esistono diversi modelli per la previsione della copertura di campo elettromagnetico nell'ambito delle telecomunicazioni: dai modelli poco precisi ma veloci come quelli statistici, ai modelli deterministici molto complessi e costosi, sia dal punto di vista economico per la stesura dello scenario, sia dal punto di vista computazionale per il calcolatore. Uno degli algoritmi oggi più utilizzati è il Ray Tracing che, sebbene faccia parte della seconda famiglia di modelli, offre un buon compromesso tra precisione e complessità, rendendoli competitivi rispetto ai modelli "esatti" come quelli elettromagnetici.

Il suo utilizzo sempre più allargato è dovuto alla possibilità di eseguire simulazioni sia in ambito outdoor, che indoor, con una precisione fortemente dipendente dalla stesura dello scenario e non dall'algoritmo in sé.

L'idea di fondo che sta alla base di questo lavoro è essenzialmente quella di utilizzare il Ray Tracing per simulazioni solari, in accordo con il fatto che i raggi solari non sono altro che onde elettromagnetiche, con caratteristiche differenti rispetto a quelle usate nelle telecomunicazioni (non possiedono una polarizzazione ben precisa ad esempio), ma con analoghe proprietà di interazione con gli ostacoli.

### 2.2- Il modello a raggi.

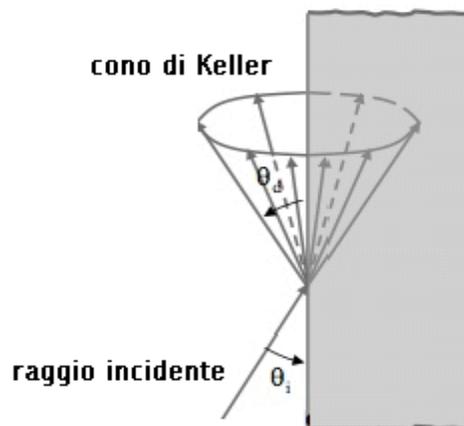
Il modello deterministico di Ray Tracing pone le sue basi sulla Teoria Geometrica della Propagazione (GTP), che formulizza la possibilità di descrivere, sotto certe ipotesi e condizioni, la propagazione di un'onda elettromagnetica tramite un semplice raggio geometrico. Infatti, se la radiazione elettromagnetica ha una lunghezza d'onda di dimensione di gran lunga minore rispetto a quella degli ostacoli con cui interagisce, e viaggia in un mezzo omogeneo, allora può essere idealizzata come una singola linea retta. Nell'ambiente simulativo quindi, i raggi collegano i due terminali attraversando lo spazio libero e/o interagendo con gli ostacoli dello scenario. Tali fenomeni (riflessioni, diffrazioni e diffusioni) vengono presi in considerazione dal calcolatore tramite l'elaborazione di un albero (visibility tree). Le dimensioni di quest'ultimo dipendono dal numero di interazioni, deciso dall'utente,

che ogni raggio può subire prima di poter essere considerato “estinto” e rimosso dalla simulazione, perché di intensità troppo ridotta per poter dare un contributo di potenza significativo.

### 2.2.1- Riflessioni, diffrazioni, trasmissioni e scattering diffuso.

L’algoritmo di tipo deterministico prima di tutto considera le possibili riflessioni e rifrazioni mediante la creazione della regione di visibilità che si viene a definire dopo ogni interazione, costruita grazie ad un processo iterativo che sfrutta la teoria delle immagini. Intuitivamente, dato un trasmettitore reale Tx, l’algoritmo crea la sua immagine (Tx’) rispetto al muro 1, l’immagine di Tx’ rispetto al muro 2 (Tx’'), e così via sino al raggiungimento del ricevitore.

Per quanto riguarda le diffrazioni, invece, la regione di visibilità che si viene a comporre in seguito ad una interazione del genere è molto più complessa. Essa è rintracciabile analizzando le direzioni assunte dai vari raggi che si vengono a creare, le quali giacciono sulla superficie individuata dal cosiddetto cono di Keller (figura 2.1); è quindi intuibile che il costo computazionale è nettamente superiore rispetto alla precedente elaborazione.



**Figura 2.1: il raggio che incide sullo spigolo crea molteplici raggi di diffrazione le cui direzioni giacciono sul cono di Keller.**

Per quanto riguarda il calcolo della trasmissione, l’algoritmo applica due volte la legge di Snell, una per ognuna delle due superfici dell’ostacolo (figura 2.2). Questo è necessario perché all’interno del materiale i raggi vengono deviati a causa del diverso indice di rifrazione che lo caratterizza.

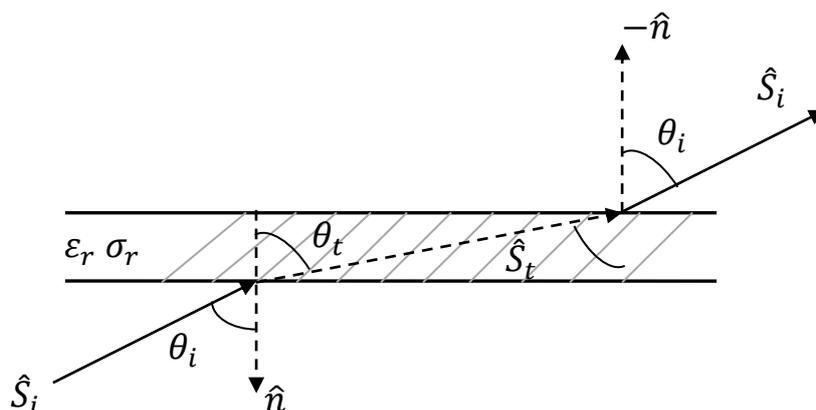


Figura 2.2: trasmissione di un raggio attraverso un ostacolo.

Tuttavia i fenomeni di diffrazione e di trasmissione non vengono considerati per le simulazioni solari. Infatti, a causa della ridotta lunghezza d'onda della radiazione solare rispetto alle dimensioni degli spigoli che costituiscono gli edifici urbani, non si ha luogo né a diffrazione, né tantomeno a trasmissione, perché la radiazione elettromagnetica a frequenze ottiche si estingue subito ai primi strati superficiali dei materiali comunemente utilizzati in edilizia (fatta esclusione dei vetri).

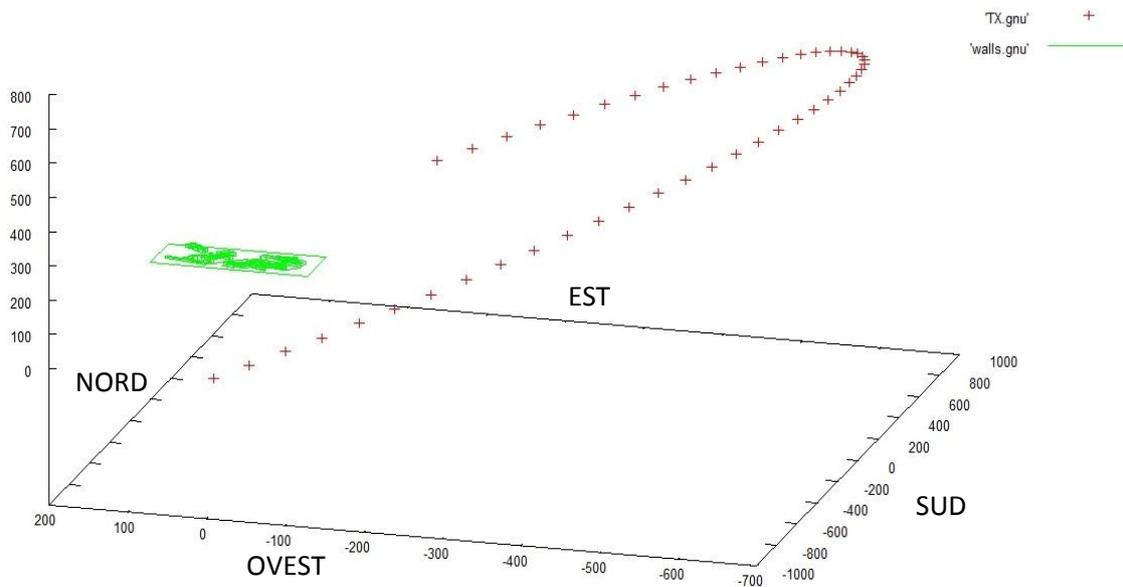
Terzo calcolo che l'algoritmo effettua è la diffusione (scattering) dei raggi che urtano l'ostacolo. Il numero di punti della superficie in cui si genera scattering devono essere di numero finito per ovvi motivi computazionali, quindi, a partire dai trasmettitori e/o dai ricevitori, viene eseguita una discretizzazione spaziale suddividendo nelle coordinate sferiche theta e phi l'angolo solido attraverso cui viene visto lo scenario dal trasmettitore/ricevitore. I punti di intersezione delle varie rette con gli ostacoli dello scenario sono considerati sorgenti di scattering, dai quali dipartono molteplici raggi che si propagano in tutte le direzioni esterne alla superficie dell'ostacolo, a seconda del tipo di modello utilizzato.

## 2.3- Funzionamento del Solar Ray Tracing.

L'algoritmo di Ray Tracing è un modello deterministico a raggi che si presta in maniera molto efficiente nella simulazione elettromagnetica di contesti telecomunicativi tra due o più terminali. Con il concepimento di un nuovo tipo di approccio simulativo della radiazione solare, che fa uso appunto del Ray Tracing, è stato necessario apportare una serie di modifiche e adattamenti intorno al cuore dell'algoritmo, il quale invece rimane pressoché invariato.

### 2.3.1- Modellizzazione della radiazione diretta.

Il principio base è quello di assimilare il sole ad un trasmettitore dotato di antenna isotropa, posizionato in maniera realistica rispetto allo scenario in analisi. La sua locazione in coordinate cartesiane viene poi inserita nell'apposito file di trasmettitore tramite un eseguibile, che consente inoltre di generare una disposizione multipla dei trasmettitori nel caso sia necessario simulare un intervallo di tempo o l'intero arco di una giornata (figura 2.3).



**Figura 2.3: Esempio di path solare primaverile sopra ad un generico scenario situato a 44°N 12°E**

Oltre alla posizione, il file dei trasmettitori deve ovviamente contenere anche il giusto valore di potenza di trasmissione. Questa viene calcolata utilizzando semplici considerazioni sulla propagazione sferica di energia, in modo tale che su un piano orizzontale privo di ostacoli, giunga una radiazione solare diretta la cui intensità sia stabilita a priori (da rilevazioni manuali di spazio aperto o da medie ricavate dai database):

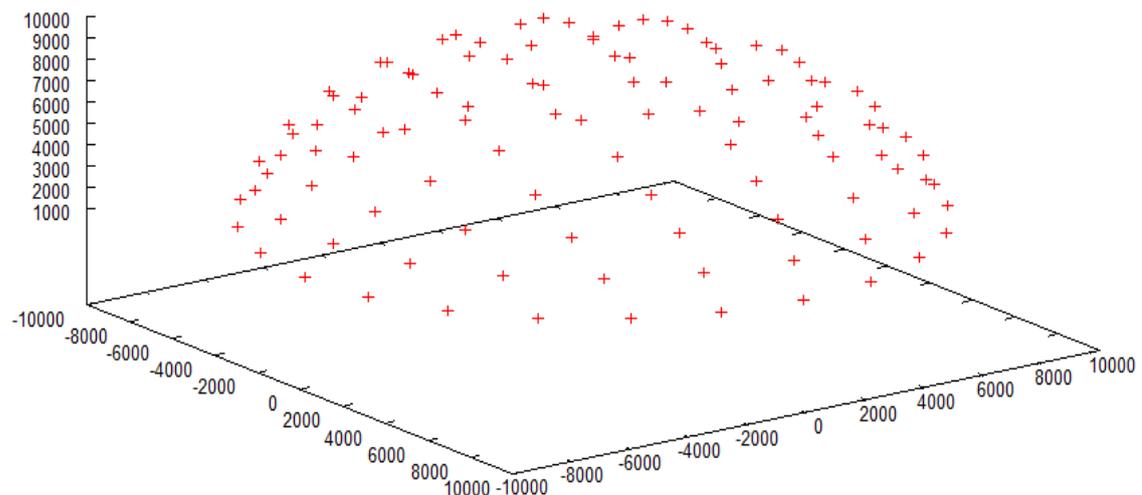
$$P_{TX} (dBW) = 10 \cdot \log_{10} \left( I_{GND\_beam\_hor} \cdot 4 \cdot \pi \cdot (D)^2 \right)$$

Dove per  $D$  si intende la distanza del trasmettitore dall'origine dello scenario, mentre  $I_{GND\_beam\_hor}$  rappresenta il valore di radiazione diretta sul suolo che deve essere rispettato in condizioni di spazio aperto.

### 2.3.2- Modellizzazione della radiazione diffusa.

Più complessa è invece la rappresentazione simulativa della radiazione diffusa. È in pratica impossibile descriverne l'esatto andamento spaziale, anche a causa della variabilità dovuta alle condizioni atmosferiche. Quindi si è deciso di considerare la radiazione diffusa dall'atmosfera in modo uniforme, ipotesi molto plausibile in condizioni di cielo sereno, ma che diviene via via sempre più errata all'aumentare del coefficiente di diffusione (o equivalentemente al diminuire dell'indice di chiarezza) perché si può constatare anche solo visivamente un notevole incremento della disomogeneità luminosa.

Per la simulazione il programma dispone quindi in automatico una moltitudine di trasmettitori uniformemente distribuiti atti a formare una semisfera che idealizza la volta celeste (figura 2.4).



**Figura 2.4: molteplici punti di trasmissione disposti a semisfera per simulare la volta celeste.**

Ognuno di essi deve quindi possedere ugual potenza di trasmissione, il cui valore anche in questo caso dipende dai coefficienti di diffusione (prelevati dal database oppure ottenuti da rilevazioni strumentali) e dall'irradiazione extraterrestre. Questo unico valore di potenza si ottiene a partire dal valore di radiazione diffusa che deve essere garantita al suolo, eseguendo poi un calcolo che tenga conto delle inclinazioni dei vari trasmettitori, in modo che complessivamente la potenza ricevuta al suolo sia quella prestabilita:

$$P_{TX} (dBW) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{I_{GND\_diffuse\_hor} \cdot 4 \cdot \pi \cdot (D)^2}{\sum_{i=1}^{N^{TX}} \text{sen}(\theta_i)} \right)$$

dove per  $\theta_i$  si intende l'angolo di elevazione, rispetto al piano orizzontale, del raggio proveniente dal trasmettitore  $i$ -esimo, mentre  $I_{GND\_diffuse\_hor}$  rappresenta appunto la radiazione diffusa al suolo.

### 2.3.3- Modellizzazione dello scenario.

Il modello di Ray Tracing utilizzato fa uso dell'approccio 3D proprio come accade nelle applicazioni indoor. I vantaggi che si ottengono in termini di accuratezza sono molteplici:

- ogni singola parete può essere resa o meno attraversabile dai raggi grazie alla personalizzazione dei parametri elettromagnetici, con una caratterizzazione completamente svincolata dall'edificio di appartenenza;
- possono essere definiti dei buchi nella parete come porte o finestre, cosa che può rivelarsi essenziale se la simulazione solare deve raggiungere un certo grado di precisione.

Nell'immagine successiva (figura 2.5) si può ben notare il livello di descrizione che si può raggiungere con il simulatore. Infatti, se i dati sono disponibili, è possibile inserire nella trattazione non solo finestre o particolari forme di tetti, ma anche i perimetri occupati dalle zone verdi, che come sappiamo influiscono notevolmente e in maniera positiva all'effetto non voluto dell'isola di calore. Ovviamente l'inserimento dei dettagli all'interno dello scenario comporta un incremento della precisione dei risultati ottenuti dalla simulazione, ma al contempo provoca un aumento considerevole dei tempi di calcolo. Sta quindi all'operatore decidere a seconda delle necessità quale sia la risoluzione migliore da adottare.

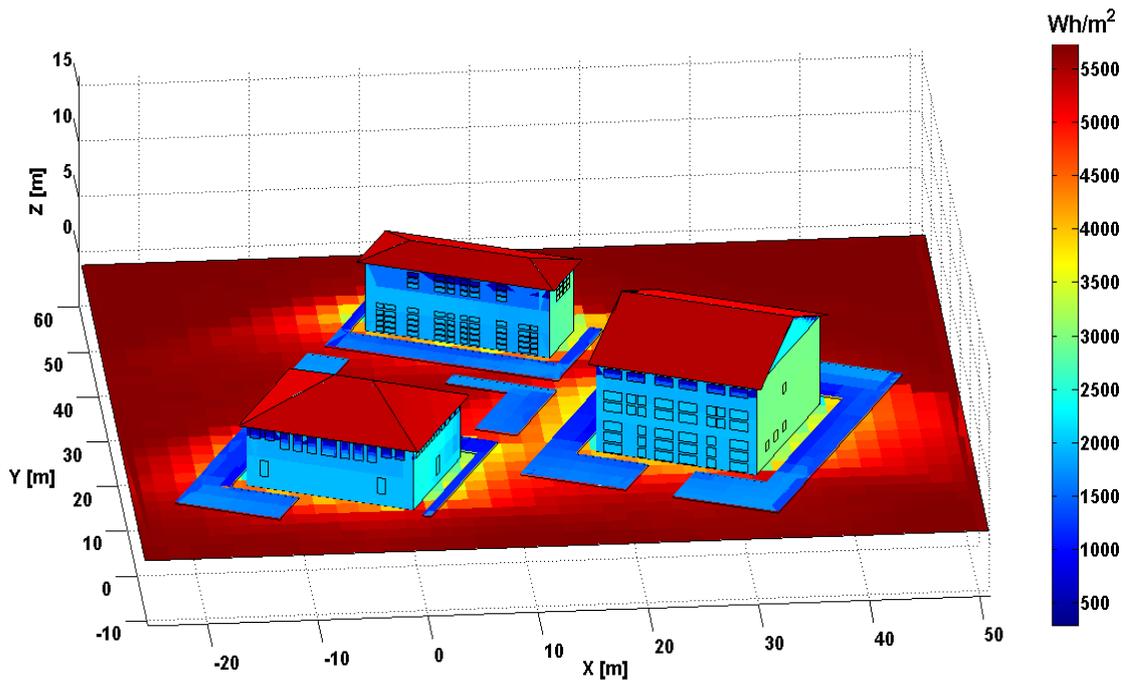


Figura 2.5: Energia giornaliera dissipata nel mese di Luglio in un piccolo borgo di Budrio (BO).

### 2.3.4- Collocazione dei ricevitori.

Nell'ottica del Solar Ray Tracing, i ricevitori non sono nient'altro che punti in cui si vuole misurare l'irradiazione solare (o la densità di radiazione oppure l'energia dissipata), quindi anch'essi, come i trasmettitori, sono "equipaggiati" da antenne isotrope e non necessitano di un diagramma di radiazione ben definito. In automatico quindi vengono disposti i ricevitori sulle pareti dello scenario per le quali si vogliono conoscere tali informazioni. L'unica condizione di non isotropia, che per ora viene controllata solo successivamente alla simulazione, è che i raggi ricevuti provengano soltanto dal semispazio individuato dalla normale alla superficie su cui il ricevitore giace. Questo è stato previsto perché ovviamente, un raggio che subisce interazione (riflettendosi ad esempio) su un manufatto, non deve essere "ricevuto" dalla stessa parete in questione.

Il principio su cui si basa la disposizione è molto elementare: i ricevitori sono dislocati sulle intersezioni di un grigliato avente una risoluzione dipendente dal grado di accuratezza che si vuole ottenere. Quando una linea della griglia interseca un ostacolo, in automatico vengono disposti ricevitori in verticale, con un passo anch'esso controllabile dall'utente (figura 2.6).

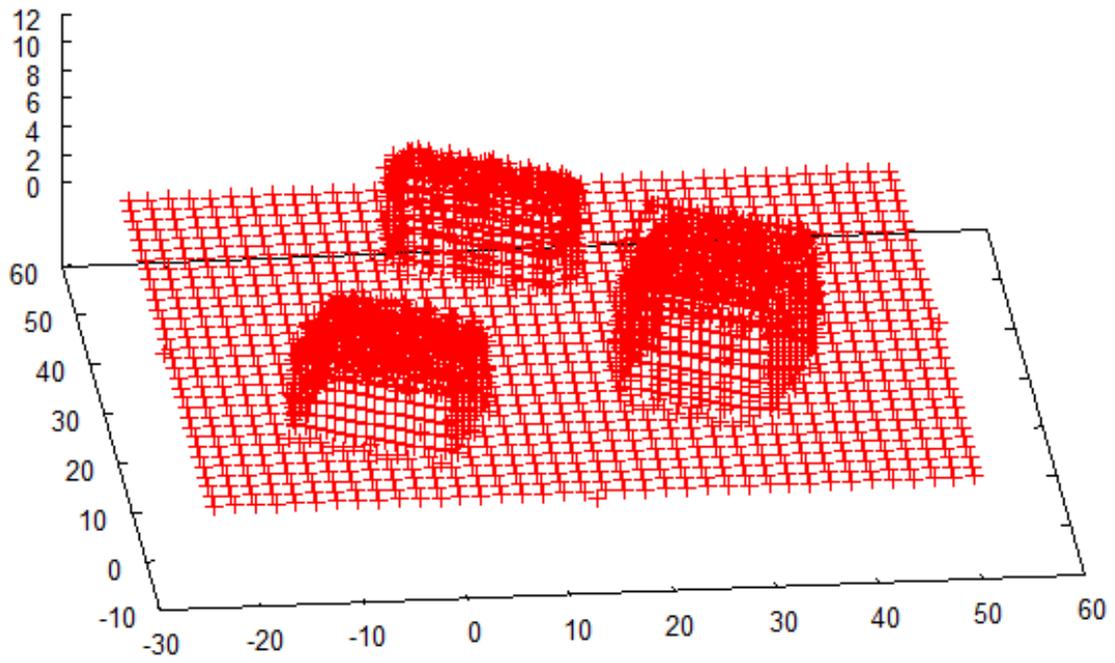


Figura 2.6: Ricevitori disposti su ogni tipo di ostacolo presente nello scenario di figura 2.5 (grigliato orizzontale di risoluzione 2 m, verticale di risoluzione 1 metro).

## Capitolo 3: Validazione del Solar Ray Tracing.

### 3.1- Introduzione.

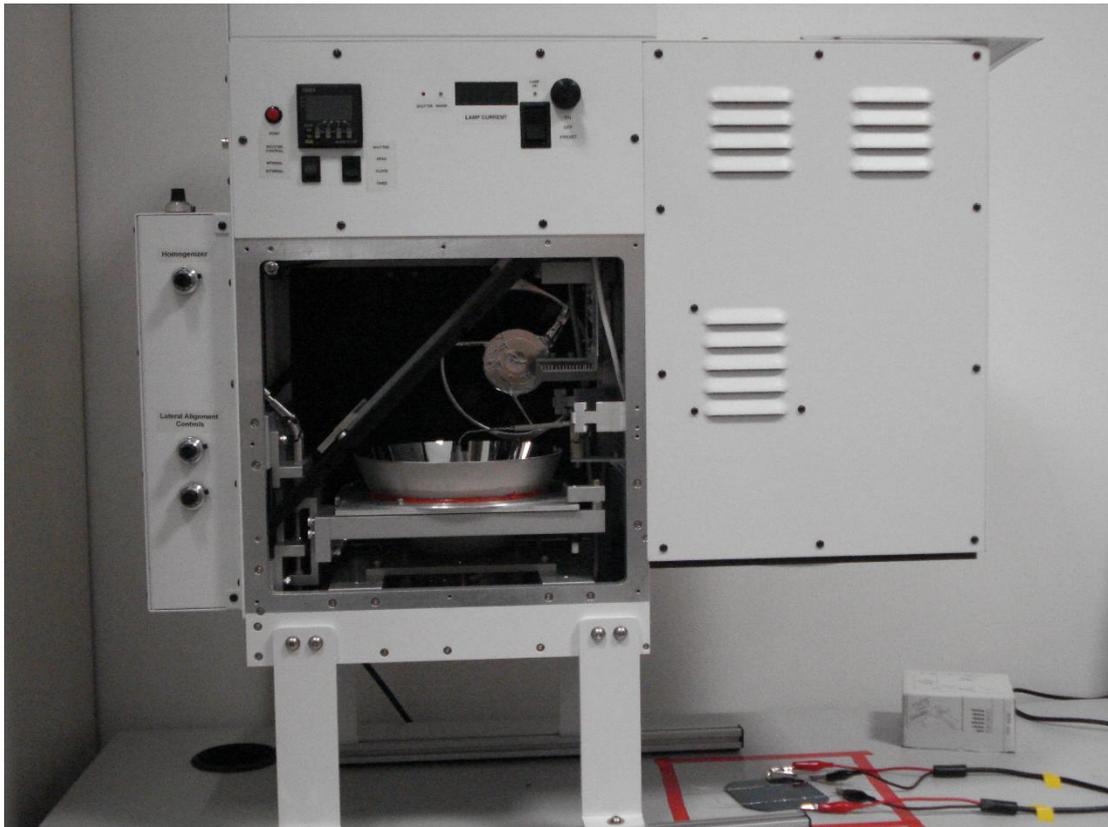
Dopo le modifiche apportate all'applicativo, è doveroso apprendere se i risultati generati dalle simulazioni possano essere considerati validi tramite una campagna di misure svolte all'aperto, in spazio libero da ostacoli oppure in prossimità di differenti tipologie di edifici e di varie colorazioni di intonaco.

Innanzitutto abbiamo preso come strumento di riferimento un solarimetro che misura la radiazione solare incidente (figura 3.1).



**Figura 3.1: Solarimetro Daystar DS-05a per la validazione del simulatore Ray Tracing solare.**

A causa dell'assenza di informazioni dettagliate riguardanti il funzionamento del dispositivo, è necessario ottenere il diagramma di ricezione nelle tre dimensioni. Ciò è stato reso possibile grazie alla disponibilità in sede universitaria di una lampada solare (figura 3.2), capace di emettere una radiazione luminosa del tutto simile a quella del Sole, appunto. Seppur tale macchinario sia stato acquistato per consentire ai ricercatori della Facoltà di Ingegneria di effettuare test sulle celle fotovoltaiche, si è verificato uno strumento utile anche in questo tipo di contesto.

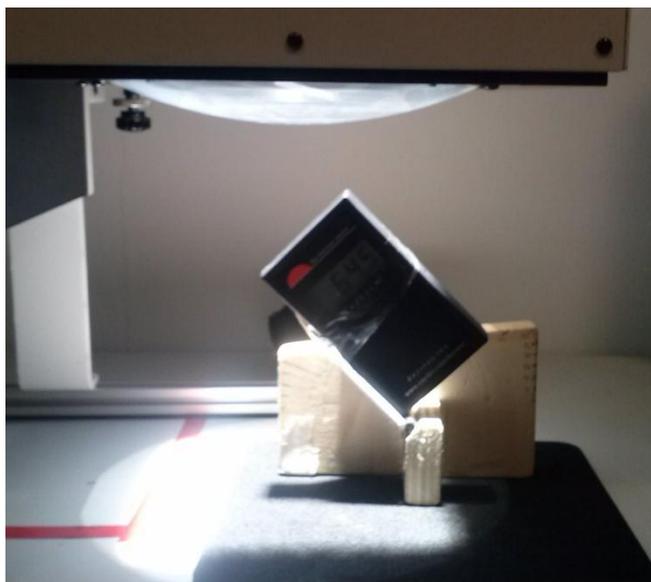


**Figura 3.2: Sun simulator con cella fotovoltaica in fase di testing.**

Ottenuto l'esatto comportamento del solarimetro, lo si è utilizzato in svariate misure utili al confronto con i dati ottenuti dal simulatore di Ray Tracing solare.

### 3.2- Caratterizzazione del Solar Meter di riferimento.

La lampada solare ha la capacità di emettere un unico fascio di raggi luminosi paralleli tra loro. Di conseguenza, si può determinare quale sia la risposta dello strumento per una data inclinazione del raggio solare ricevuto, andando semplicemente a ruotare l'angolo dello strumento rispetto al fascio, che invece rimane verticale. Quindi, con l'ausilio di un supporto rotativo costruito ad hoc (figura 3.3), si è caratterizzato il diagramma di ricezione dello strumento su due piani verticali, con una risoluzione di  $5^\circ$ .



**Figura 3.3: Solar Meter fissato al supporto rotativo.**

In particolare, i due piani verticali in questione sono quello parallelo al piano del display grafico e quello ad esso ortogonale (come si può capire da figura 3.4.A e 3.4.B). Una volta rilevati tutti i valori (con un picco di circa  $1000 \text{ W/m}^2$  in concomitanza della posizione verticale del meter), la normalizzazione rispetto al valore massimo riscontrato consente di ottenere i coefficienti moltiplicativi reali da inserire nel post-processing del nostro simulatore di Ray Tracing. Se tale lavoro non fosse stato svolto, non sarebbe stato possibile ottenere un confronto equo tra i valori misurati all'aperto e quelli ottenuti dalla simulazione. Infatti il modello a raggi prevede per "default" un coefficiente moltiplicativo (sempre minore o uguale all'unità) tipicamente "lambertiano", che segue cioè il coseno dell'angolo di incidenza rispetto alla normale alla superficie. Tali coefficienti (ideali) si sono rivelati essere palesemente maggiori rispetto a quelli che caratterizzano il meter, come si può facilmente constatare in figura 3.4.C, dove viene mostrato l'andamento del coefficiente di ricezione in funzione dell'angolo di arrivo del fascio luminoso rispetto alla normale dell'interfaccia di acquisizione del meter.

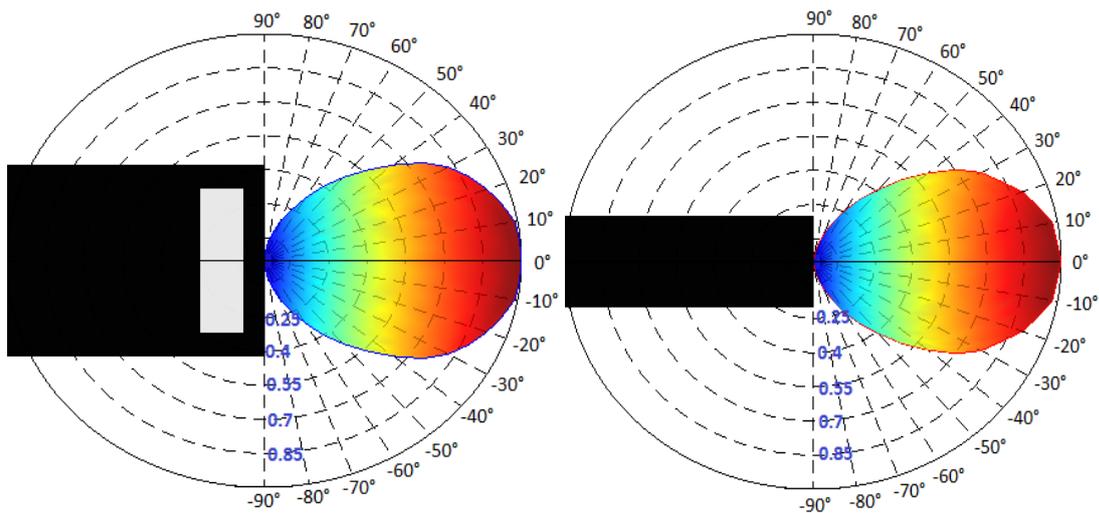


Figura 3.4.A e 3.4.B: Pattern grafico dei due piani verticali dello strumento.

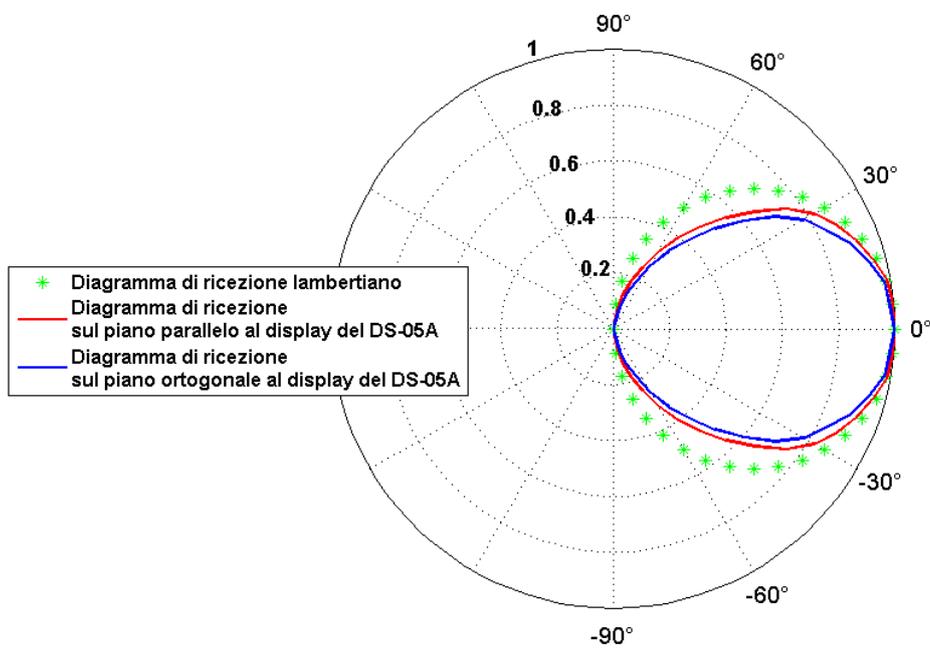
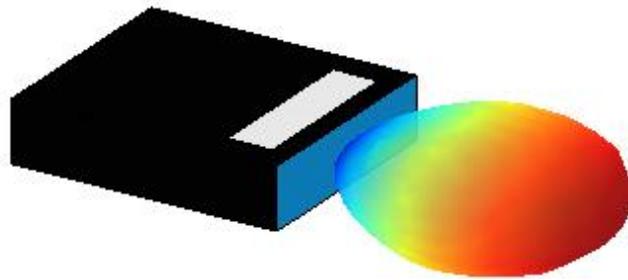


Figura 3.4.C: Caratteristica di ricezione sui due piani verticali, in un unico diagramma polare.

Misurato il comportamento al variare dell'inclinazione su entrambi i piani, è stato possibile ottenere, tramite una semplice interpolazione ellittica, la caratteristica di ricezione dello strumento in tutte le possibili direzioni di arrivo di un raggio ottico (figura 3.5).



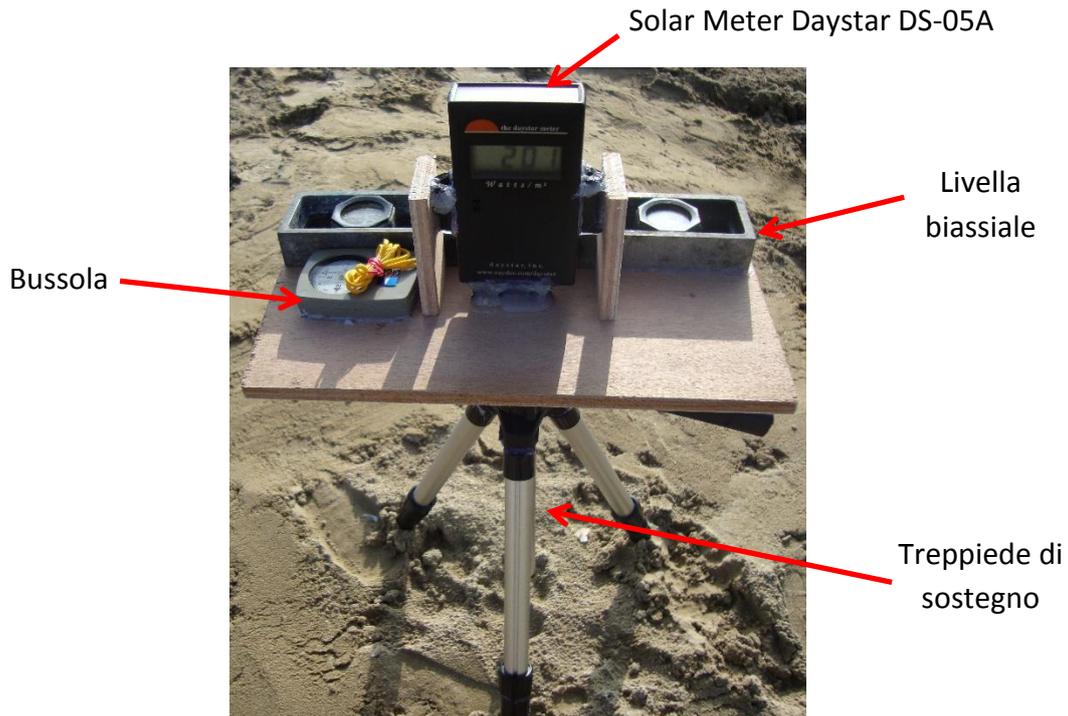
**Figura 3.5: Modello 3D del pattern di ricezione.**

Sempre dalla stessa figura si può notare, facendo un po' di attenzione, che il pattern non rappresenta un solido di rotazione. Quindi, per via di questa disomogeneità, si è constatato che se, durante le misure sul campo, il dispositivo viene ruotato sul suo asse, mantenendo comunque l'interfaccia di ricezione perfettamente orizzontale, i valori di radiazione solare misurati possono variare anche in modo significativo. Sarà pertanto necessario garantire la stessa orientazione per tutta la campagna di misura: per convenzione il piano verticale parallelo al display grafico del meter verrà orientato sempre in direzione Est/Ovest, ovvero direzione che corrisponde ad un azimut di  $0^\circ$ . Questa scelta è dettata dal fatto che il Ray Tracing considera come asse  $x$  appunto la direzione Est, ed è quindi lo stesso criterio con cui è stato redatto il pattern di ricezione.

### 3.3- Modalità di rilevamento.

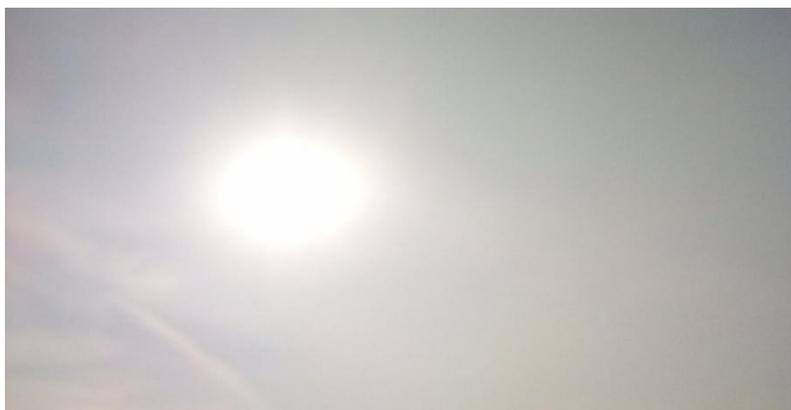
Innanzitutto è necessario predisporre lo strumento in modo che l'interfaccia di ricezione sia perfettamente orizzontale, a prescindere dalle imperfezioni del terreno. Il meter viene perciò alloggiato su una superficie mantenuta sempre in piano tramite una livella biassiale, il tutto sostenuto da un cavalletto regolabile sugli stessi due assi (figura 3.6). Per quanto riguarda il corretto orientamento azimutale del piano verticale parallelo al display (che ricordiamo deve giacere sul piano verticale Ovest/Est) è stata aggiunta una bussola che indicherà la giusta direzione.

Una volta rispettati questi vincoli, è possibile la rilevazione dei valori di radiazione globale su piano orizzontale, mentre per la misura della radiazione diffusa si deve ostruire del tutto l'arrivo dei raggi diretti sulla cella fotovoltaica del solarimetro.



**Figura 3.6: Treppiede di supporto del Solar Meter, con livella di controllo del piano orizzontale e bussola per l'orientazione azimutale dello strumento.**

Per fare ciò bisogna prestare particolare attenzione a non coprire né troppa porzione di cielo (fonte di radiazione diffusa), né troppo poca. Infatti, anche se apparentemente il sole viene completamente ostruito, i raggi diffusi nella porzione di cielo immediatamente vicina hanno una intensità di gran lunga maggiore rispetto a qualsiasi altra zona della volta celeste, cosa che li rende (in potenza) più simili a raggi diretti. Questo fenomeno accade soprattutto nel caso di cielo velato e/o torbido (figura 3.7), mentre nel caso di cielo sereno questo problema è molto più limitato, dato che la luminosità in prossimità della zona di cielo occupata dal sole è più uniforme.



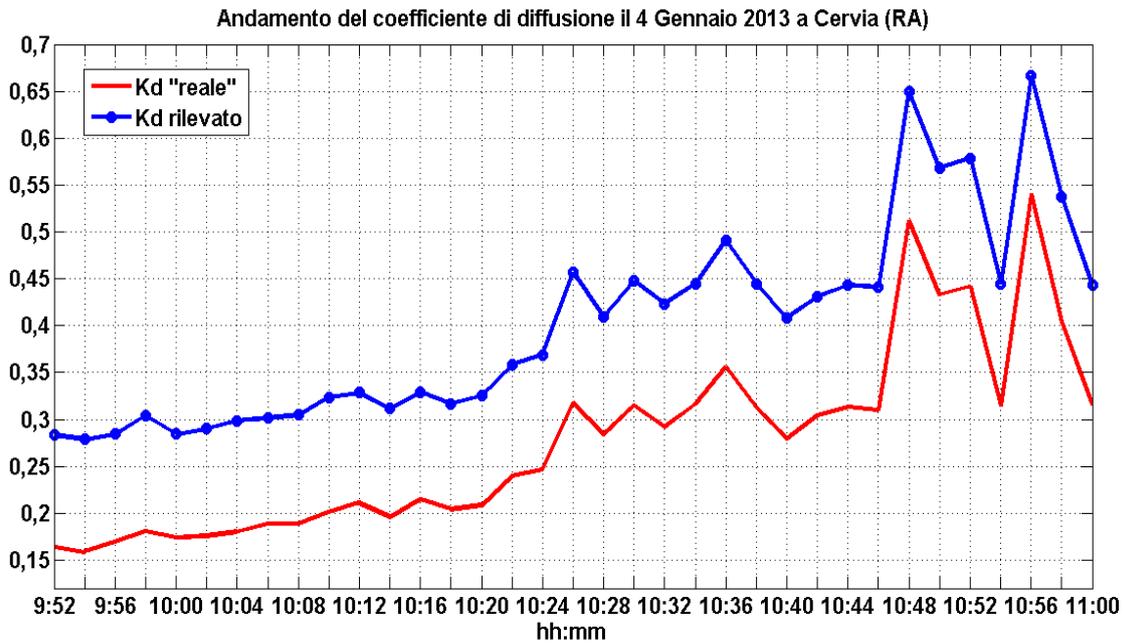
**Figura 3.7: La dimensione apparente del sole aumenta nelle giornate ad elevata foschia.**

Utilizzando un ombreggiamento opportuno (facendo attenzione al problema appena esposto), con una distanza temporale il più ridotta possibile (rispetto al rilevamento della radiazione globale) viene effettuata quindi anche la misura di radiazione diffusa, per arrivare direttamente al calcolo del coefficiente di diffusione tramite semplice rapporto dei due valori rilevati. Dalla conoscenza di tali informazioni, con l'ausilio del software viene invece calcolato il valore dell'indice di chiarezza, in modo da disporre di tutti i parametri necessari al simulatore solare.

L'ultima misura, essenziale per la validazione del software, è quella effettuata in prossimità di una parete, ad una distanza prefissata, sempre con il meter orizzontale.

### 3.4- Calcolo della radiazione “reale”.

Il calcolo dei giusti parametri solari (indice di chiarezza e coefficiente di diffusione derivati dalle misure in spazio aperto) da inserire all'interno del programma non è immediato. Infatti, a causa del diagramma di ricezione non ideale del solarimetro, il valore indicato sul display non è da considerarsi un valore di radiazione reale. In particolare, dal grafico già analizzato di figura 3.4.C, si può notare come la rilevazione di potenza diventi più accurata via via che il fascio luminoso giunge in direzione perpendicolare alla cella fotovoltaica. Questo fenomeno può provocare una distorsione dei due parametri solari necessari, causando un errore nell'associazione della potenza ai vari trasmettitori utilizzati durante la simulazione. In particolare, si riscontra un effetto peggiorativo del coefficiente di diffusione  $k_d$  (figura 3.8), causato evidentemente da una maggiore attenuazione della radiazione diretta (in ricezione sul solarimetro) rispetto a quella diffusa. Da questa constatazione si può affermare che, con questo particolare pattern di ricezione, la radiazione diffusa è meno sensibile a tale tipo di distorsione rispetto a quella diretta, probabilmente a causa del fatto che i raggi diffusi che danno maggior contributo (ovvero quelli che giungono perpendicolarmente o quasi alla cella fotovoltaica) sono anche quelli che subiscono minor “errore” in fase di ricezione. Al contrario invece la radiazione diretta giunge sempre (nei mesi invernali) da angoli di elevazione per i quali il pattern di ricezione risulta molto differente rispetto al diagramma lambertiano ideale. Se fosse possibile effettuare rilevamenti nei mesi estivi, e quindi caratterizzati da una maggiore altezza solare, i due andamenti in figura 3.8 sarebbero certamente molto più vicini tra loro.



**Figura 3.8: Esempio di confronto tra coefficiente di diffusione rilevato e "reale" in una mattina di cielo sereno, con qualche leggero annuvolamento.**

Tuttavia con il modello a raggi (in grado di calcolare per ogni raggio ricevuto l'angolo di elevazione e di azimut) possiamo cercare di fare una stima della radiazione solare effettiva: per prima cosa si effettua una simulazione solare basata su potenze di trasmissione legate direttamente ai parametri solari ottenuti dai rilevamenti. Nel post-processing però si andrà a dividere la potenza ricevuta associata al singolo raggio per il corrispondente coefficiente moltiplicativo del pattern (ottenendo così una stima della reale densità di potenza incidente sullo strumento), per poi moltiplicare il risultato per il coefficiente ideale di ricezione lambertiana. Si ottengono così valori più veritieri di radiazione orizzontale globale e diffusa, così da poterli sfruttare per il calcolo delle giuste potenze di trasmissione da usare nel Ray Tracing (figura 3.9).

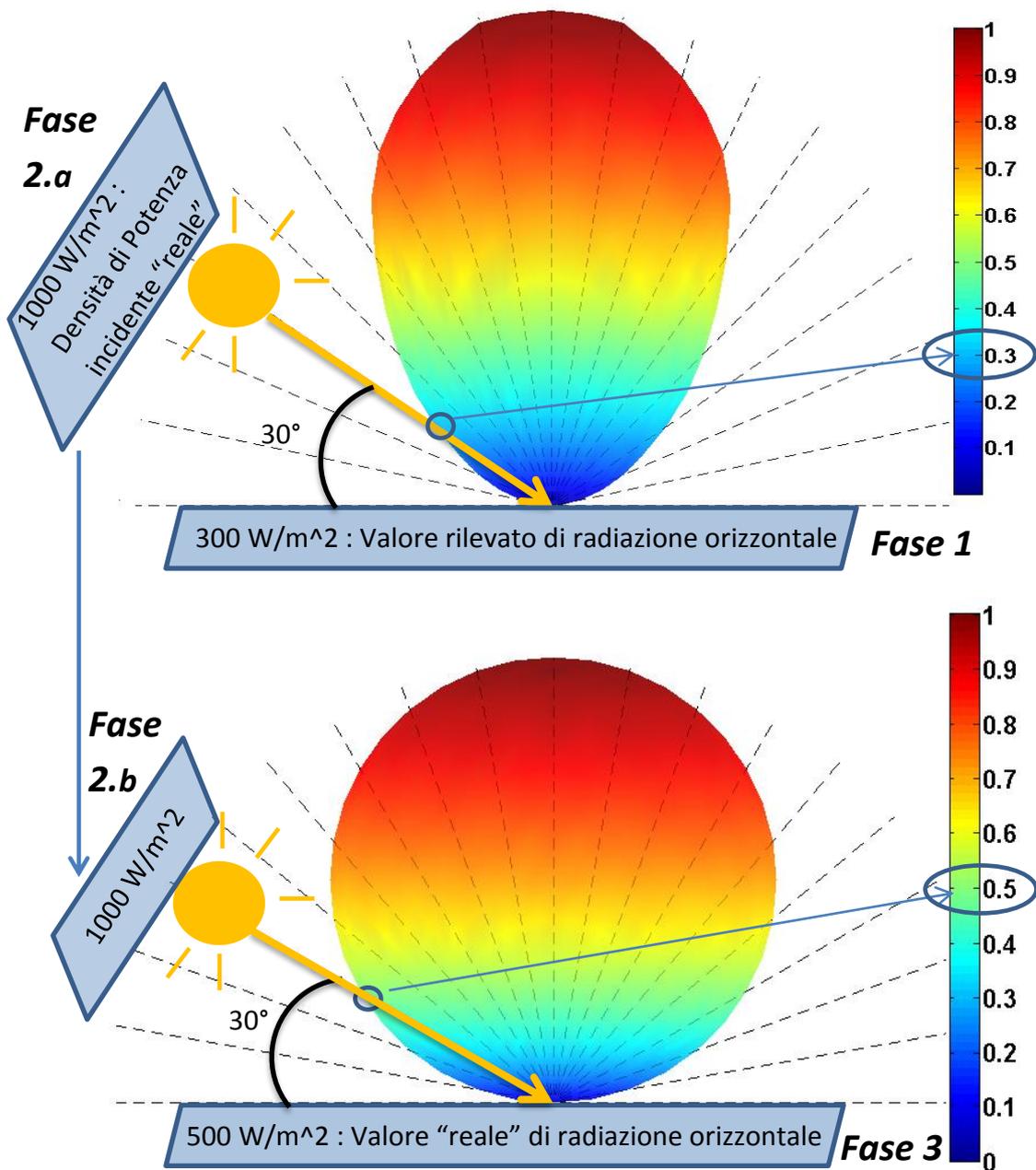


Figura 3.9: Esempio di calcolo della radiazione orizzontale "reale" a partire dalle rilevazioni eseguite tramite solarimetro.

Come verifica del corretto procedimento, eseguendo una seconda volta la stessa simulazione con un post-processing che utilizza però come coefficienti moltiplicativi esclusivamente quelli del pattern reale (diagramma di ricezione specifico del solarimetro), si devono riottenere gli stessi valori (o quasi) di radiazione globale e diffusa orizzontale visualizzati sul display durante la fase di rilevamento in spazio aperto.

## 3.5- Misure sul campo e confronti col simulatore.

Come già descritto precedentemente, il passo successivo alla determinazione dei valori di radiazione reale da applicare nel simulatore, è quello della validazione del Ray Tracing solare, con semplici scenari in cui siano presenti solo poche pareti. Lo scopo è infatti quello di capire se gli effetti di ostruzione, di riflessione o di scattering riprodotti dal simulatore vengono riscontrati allo stesso modo anche nella realtà.

### 3.5.1- Rilevamenti di cielo sereno.

Prendendo in esame momenti della giornata caratterizzati da assenza di nuvolosità (almeno per quanto riguarda la porzione di cielo interessata dalla radiazione diretta) si vuole determinare se il Ray Tracing abbia la capacità di descrivere realisticamente la radiazione riflessa e diffusa da un muro. Le analisi sono svolte in luoghi privi di ulteriori ostacoli, quali spiagge, prati o parcheggi, misurando la radiazione solare ad una distanza prefissata da un muro che sia in qualche modo esposto a sud.

La campagna di misure evidenzia sin da subito un palese incremento della potenza incidente sul solarimetro quando questo si trova in prossimità del muro. Come ci si aspettava dalle varie esperienze simulative condotte in passato, tale incremento supera di gran lunga la perdita di radiazione dovuta all'ostruzione della luminosità di metà volta celeste causata dalla presenza della costruzione.

Innanzitutto è stata campionata ancora una volta la radiazione globale e diffusa di spazio aperto, ricavando tramite semplice simulazione Ray Tracing (in assenza di ostacoli) i valori "reali" della densità di potenza su piano orizzontale privo di ostacoli. Questi sono poi inseriti sotto forma di potenza di trasmissione nella simulazione vera e propria, il cui scenario contiene questa volta l'oggetto riflettente e scatterante. I valori ottenuti dal Ray Tracing sono a questo punto confrontabili direttamente con i rilevamenti in prossimità del muro. Per migliorare la verosimiglianza dei risultati ottenuti, viene aumentato il numero di punti di scattering previsti dal simulatore (a scapito di una minore velocità di esecuzione), cercando perciò di avere sul terreno una radiazione scatterata dal manufatto il più possibile uniforme.

Sebbene le condizioni meteo del periodo invernale non consentano di avere molte giornate caratterizzate da insolazione piena e costante, si è cercato (quando possibile)

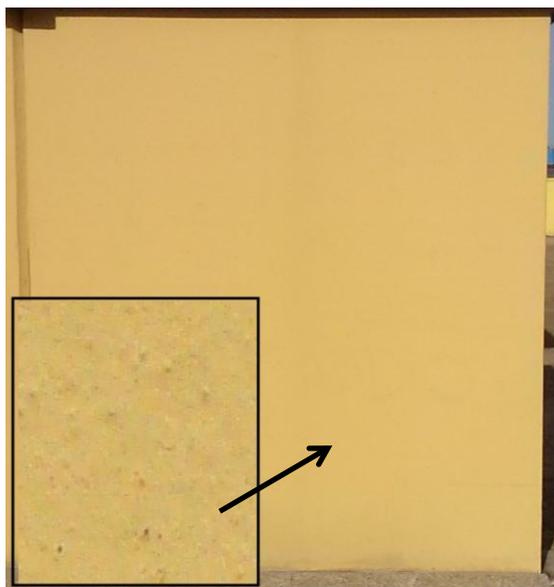
di eseguire il massimo numero di rilevazioni in un ampio arco temporale, con l'accorgimento essenziale che i valori di spazio aperto e quelli di prossimità siano riferiti praticamente allo stesso momento e condizione atmosferica (anche se a rigore le due misure dovrebbero essere eseguite contemporaneamente, con due strumenti identici).

Successivamente, non conoscendo a priori le caratteristiche elettromagnetiche del manufatto (quali albedo, coefficiente di scattering e altre caratteristiche di diffusione), sono state eseguite decine di simulazioni per ottenere la combinazione ottima dei parametri, che fossero allo stesso tempo fisicamente accettabili e validi ad ogni ora del giorno. Quelli più importanti e che introducono le maggiori variazioni nelle simulazioni sono:

- Albedo: rappresenta la porzione di radiazione riflessa su quella incidente totale ed è legato ai parametri elettromagnetici dei manufatti;
- S\_R: il coefficiente di scattering backward è un parametro che indica la percentuale di potenza retrodiffusa che si diffonde per scattering, riducendo di conseguenza quella per pura riflessione;
- Diagramma di scattering: il simulatore consente di scegliere la modalità di ripartizione dei raggi diffusi (già descritti nel paragrafo 1.5.2);
- SCAT\_ALPHA\_R modula l'ampiezza angolare del lobo nel caso di modello a singolo lobo: all'aumentare di questo valore, la "direttività" del diagramma aumenta, con una minore dispersione direzionale dei raggi diffusi.

#### 3.5.1.1- Spiaggia di Cervia, 26 Gennaio 2013, costruzione arancione.

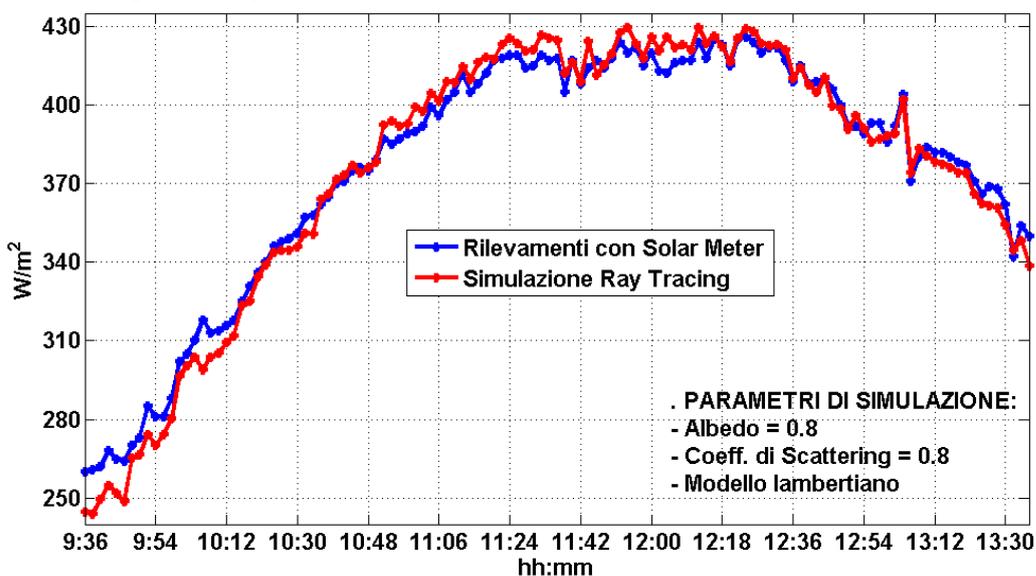
Il muro sotto esame fa parte di uno stabilimento balneare: possiede una colorazione di tonalità arancio e l'intonaco è nuovo, abbastanza rifinito e con poche imperfezioni (figura 3.10), con un grado di rugosità superficiale non troppo elevato.



**Figura 3.10: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.**

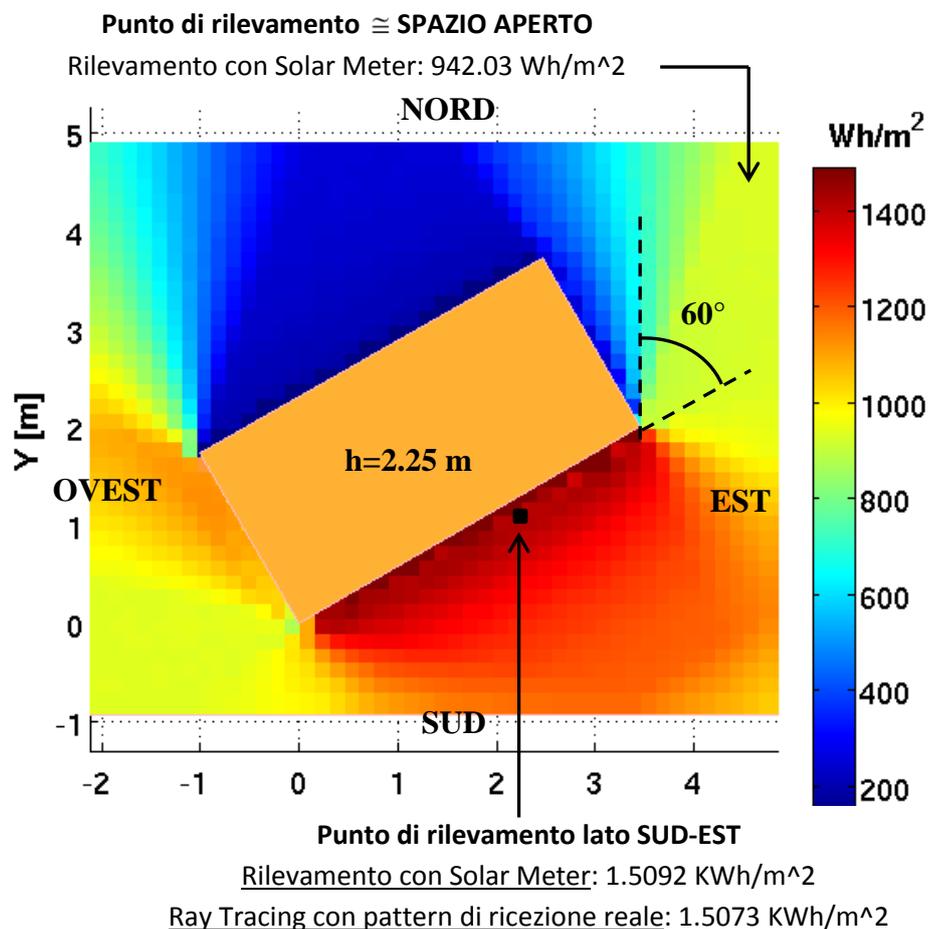
Questa giornata è stata caratterizzata da una leggera presenza di umidità nel cielo ma dalla totale assenza di nuvolosità, consentendo una rilevazione prolungata nel tempo (4 ore). I 121 campionamenti effettuati ogni 2 minuti consentono di avere una stima più accurata del comportamento del muro, e rimuovono eventuali errori dovuti a variazioni brusche dell'umidità del cielo, più veloci del piccolo intervallo di tempo tra le due misure di spazio aperto e di prossimità. Utilizzando un albedo di 0.75 e un coefficiente di scattering di 0.8, con una descrizione del lobo di scattering di tipo lambertiano, si è ottenuto un buon confronto con le rilevazioni (figura 3.11).

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013



**Figura 3.11: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.**

Per avere una visione più chiara dello scenario simulativo di riferimento, e di quanto sia l'ammontare della densità di energia incidente complessiva durante le quattro ore di rilevamenti, nella figura seguente viene mostrato un grafico, generato dal simulatore. In particolare, i vari "patch" colorati, che identificano il valore energetico simulato "puntualmente", formano un grigliato (intorno alla costruzione) di risoluzione 15 cm, posti ad una altezza di 53 cm dal suolo, quota in cui si trova lo stesso sensore del solarimetro durante le misure. Il grafico è quindi accompagnato anche dai valori energetici di confronto ottenuti dal meter e stimati tramite Ray Tracing, riferiti però al singolo punto di rilevamento.



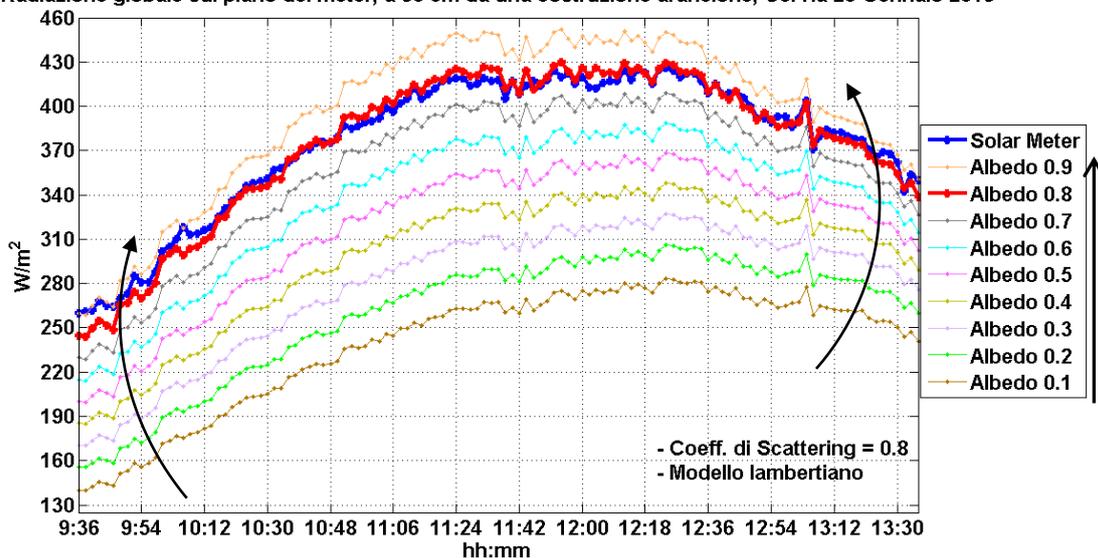
**Figura 3.12: Simulazione della densità di energia incidente totale durante le 4 ore di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).**

Bisogna in realtà precisare che i valori di energia nei vari "patch" della figura rappresentano il modo in cui il Ray Tracing cerca di emulare il comportamento del solar meter di riferimento se questo fosse posizionato in ognuno di quei punti. Con una strumentazione caratterizzata da un diagramma di ricezione che si avvicina all'idealità, i livelli energetici di figura 3.12 (che sarebbero nuovamente riprodotti dal

Ray Tracing sostituendo semplicemente il pattern di ricezione) sarebbero nettamente superiori.

Di seguito invece vengono riportati diversi plot che rappresentano il modo in cui i valori dei parametri principali influenzano i risultati delle simulazioni. In figura 3.13.A si può notare il classico abbassamento quasi per traslazione (più accentuato nelle ore in cui aumenta l'altezza solare) dovuto alla riduzione dell'albedo associato al manufatto, mentre in figura 3.13.B l'aumento del coefficiente di scattering ( $S_R$ ) produce un "piegamento" della curva della densità di potenza, con un incremento progressivo dei valori rispetto alle misure nella prima metà della mattinata ed al contempo una riduzione nella seconda metà della stessa.

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013



Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013

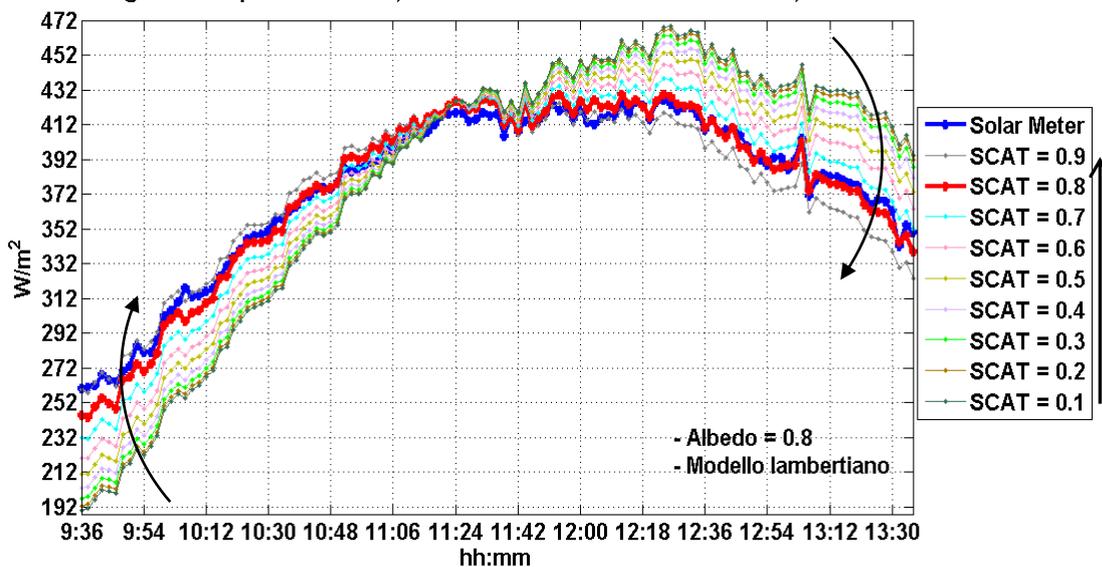
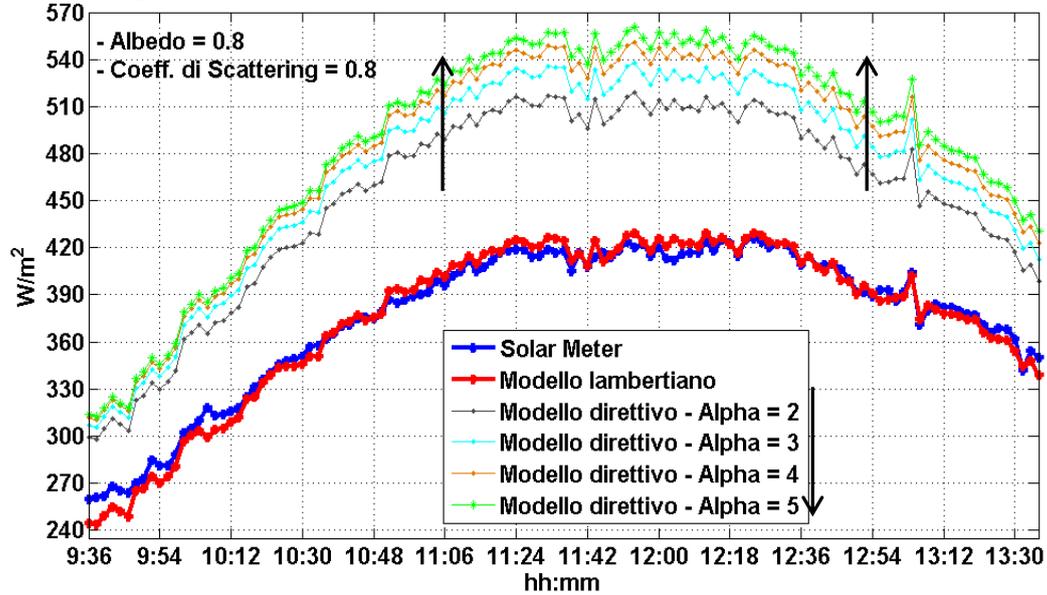


Figura 3.13.A e figura 3.13.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori dei parametri di albedo e SR. In rosso, la curva ottima.

In ultima analisi si vuole mostrare come possono cambiare i risultati modellando diversamente lo scattering con lobi direttivi via via sempre più stretti (figura 3.14.A) oppure rimuovendoli del tutto, prevedendo nessuna interazione oppure solo interazioni puramente riflettive (figura 3.14.B).

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013



Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013

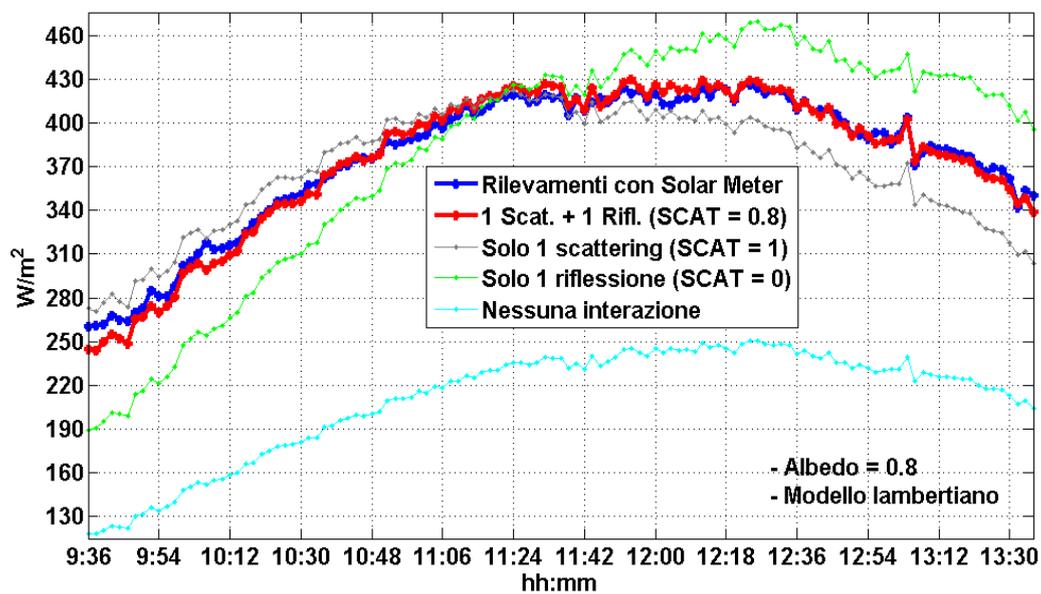


Figura 2.14.A e figura 3.14.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori di alpha e con vari tipi di interazioni previste dal Ray Tracing. In rosso, la curva ottima.

### 3.5.1.2- Spiaggia di Cervia, 3 Febbraio 2013, costruzione arancione.

Per stabilire il giusto funzionamento del simulatore e la correttezza dei parametri elettromagnetici del manufatto precedentemente ricavati, considerando la stessa posizione ai piedi della costruzione balneare, sono state condotte delle ulteriori rilevazioni (con risoluzione temporale di un minuto) in un altro orario di una differente giornata, sempre di cielo sereno ma con qualche nuvola sottile di passaggio. In figura 3.15 si può notare un ottimo confronto con i dati, che dimostra l'esattezza dei parametri e la ripetibilità della simulazione in diverse condizioni atmosferiche ed a diverse ore del giorno.

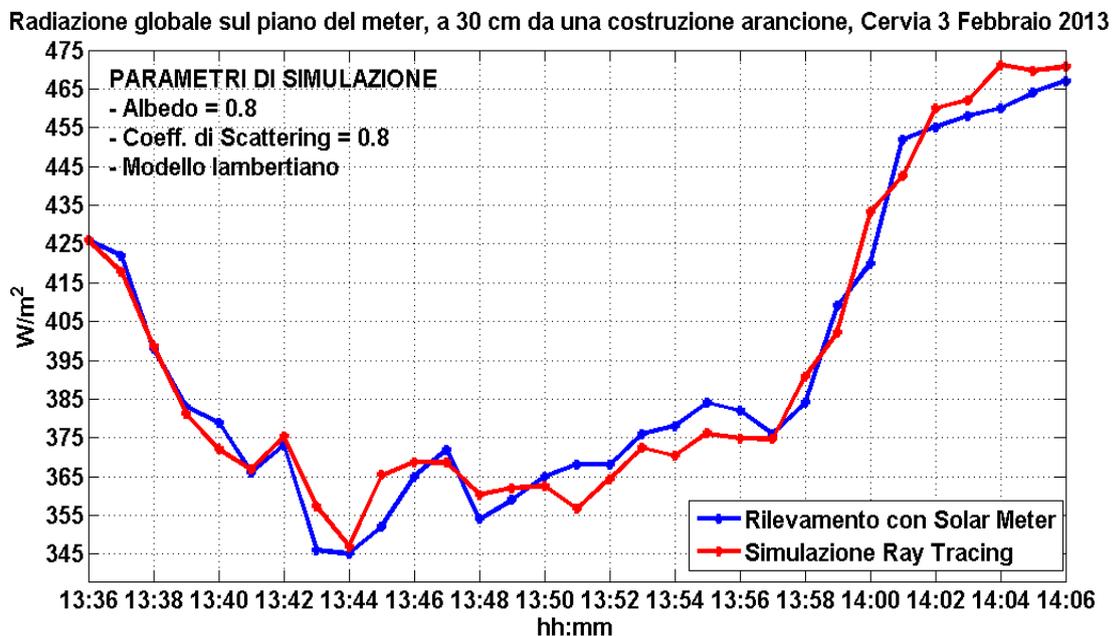


Figura 3.15: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) nello stesso punto usato nell'analisi precedente di paragrafo 3.5.2.1.

### 3.5.1.3- Cesena, 27 Gennaio 2013, costruzione rosa pallido.

Ulteriori misure di validazione riguardano un piccolo edificio di colorazione rosa pallido. Dato che le dimensioni ed i materiali utilizzati per il manufatto sono del tutto simili a quelli dello stabilimento balneare, si vuole in questo caso stabilire se i parametri utilizzati in precedenza possano (con un piccolo ritocco) rigenerare nuovamente dei buoni risultati. Infatti il muro in questione presenta una rugosità superficiale superiore (figura 3.16), quindi è plausibile un leggero incremento del coefficiente di scattering.

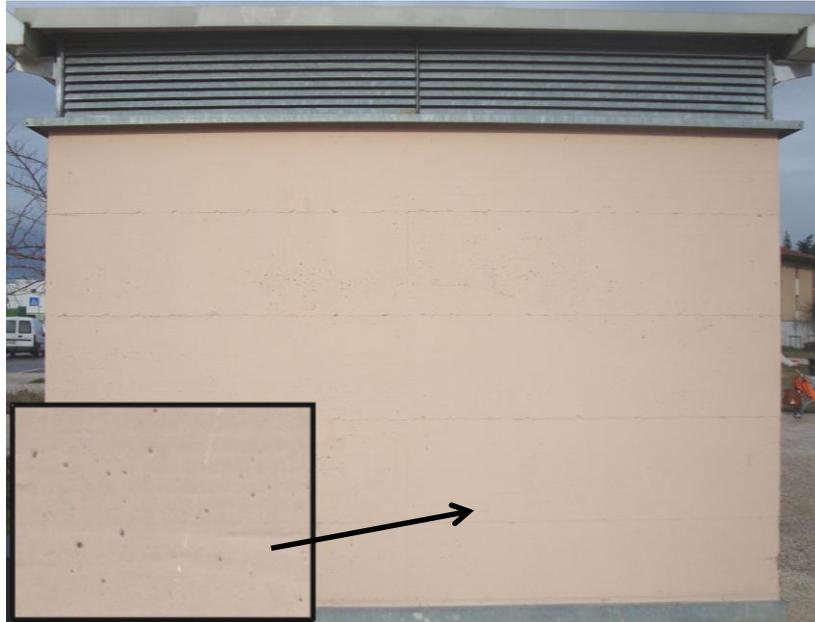


Figura 3.16: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.

Il grafico successivo rappresenta il confronto tra i dati ottenuti dal simulatore con i rilevamenti eseguiti (ogni minuto) a 30 cm dal muro esposto a Sud - Est.

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione rosa pallido, Cesena 27 Gennaio 2013

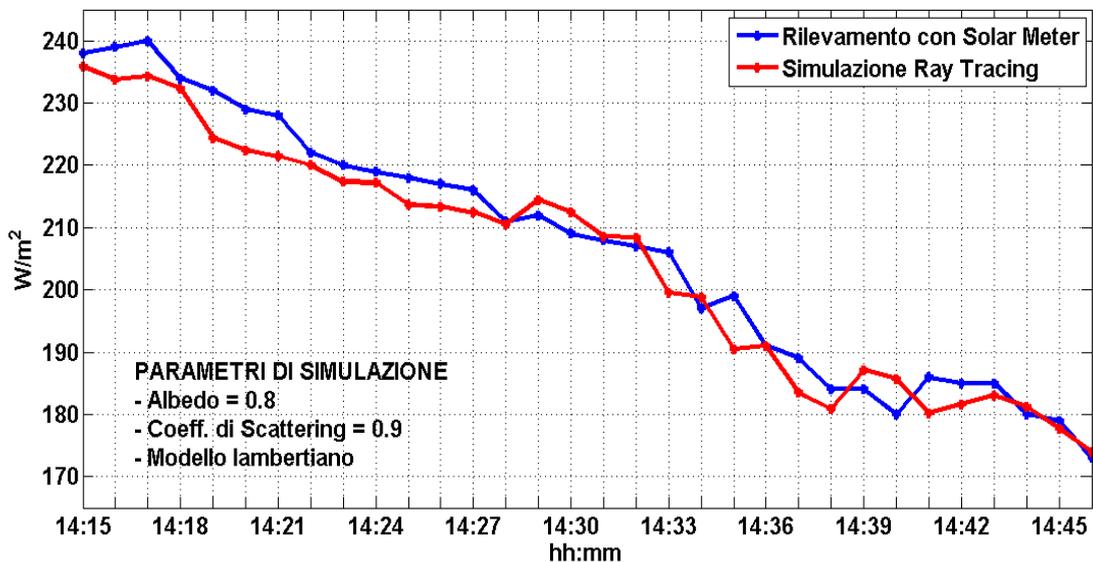
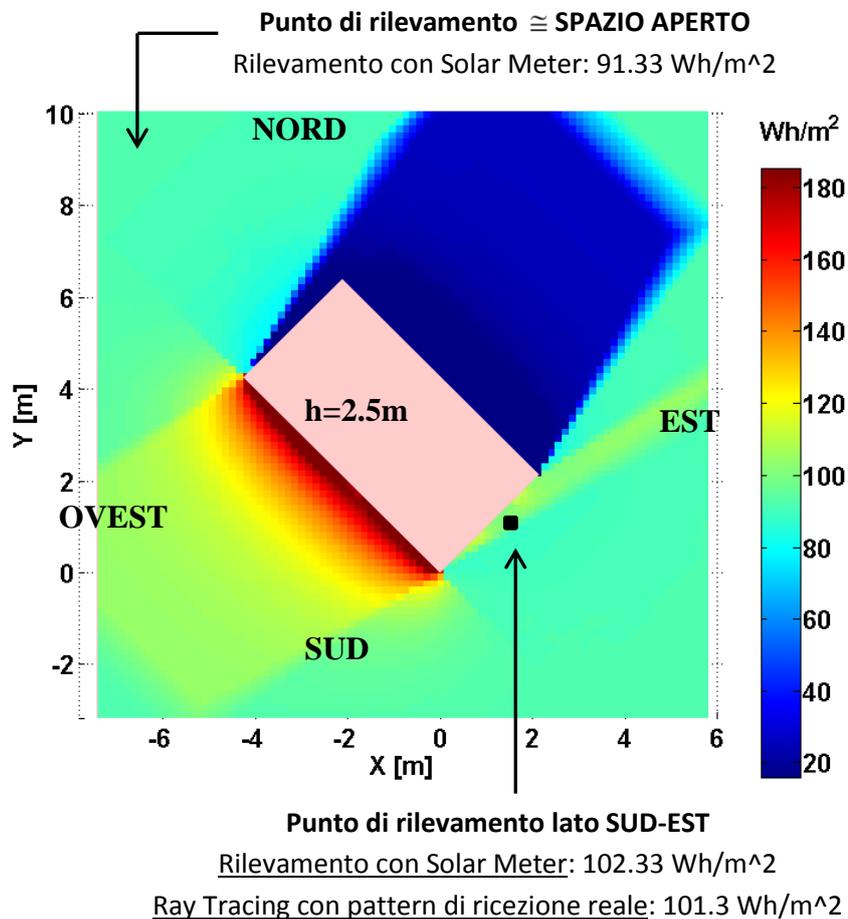


Figura 3.17: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.

Anche questa validazione mostra quindi un buon confronto dei dati prodotti dalla simulazione con le misure effettuate.

Per meglio comprendere lo scenario di riferimento, si mostra nuovamente il grafico dell'energia incidente nell'arco di tempo in questione (30 minuti) su un piano di

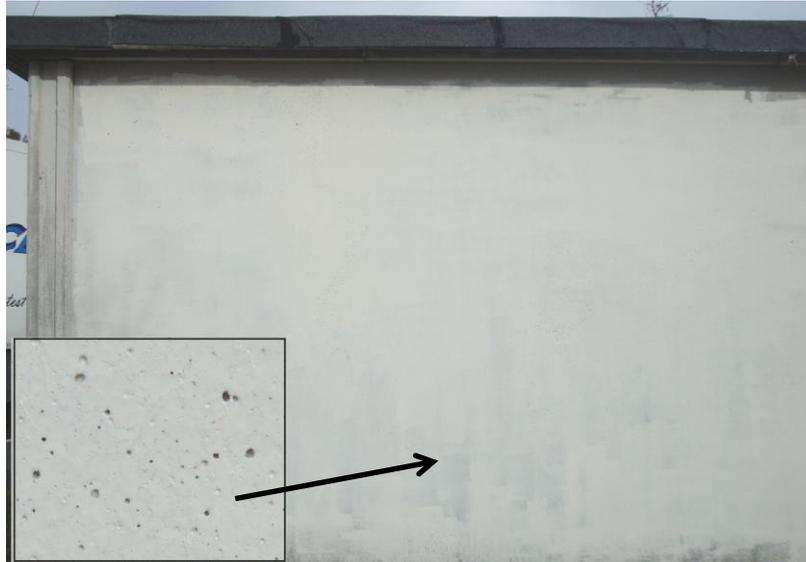
altezza 53 cm, che esprime la modalità in cui il Ray Tracing emulerebbe il solarimetro se quest'ultimo si trovasse in molte altre posizioni intorno al manufatto. Come già esposto, non si tratta quindi dell'energia effettiva incidente.



**Figura 3.18: Simulazione della densità di energia incidente totale durante i 30 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).**

### 3.5.1.4- Cesena, 4 Febbraio 2013, costruzione bianco pallido.

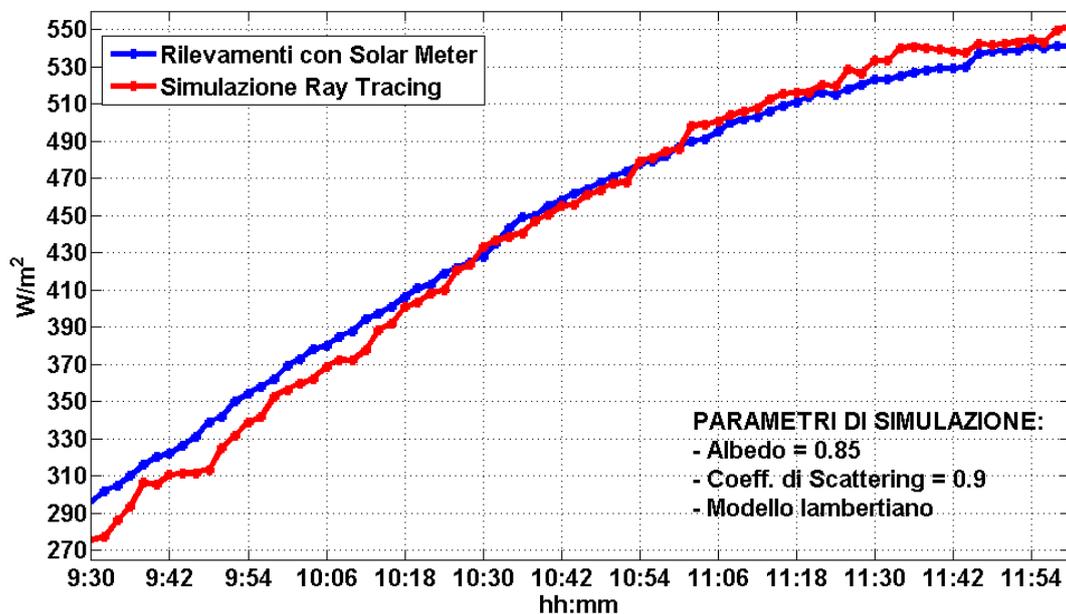
Si tratta di una rilevazione eseguita in una giornata perfetta dal punto di vista meteorologico, infatti le misure durante tutta la mattinata (eseguite con passo temporale di due minuti) non sono affette da nessuno sbalzo di radiazione solare. Il muro in esame è questa volta di colore biancastro (figura 3.19),



**Figura 3.19: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.**

In queste simulazioni si è usato un coefficiente di scattering ed una descrizione dei lobi analoghi ai precedenti, mentre l'albedo è di poco superiore, per via della tonalità bianca del muro.

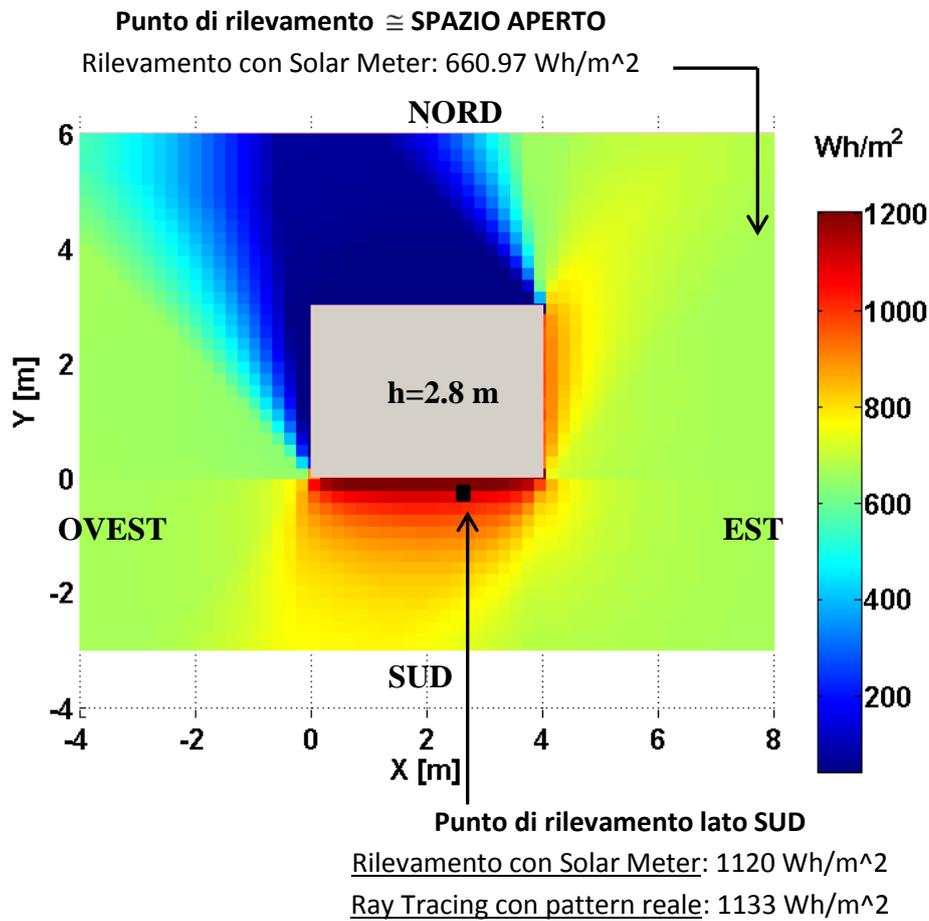
**Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm dalla costruzione bianca, Cesena 4 Febbraio 2013**



**Figura 3.20: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.**

Ancora una volta viene fornito il grafico (figura 3.21) dell'ammontare energetico (dalle 9:30 alle 12:00) sul piano orizzontale di quota 53 cm, con annesso confronto

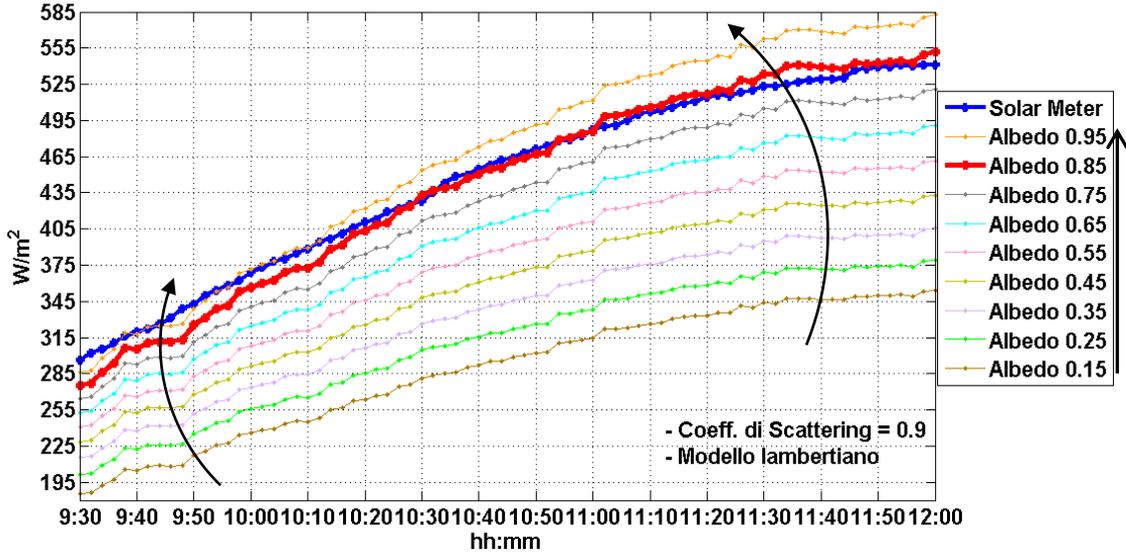
con l'energia rilevata nel punto specifico di misura, al fine di comprendere meglio lo scenario di riferimento e la posizione durante le misure sul campo.



**Figura 3.21: Simulazione della densità di energia incidente totale durante 2 ore e 30 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).**

Anche in questo caso si vuole analizzare il comportamento della curva al diminuire dell'albedo (figura 3.22.A) o del coefficiente di scattering (figura 3.22.B). Al decrescere di quest'ultimo si può notare un "inarcamento" della curva: l'incremento della densità di potenza rispetto a quella misurata è significativo solo dopo le 10:20, mentre la modifica del coefficiente non introduce praticamente nessuna modifica ad inizio mattinata.

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm dalla costruzione bianca, Cesena 4 Febbraio 2013



Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm dalla costruzione bianca, Cesena 4 Febbraio 2013

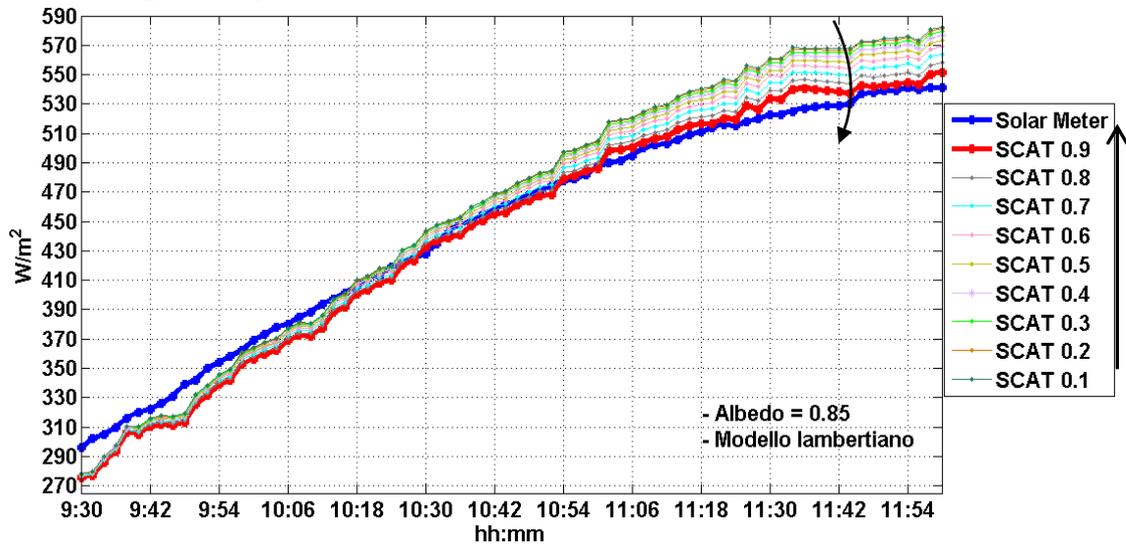
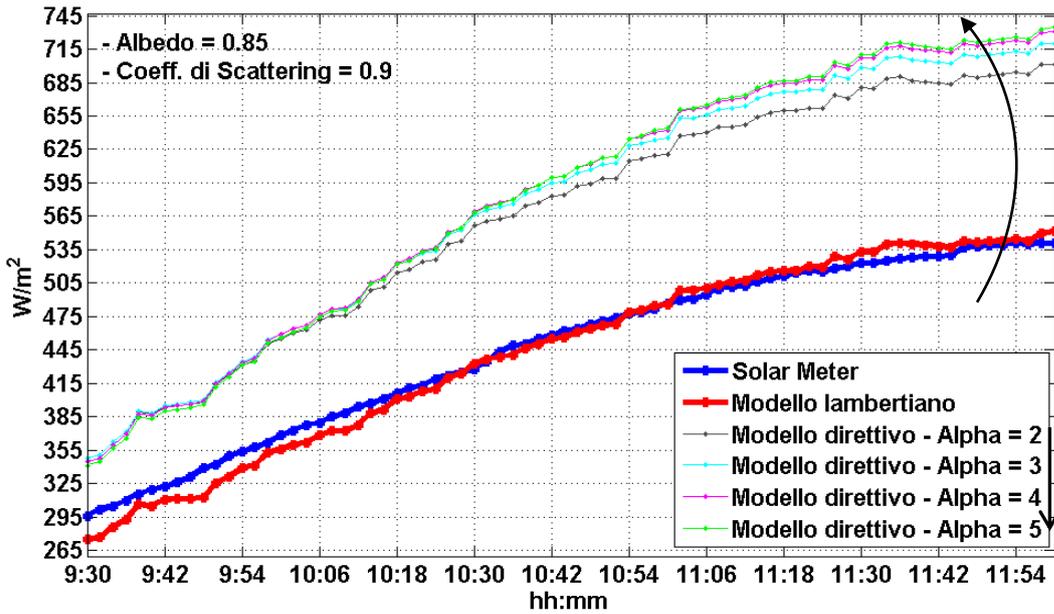


Figura 3.22.A e figura 3.22.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori dei parametri di albedo e SR. In rosso, la curva ottima.

Le successive figure mostrano nuovamente l'andamento delle curve di simulazione al variare del modello di scattering (figura 3.23.A) e di un eventuale annullamento dello stesso, lasciando inalterata la riflessione oppure escludendo anch'essa dal calcolo (figura 3.23.B).

Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm da una costruzione bianca, Cesena 4 Febbraio 2013



Radiazione globale sul piano del meter, a 30 cm dalla costruzione bianca, Cesena 4 Febbraio 2013

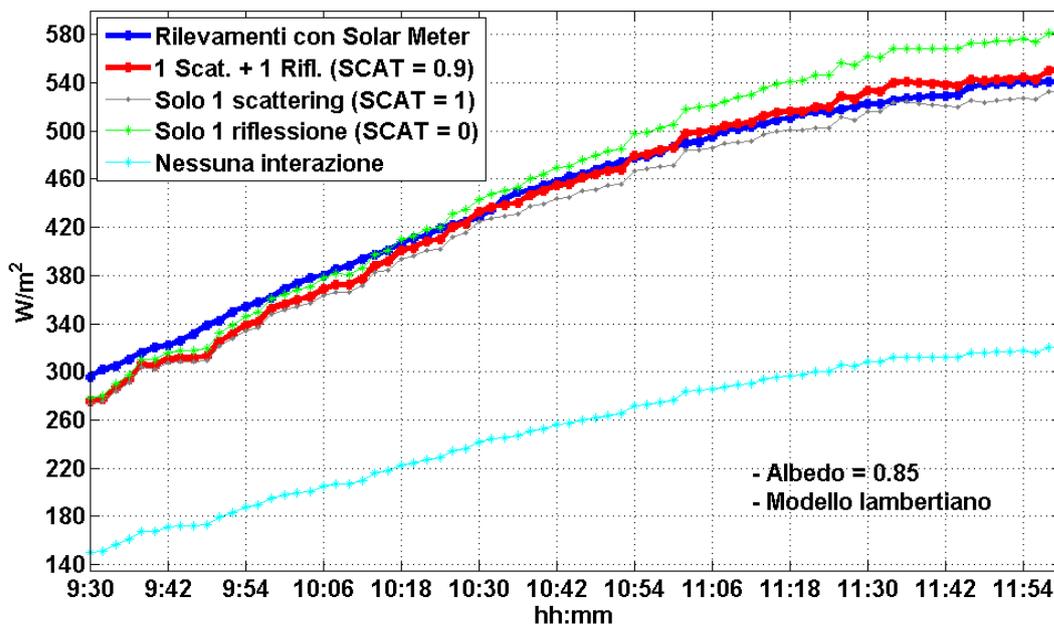


Figura 3.23.A e figura 3.23.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori di alpha e con vari tipi di interazioni previste dal Ray Tracing. In rosso, la curva ottima.

### 3.5.1.5- Cesenatico, 16 Febbraio 2013, muro di mattoni.

Il muro in questione è costituito da mattoni abbastanza usurati e schiariti dal sole (figura 3.24), quindi l'albedo non è basso e la potenza riflessa non è trascurabile. La rugosità superficiale è anche in questo caso abbastanza elevata, sia per quanto riguarda i mattoni, ma soprattutto per la calce che li tiene uniti.



Figura 3.24: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.

Nella figura 3.25 viene quindi mostrato il confronto tra la simulazione ed i rilevamenti, dalla quale si può notare un momento caratterizzato dall'annullamento della radiazione diretta per via della formazione di una nube temporanea che ostruisce la radiazione diretta.

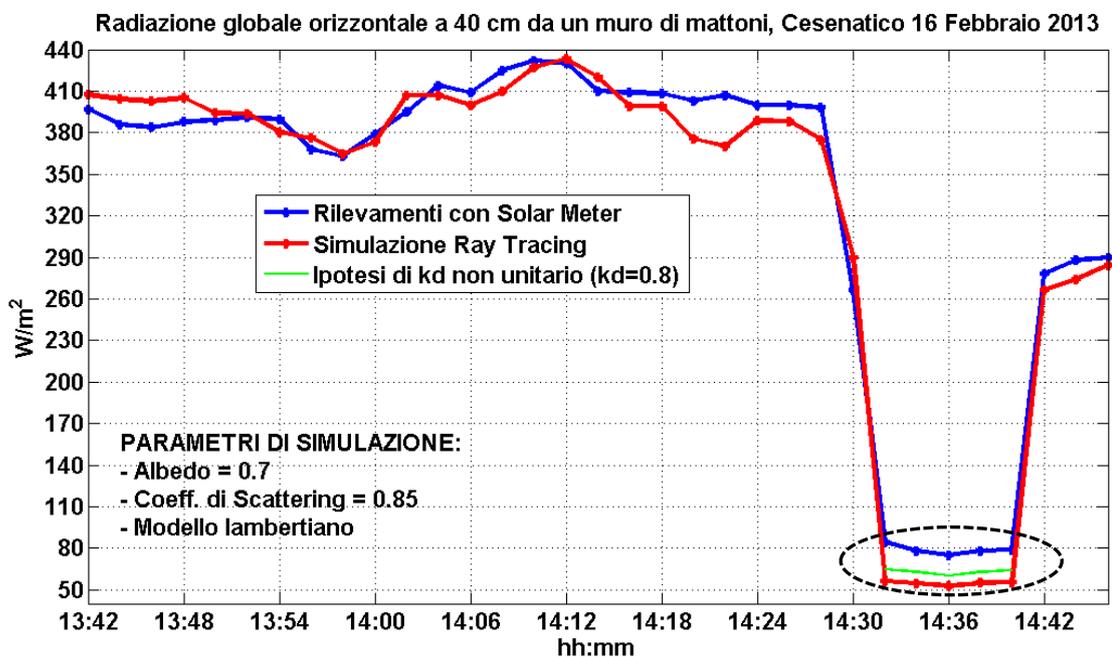
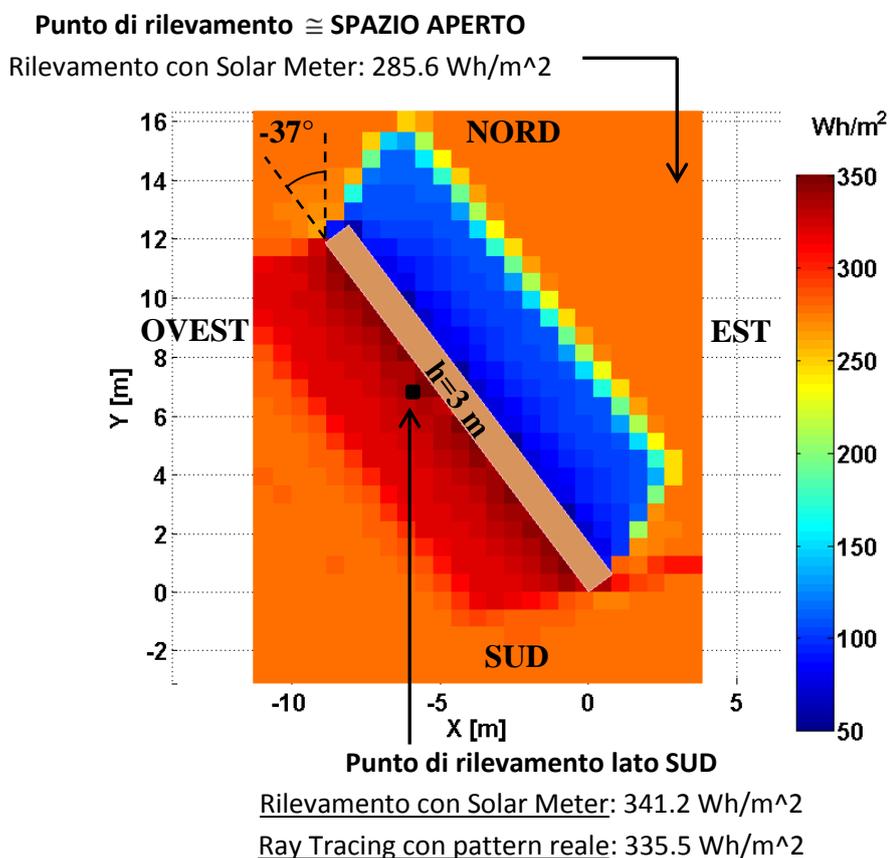


Figura 3.25: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm. In evidenza, l'intervallo di tempo in cui la radiazione diretta è stata assente.

I valori simulati risultano in questo lasso di tempo meno realistici, a causa del ben noto problema riguardante la modellizzazione di un cielo parzialmente coperto. Tuttavia, utilizzando un'ipotesi simile a quella utilizzata nel paragrafo precedente (coefficiente di diffusione alto ma non unitario), i dati ottenuti dalle simulazioni si alzano di valore (come mostra la linea verde all'interno della curva tratteggiata nera), avvicinandosi ai valori rilevati con il solarimetro.

Può essere utile inoltre conoscere il preciso orientamento del muro di mattoni, mostrato nella figura seguente. Viene quindi analizzato il confronto tra il livello di energia raggiunto nei 60 minuti di rilevamenti con quello ottenuto dalle simulazioni Ray Tracing utilizzando i parametri ottimi già citati nella figura precedente (ovvero Albedo = 0.7, Coeff. di Scattering = 0.85).



**Figura 3.26: Simulazione della densità di energia incidente totale durante 60 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).**

Come si può notare dalle figure successive, variando l'albedo e lo scattering si riscontrano gli stessi comportamenti delle precedenti simulazioni. In assenza di radiazione diretta, l'abbassamento del valore di albedo non comporta sostanziali variazioni nei risultati (figura 3.27.A), mentre la simulazione risulta più sensibile al coefficiente di scattering in quel dato intervallo (figura 3.27.B).

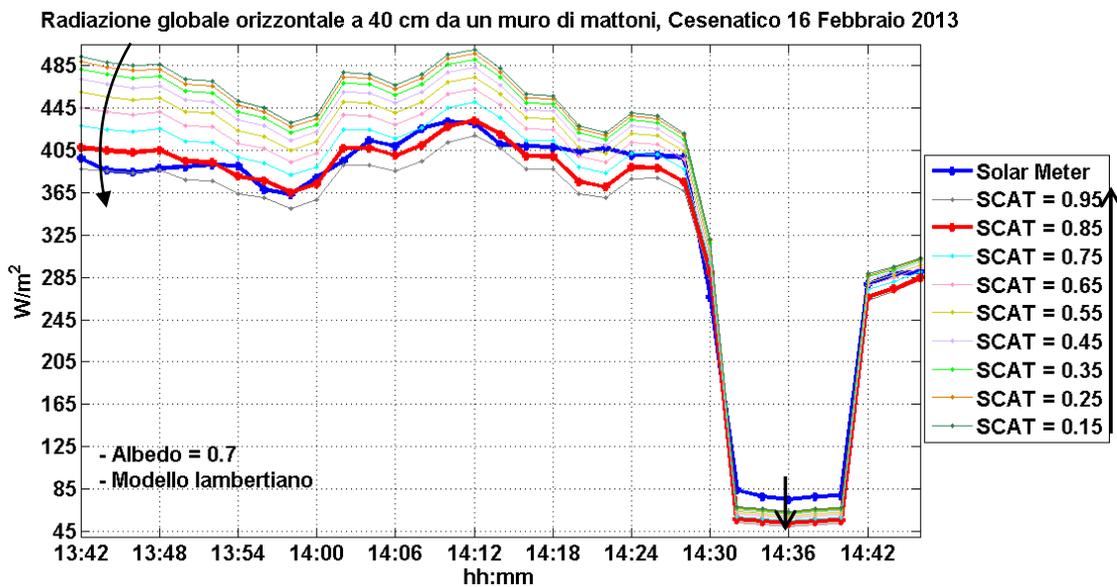
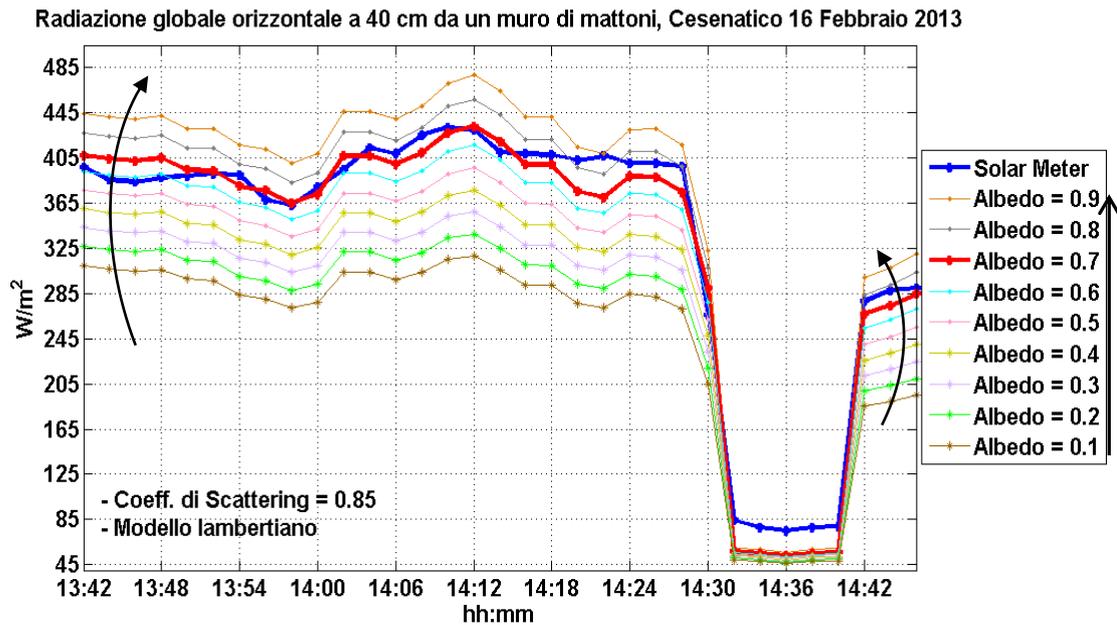
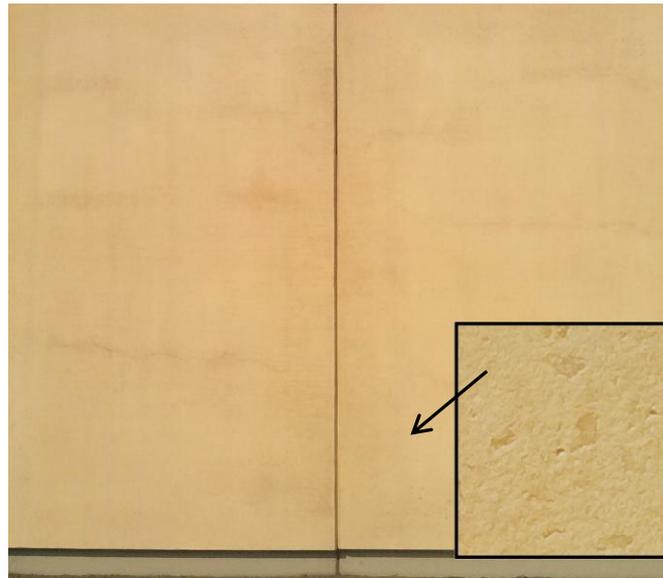


Figura 3.27.A e figura 3.27.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori dei parametri di albedo e SR. In rosso, la curva ottima.

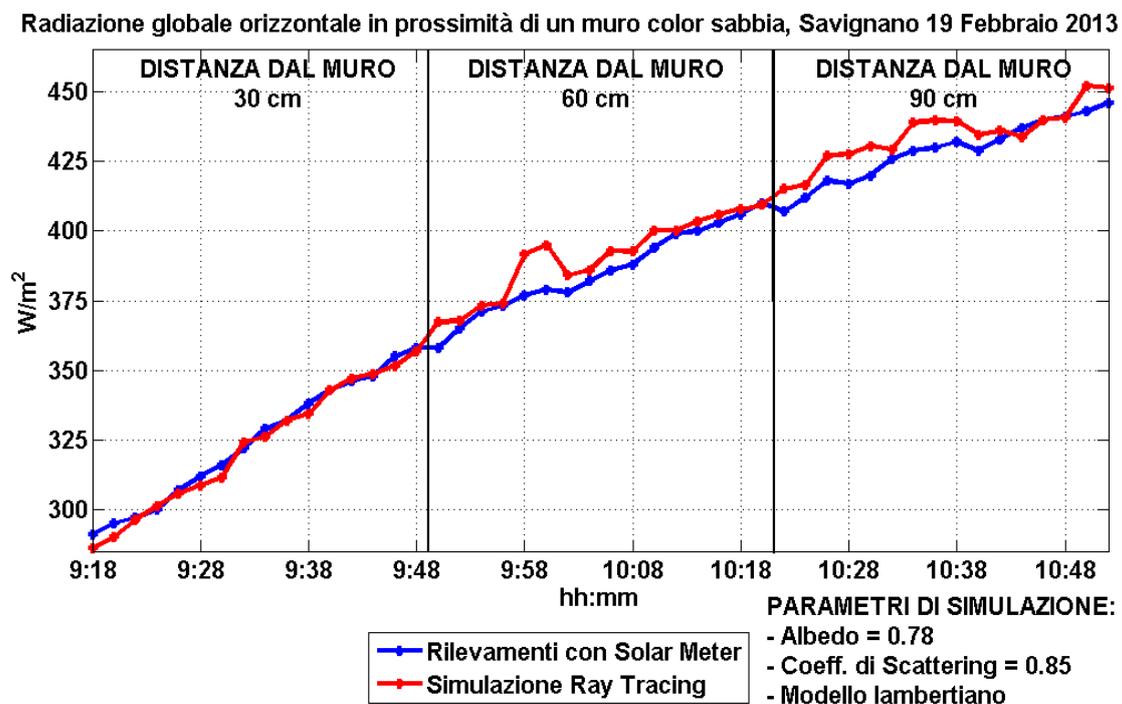
### 3.5.1.6- Savignano, 19 Febbraio 2013, muro color sabbia.

Si tratta di rilevamenti condotti cercando di eseguire pure un campionamento spaziale in fase di misura, attuando uno spostamento del solarimetro (progressivo nel tempo) dal muro preso in esame, che possiede un color sabbia ed una discreta rugosità superficiale (figura 3.28).



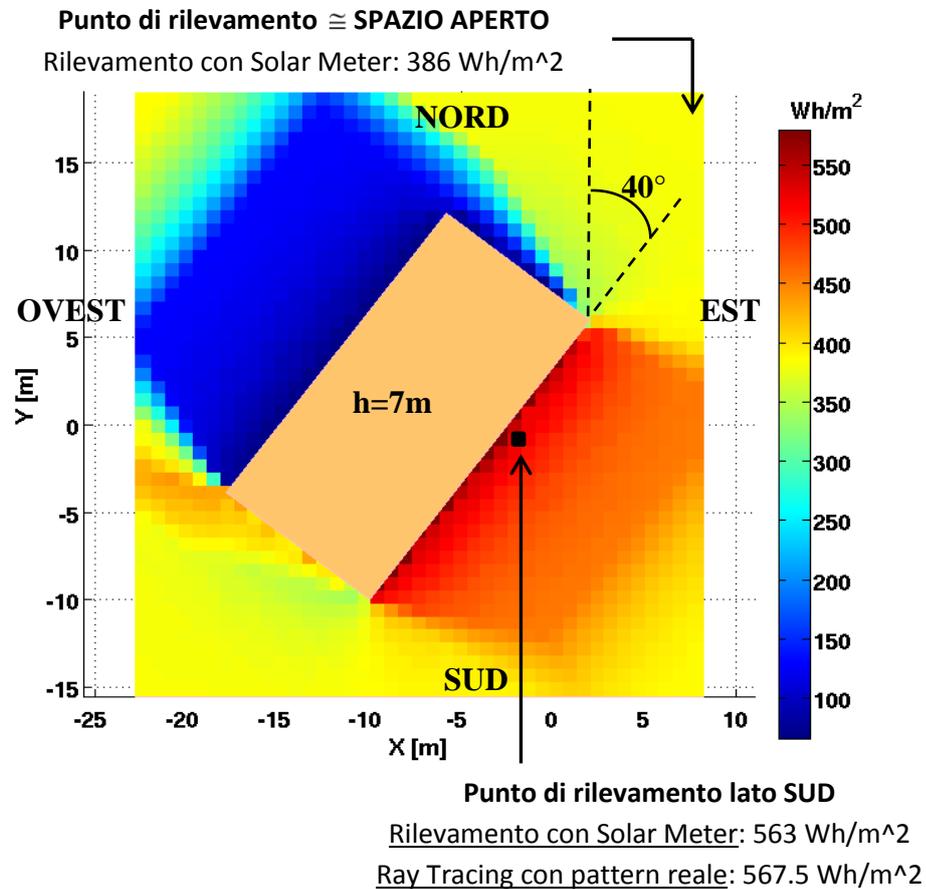
**Figura 3.28: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente**

Di conseguenza il plot della radiazione globale orizzontale (figura 3.29) risulta “spezzato” in tre parti da 30 minuti ciascuna, ognuna riferita ad una diversa distanza dal muro (rispettivamente 30, 60 e 90 cm). I parametri ottimi trovati (Albedo = 0.78 e Coeff. di Scattering = 0.85) sono plausibili ed in linea con quelli dei muri precedenti con tonalità e rugosità simili.



**Figura 3.29: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.**

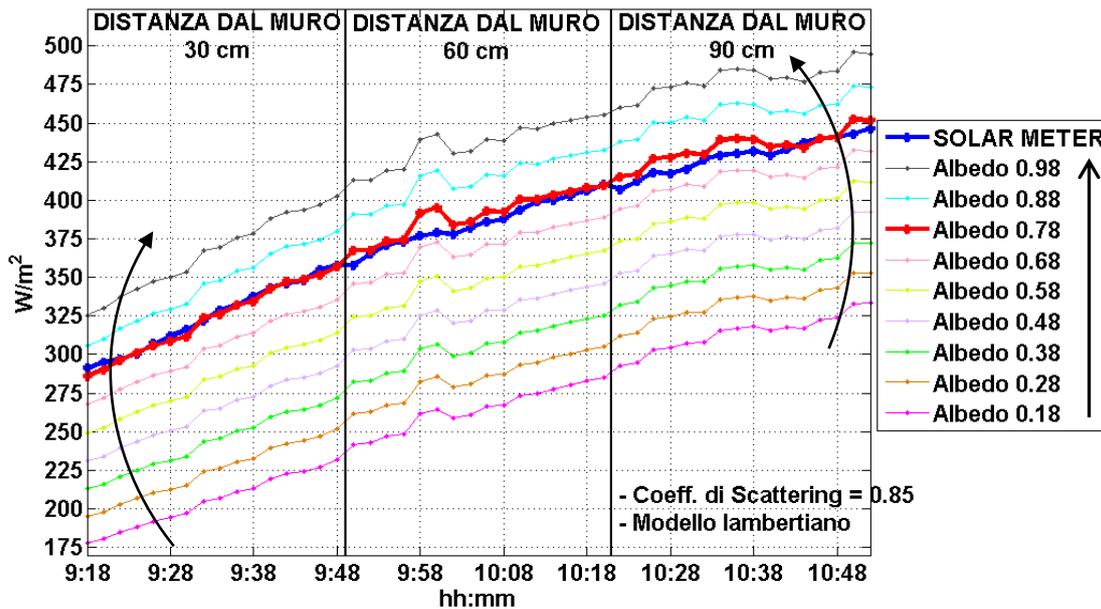
L'orientazione dell'edificio risulta essere  $40^\circ$  dalla direzione Nord, come si può constatare dalla seguente figura che rappresenta il plot dello scenario con annessa analisi dei livelli energetici.



**Figura 3.30: Simulazione della densità di energia incidente totale durante 90 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).**

Le figure successive mostrano la classica traslazione verso il basso della densità di potenza dovuta al decremento dell'albedo, e la "curvatura" del plot dovuta all'abbassamento del coefficiente di scattering.

Radiazione globale orizzontale in prossimità di un muro color sabbia, Savignano 19 Febbraio 2013



Radiazione globale orizzontale in prossimità di un muro color sabbia, Savignano 19 Febbraio 2013

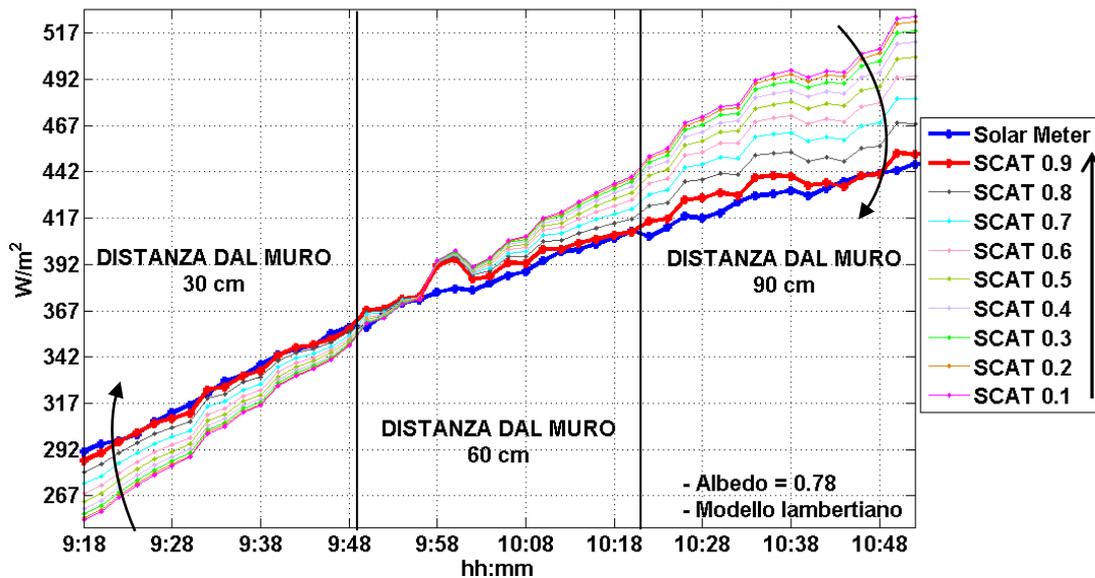


Figura 3.31.A e figura 3.31.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori dei parametri di albedo e SR. In rosso, la curva ottima.

### 3.5.1.7- Savignano, 16 Febbraio 2013, muro color sabbia.

A partite dallo stesso tipo di muro esaminato nel paragrafo precedente, si sono voluti validare ulteriormente i parametri elettromagnetici utilizzati per la simulazione Ray Tracing, nonché il funzionamento del programma stesso. Anche in questo caso è stato eseguito uno scostamento variabile dal muro, però simultaneamente nel tempo. A causa comunque delle variazioni di umidità del cielo del momento della giornata in oggetto, non è stato possibile analizzare “contemporaneamente” molti punti di

rilevamento, per via dei tempi minimi ma necessari per ogni posizionamento del meter. La figura 3.32 mostra i vari andamenti della densità di potenza rilevata, mentre la figura 3.33 rappresenta le due curve principali ottenute dalle medie spaziali dei valori simulati e misurati.

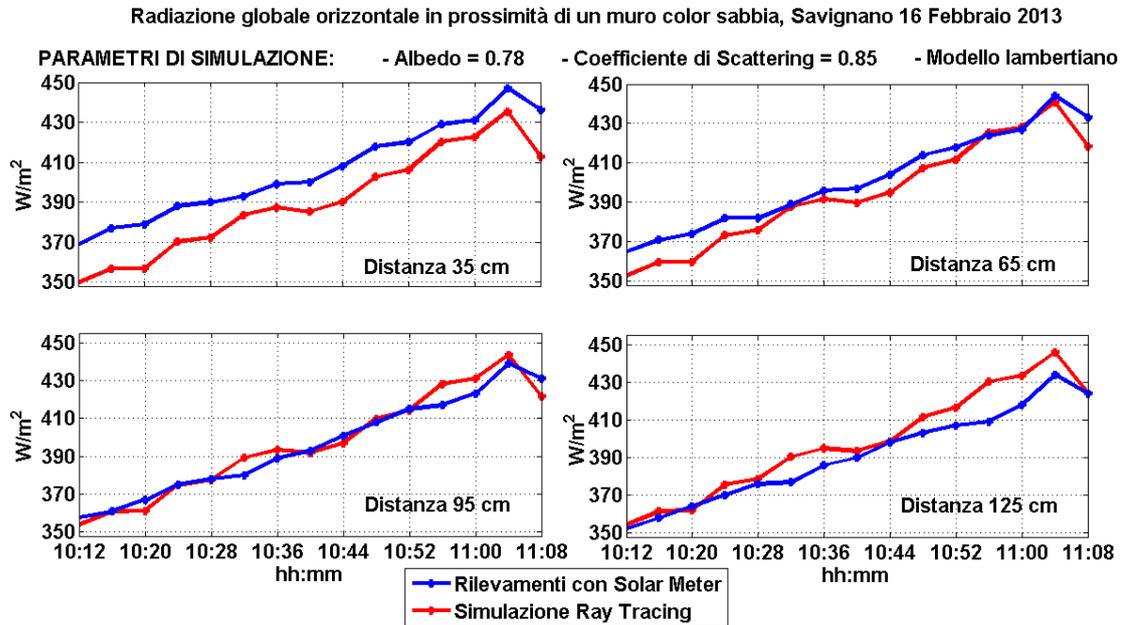


Figura 3.32: andamenti della radiazione globale (misurata e simulata con parametri ottimi) rispettivamente a 35, 65, 95 e 125 cm di distanza dall'edificio.

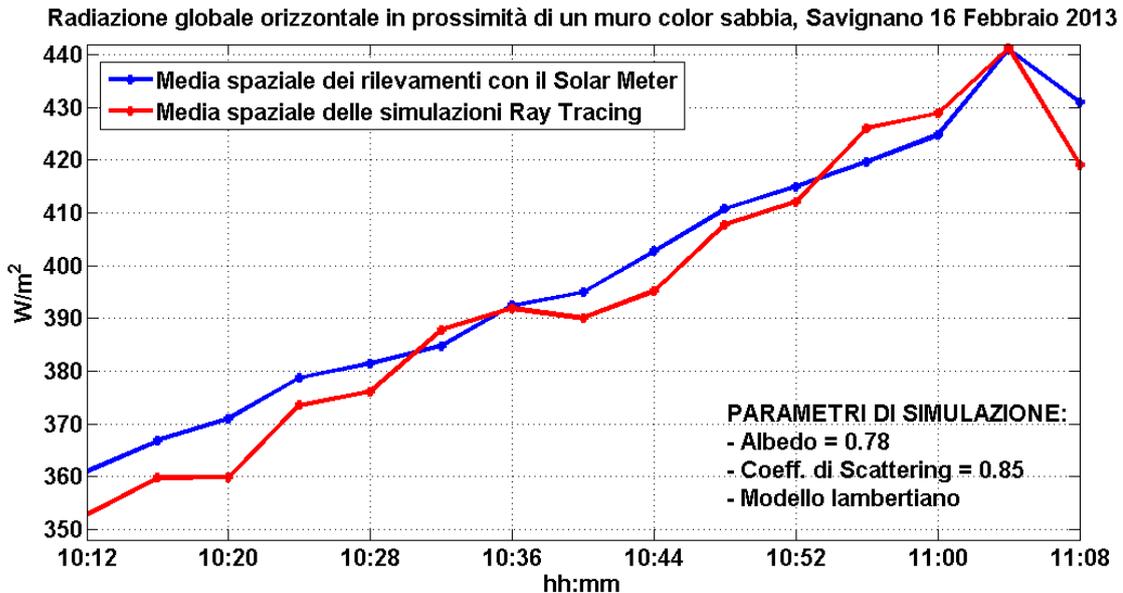


Figura 3.33: media spaziale dei dati ottenuti dalle quattro posizioni assunte durante i rilevamenti in prossimità del muro.

### 3.5.1.8- Savignano, 19 Febbraio 2013, muro grigio.

Cercando di analizzare il maggior numero di muri differenti tra loro, si è preso in esame un muro di colorazione grigia, di rugosità superficiale modesta (figura 3.34).

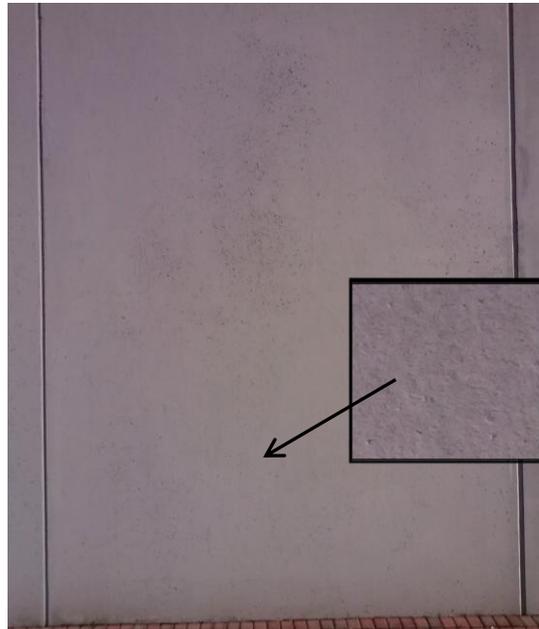


Figura 3.34: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.

La figura successiva mostra l'andamento della radiazione globale orizzontale a 30 cm dal muro in questione, utilizzando un albedo relativamente basso pari a 0.56.

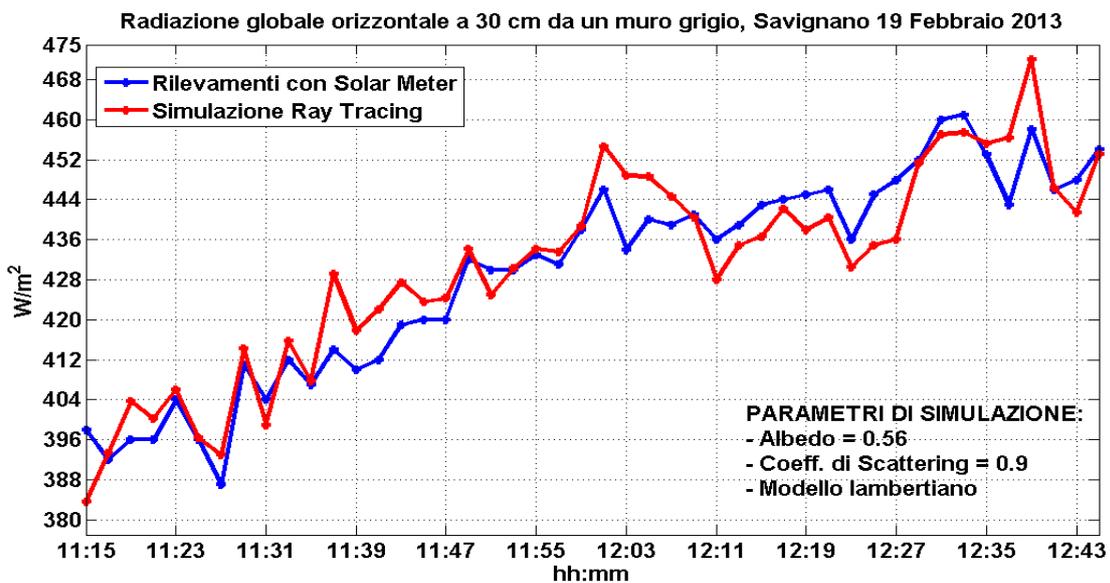


Figura 3.35: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.

La particolare colorazione del manufatto genera solo un lieve incremento dell'energia incidente ai piedi dello stabile, se messa in confronto a quella di spazio libero (figura 3.36).

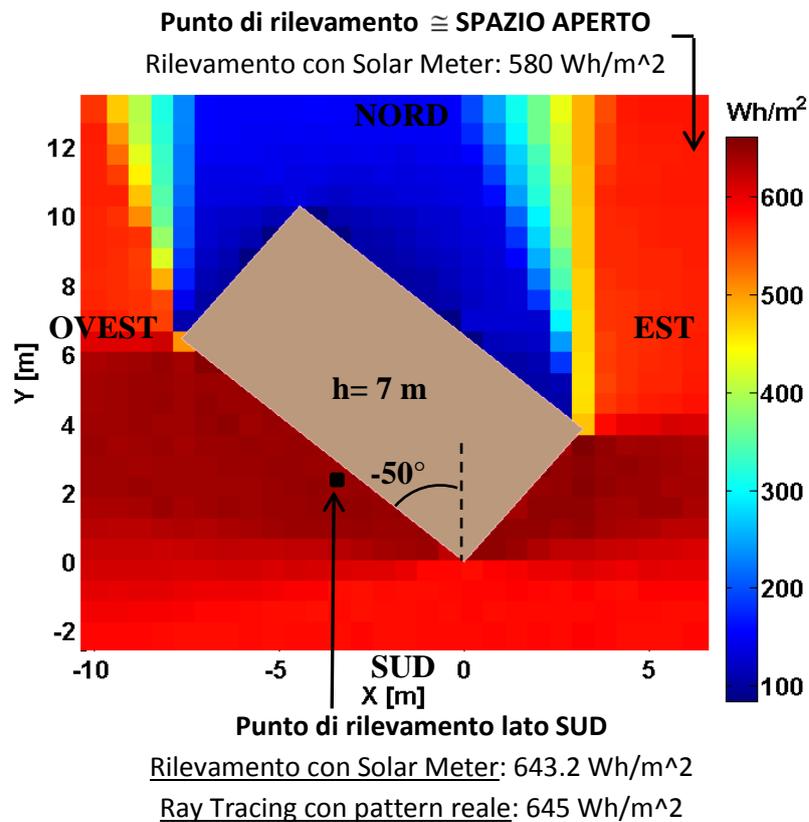


Figura 3.36: Simulazione della densità di energia incidente totale durante 90 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).

Di seguito vengono mostrate ulteriori verifiche sulla variazione dei due parametri elettromagnetici principali (figura 3.37.A e figura 3.37.B).

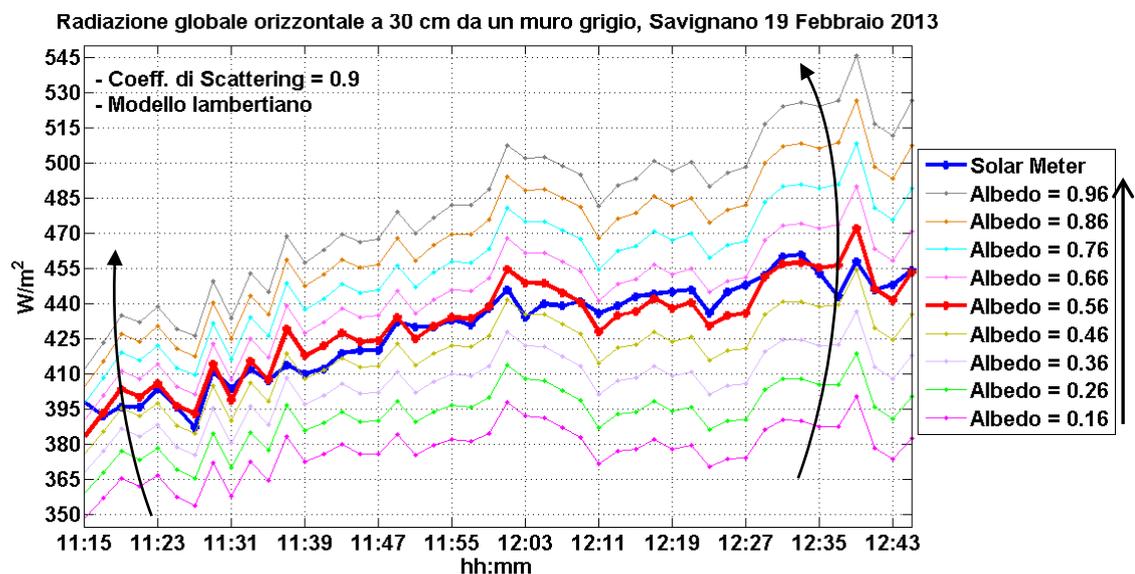


Figura 3.37.A: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con diversi valori di albedo. In rosso, la curva ottima.

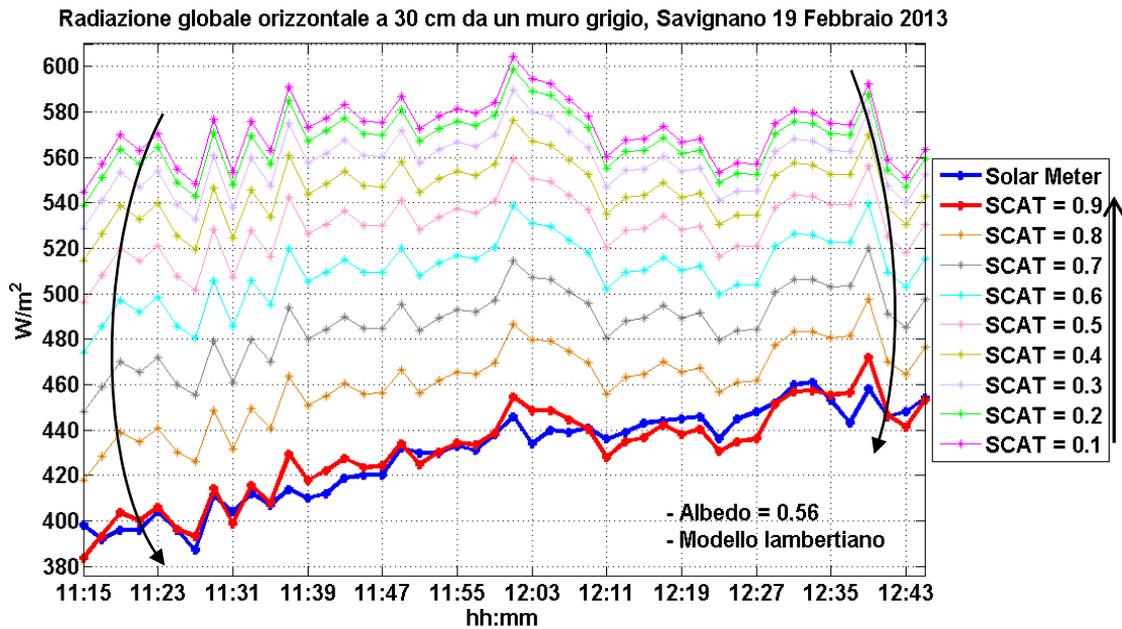


Figura 3.37.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con diversi valori del coefficiente di scattering ( $S_R$ ). In rosso, la curva ottima.

### 3.5.1.9- Cervia, 19 Febbraio 2013, muro giallo paglierino.

La seguente analisi riguarda un muro giallo molto chiaro ad elevato albedo e modesta rugosità superficiale (figura 3.38), avente un potere riflettente maggiore del muro bianco leggermente opaco già trattato precedentemente.

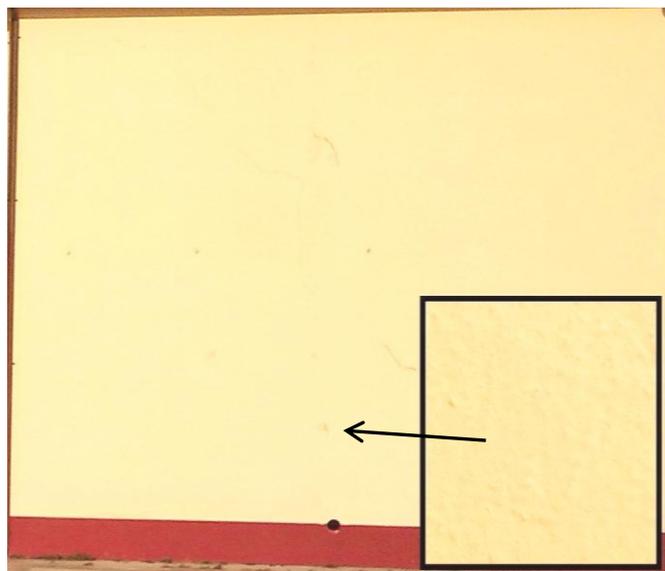


Figura 3.38: muro in esame per la validazione, con ingrandimento della superficie scatterante e riflettente.

Come si può notare dal seguente grafico, la giornata è caratterizzata da qualche leggera variazione veloce della radiazione solare, il che provoca qualche discrepanza marginale nel confronto tra simulazioni e misure.

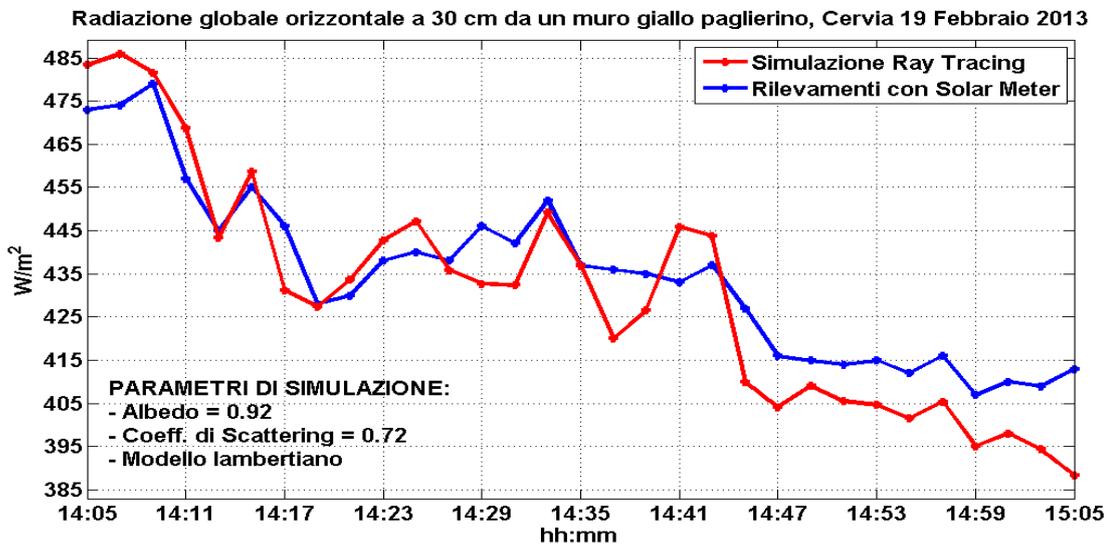


Figura 3.39: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) in un punto prossimo al muro, di quota 53 cm.

La colorazione molto chiara dello stabile determina un forte incremento dell'energia incidente rispetto all'area circostante, soprattutto ai piedi del muro di sud-ovest, come si può evincere da figura 3.40.

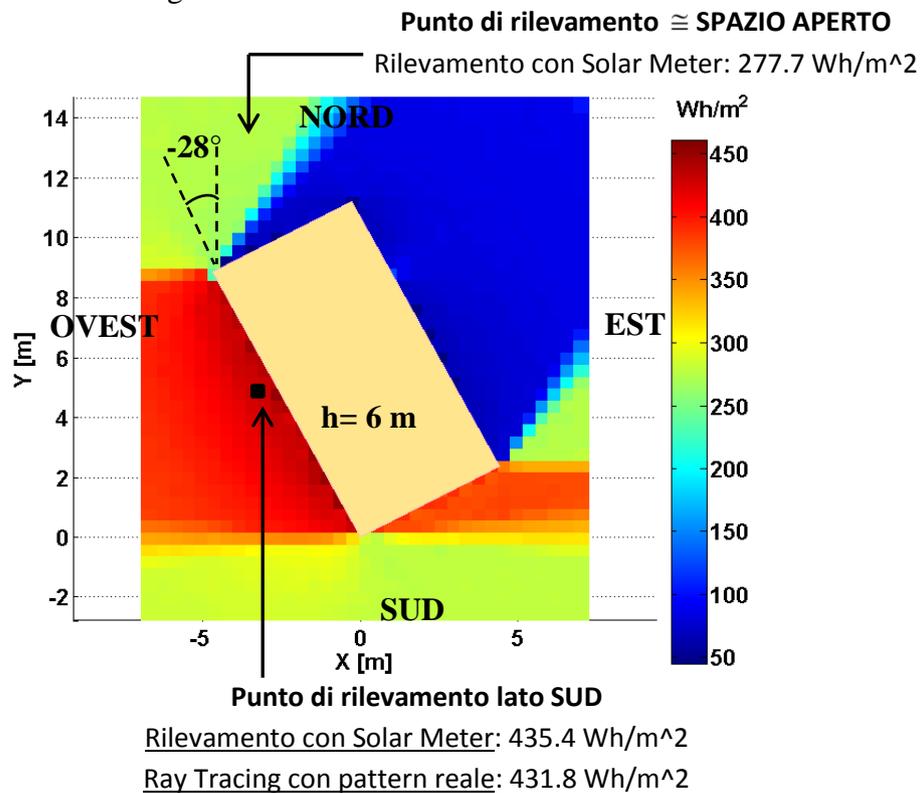


Figura 3.40: Simulazione della densità di energia incidente totale durante 90 minuti di rilevazioni, alla stessa quota del solarimetro (53 cm dal suolo).

Per concludere, ancora una volta viene mostrato come influiscono albedo e coefficiente di scattering nell'analisi di validazione (figura 3.41.A e figura 3.41.B).

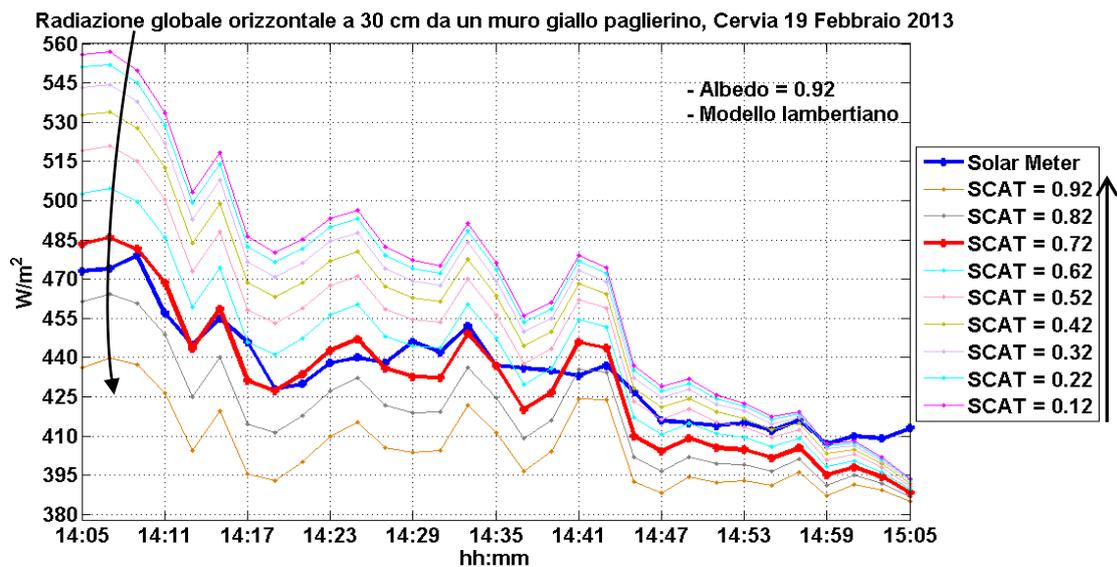
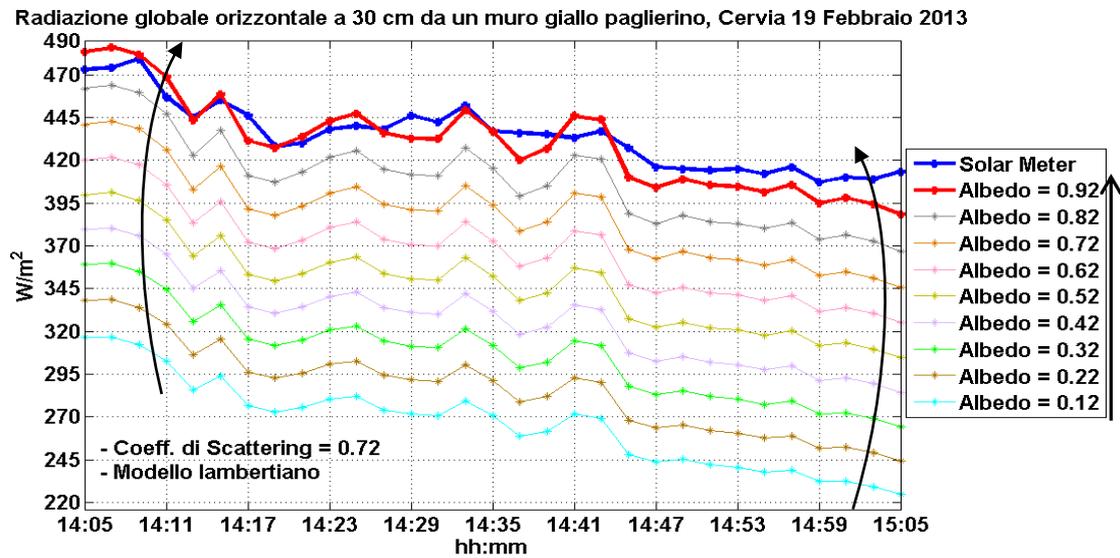


Figura 3.41.A e figura 3.41.B: curve di densità di potenza globale sul piano del meter, misurata e simulata con vari valori dei parametri di albedo e SR. In rosso, la curva ottima.

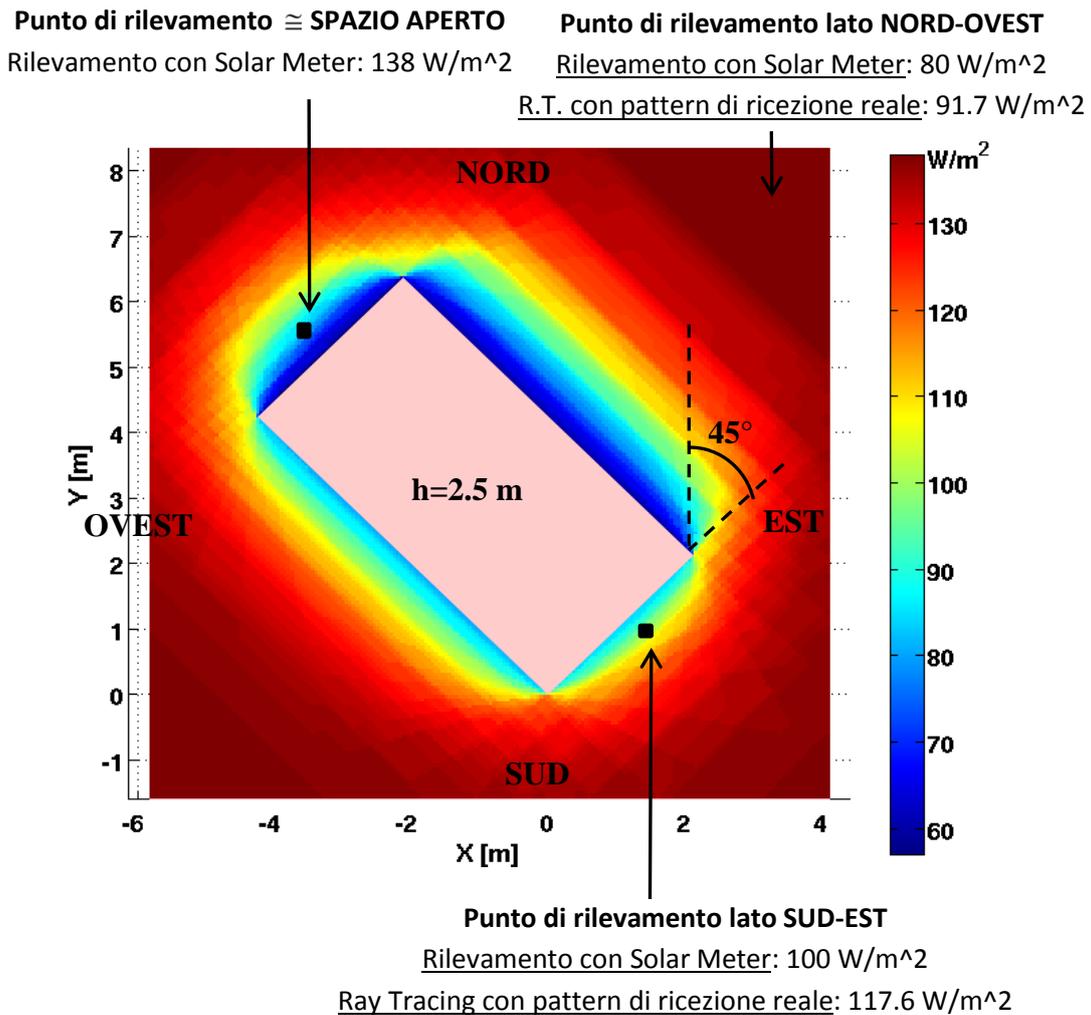
### 3.5.2- Rilevamenti con elevata foschia.

Il modello diffusivo simulato mediante una disposizione omogenea di trasmettitori si è rivelato corretto come principio base, ma non del tutto esatto. Infatti, soprattutto in caso di foschia o nebbia, sebbene non sia presente radiazione diretta, è facile affermare che la porzione di cielo dove si trova il sole è certamente più luminosa.

A dimostrazione di ciò, sono state condotte alcune semplici rilevazioni in presenza di un solo piccolo edificio, in modo che potessero essere rilevate quasi contemporaneamente la radiazione solare in prossimità di un muro esposto a Nord-Ovest e di uno esposto a Sud-Est. Le misure hanno evidenziato, in una mattinata nebbiosa, un coefficiente di diffusione unitario che, unito ad una certa differenza di potenza rilevata sulle due postazioni, si scontrano con l'ipotesi di modello uniforme di radiazione diffusa. Questo perché, molto intuitivamente, se il coefficiente di diffusione fosse davvero unitario e il modello diffusivo fosse perfettamente uniforme, scegliendo una differente orientazione della parete la potenza incidente dovrebbe rimanere invariata, se la distanza del solarimetro dal muro rimane la stessa. Non potendo in questi casi estremi descrivere esattamente l'andamento spaziale della luminosità celeste, viene assegnata alla radiazione diretta anche l'illuminazione nella porzione di cielo vicina al sole, anche se tali raggi vengono evidentemente diffusi dall'atmosfera e incidono al suolo con un certo angolo rispetto alla congiungente Terra – Sole, e non sono propriamente raggi solari diretti.

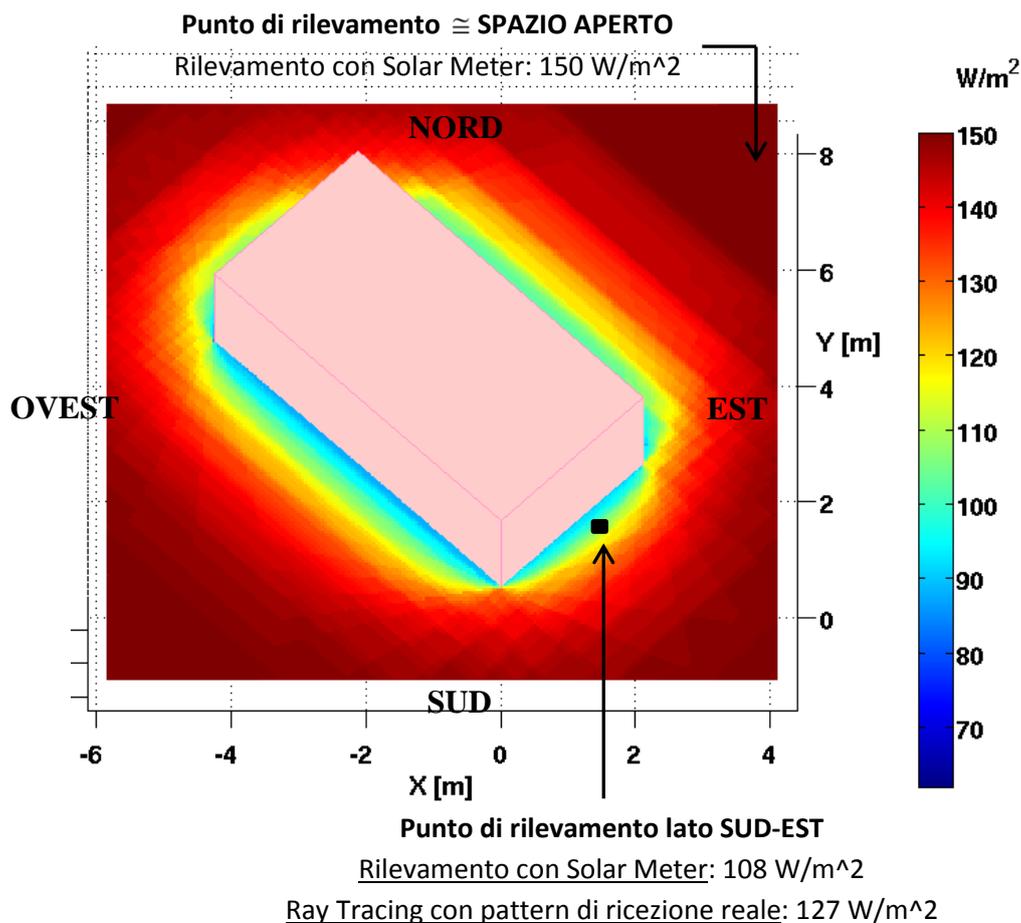
Ipotizzando quindi un coefficiente di diffusione non unitario ma quasi ( $k_d = 0.85$ ) anche il Ray Tracing produce finalmente dei risultati più simili alle misure. Qui di seguito viene riportato un esempio completo comparativo, che fa riferimento alle 11:00 di mattina del 15 Gennaio 2013, una giornata ad elevata foschia e quindi apparentemente priva di radiazione diretta. Partendo dal presupposto che il software debba conoscere l'esatto valore di radiazione orizzontale in spazio aperto, è stata condotta una misura a distanza dal fabbricato, sempre con l'ausilio del solarimetro. Il valore misurato ovviamente è solo una stima (per difetto) data dallo strumento, ma introducendolo come dato primordiale nel simulatore, si può ottenere una approssimazione della corretta radiazione solare semplicemente epurando il pattern del meter ed inserendo quello lambertiano ideale. Da quest'ultima si baseranno quindi le potenze di trasmissione utilizzate per le simulazioni in presenza dell'ostacolo.

In un momento di stazionarietà delle condizioni atmosferiche, nel più breve tempo possibile è stata misurata poi la radiazione a circa 40 cm dal muro di Sud-Est e di Nord-Ovest. Il confronto diretto di queste misure con le simulazioni Ray Tracing può avvenire dato che il programma contiene al suo interno le informazioni relative al pattern di ricezione reale specifico dello strumento.



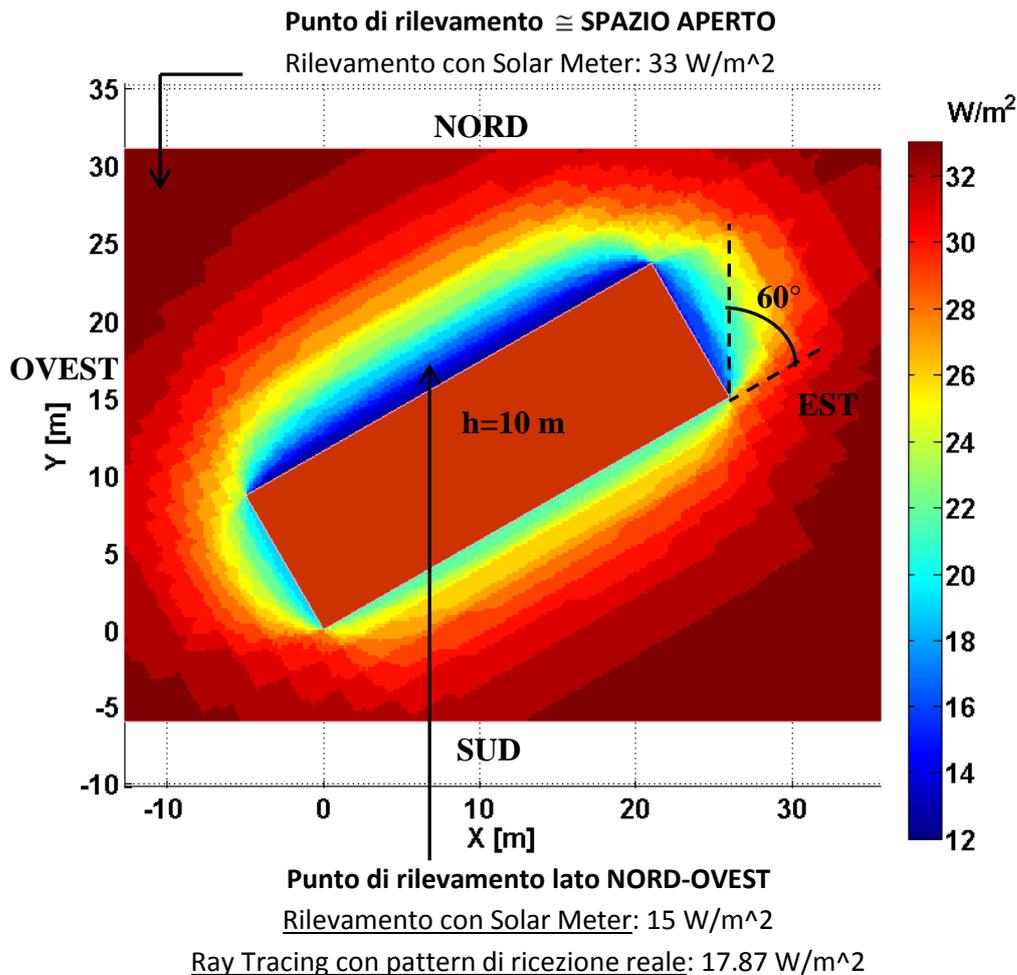
**Figura 3.42: Radiazione incidente del 15/01/13, ore 11:00, a Cesena, in presenza di una costruzione.**

A causa comunque della discretizzazione nella disposizione dei trasmettitori sulla cupola celeste, in figura 3.42 si può notare spazialmente un certo (seppur minimo) “effetto bande” nella distribuzione della densità di potenza incidente. È corretto invece avere un incremento di quest’ultima sul lato Sud-Est della costruzione, a scapito di quella in prossimità del muro Nord-Ovest. Nella figura successiva viene mostrato un altro rilevamento, sempre in presenza della stessa costruzione e di quasi totale assenza di radiazione diretta.



**Figura 3.43: Radiazione incidente del 15/01/13, ore 11:05, a Cesena, in presenza di una costruzione.**

Come terzo esempio è stata eseguita un'ulteriore rilevazione, questa volta in prossimità di un condominio di quattro piani, affacciato in direzione Nord-Ovest in un'area completamente priva di ostacoli di qualsiasi genere. Sempre in condizioni di elevata foschia (stazionaria nel piccolo intervallo di tempo tra il campionamento di spazio aperto e quello di prossimità) della stessa mattinata presa in esame negli esempi precedenti, viene nuovamente testata l'efficacia del modello diffusivo interno al simulatore Ray Tracing (figura 3.44). Anche in quest'ultimo caso si ha un buon confronto tra le rilevazioni ed i dati prodotti dal simulatore.



**Figura 3.44: Radiazione incidente del 15/01/13, ore 10:25, a Cesena, in presenza di un condominio.**

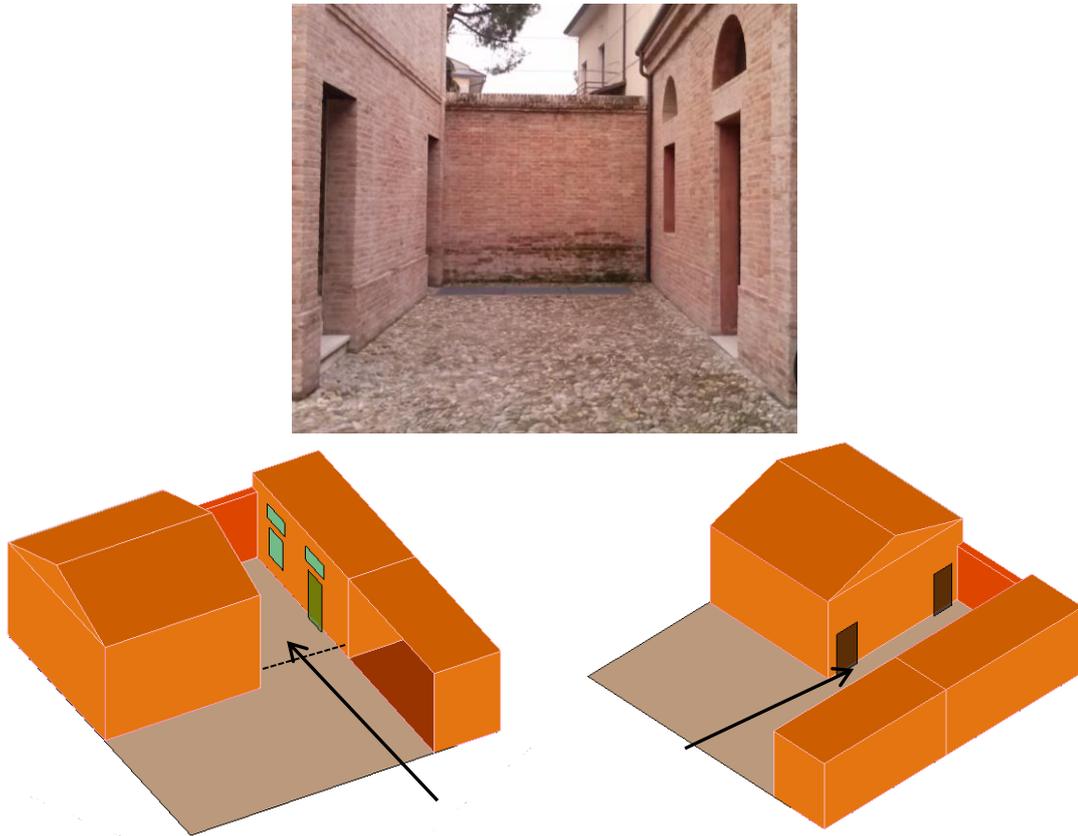
Concludendo questa seconda fase di verifica, si può affermare che in presenza della sola radiazione diffusa, il simulatore produce dei risultati discreti ma non del tutto esatti, con un errore che peggiora man mano che il valore di radiazione diffusa aumenta, come nei casi di cielo ad elevata foschia.

Quindi, in condizioni di cielo sereno, dove si rilevano bassi valori di radiazione diffusa, l'errore introdotto dal modello diffusivo uniforme della luminosità celeste è molto meno percettibile sul totale della radiazione globale orizzontale.

### 3.5.3- Rilevamenti in cortile interno, Cesena 7 Marzo 2013.

Per concludere i rilevamenti di validazione, è stato preso in esame uno scenario più complesso, costituito da un piccolo cortile ad "u" circondato da tre costruzioni in muratura di diversa altezza. (figure 3.45). In questo caso però si è scelto di effettuare una campionatura spaziale e non temporale, in una giornata luminosa ma con cielo

coperto da nubi più o meno sottili. Per effettuare tutti i rilevamenti sono stati necessari quindici minuti, arco temporale in cui sono purtroppo possibili variazioni non trascurabili del cielo. Quindi per migliorare il grado di approssimazione della simulazione, è stata campionata (poco lontano) in due istanti differenti la radiazione solare di spazio aperto, sempre durante lo stesso intervallo di tempo.



**Figura 3.45.A, 3.45.B e 3.45.C: Foto dello scenario e modello di simulazione. La freccia indica il cortiletto in esame.**

Dei venti punti di rilevamento, diciannove sono stati dislocati a 60 cm di distanza l'uno dall'altro, in prossimità (30 cm) dei tre muri principali che formano la zona "chiusa", mentre l'ultimo punto è posizionato a metà distanza tra i due edifici. I risultati verranno di seguito esposti suddividendo i punti di rilevamento in tre route, più il punto centrale (figura 3.46).

Per le prime due si farà riferimento al campionamento di spazio aperto delle ore 10:20, mentre per i restanti punti si userà per le simulazioni il secondo campionamento delle 10:25.

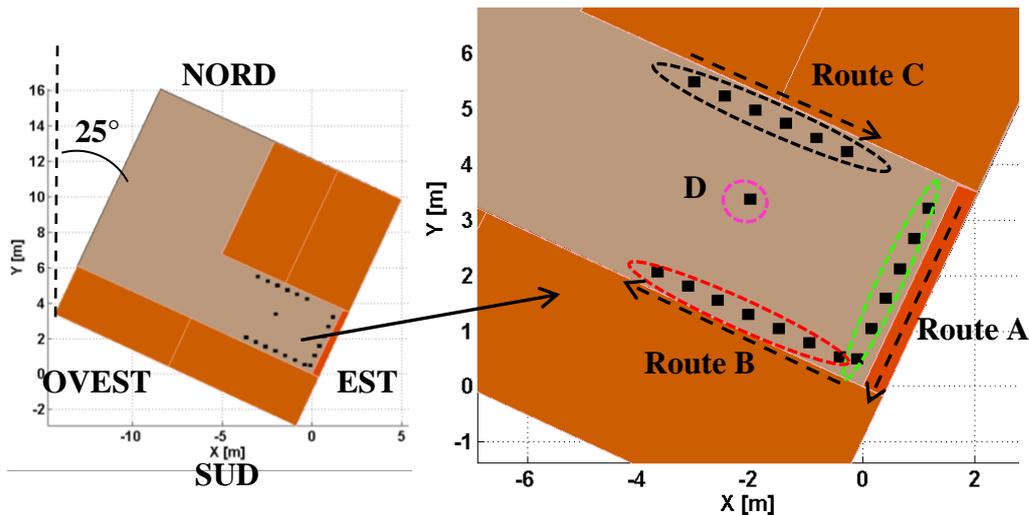


Figura 3.46: Cortile semi-chiuso visto dall'alto. In dettaglio, le posizioni assunte dal meter durante i rilevamenti.

Eseguendo la simulazione (sempre applicando in ricezione il pattern del meter), si ottengono i valori di potenza incidente alla stessa quota del solarimetro, da confrontare con le misure svolte.

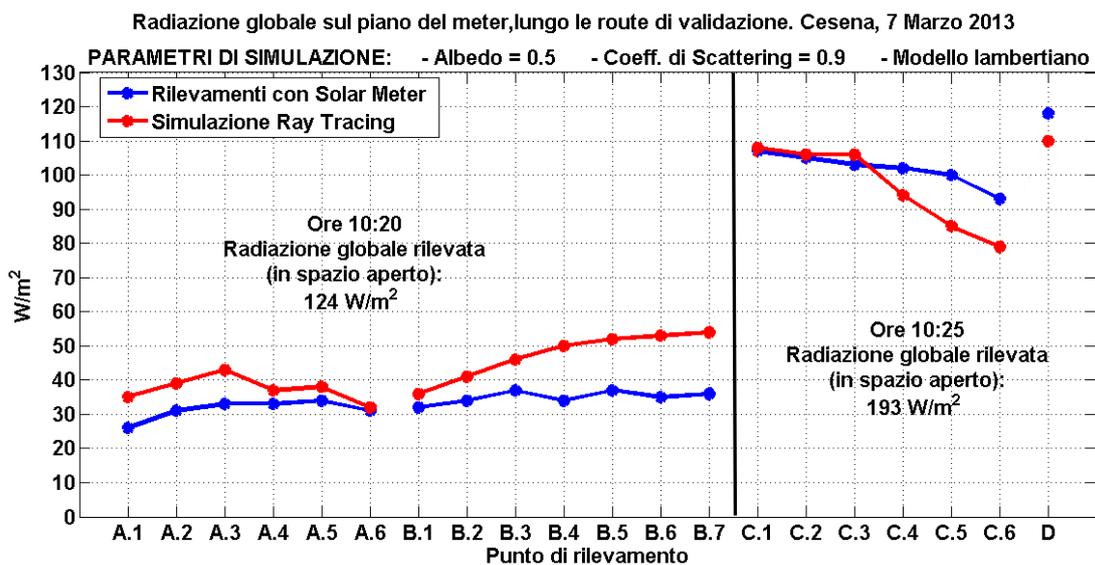


Figura 3.47: andamento della radiazione solare incidente (misurata e simulata con parametri ottimi) lungo le route di validazione.

Considerando lo scenario complesso ed il noto problema riguardante la modellizzazione uniforme della luminosità del cielo, il confronto che ne risulta è abbastanza buono. Si nota infatti il solito miglioramento nel comportamento del simulatore quando il punto in esame è esposto al sole (primi 3 punti della route C), perché si riduce l'errore del modello, dato che lo sbilanciamento di luminosità del cielo viene compensato dalla presenza di radiazione diretta. Più nello specifico, si nota una leggera sovrastima dei valori nei punti di rilevamento ai piedi dei muri

esposti a Nord (route A e route B), mentre si registra il comportamento opposto per quei punti esposti a Sud ma non raggiunti dalla radiazione diretta (ultimi tre punti della route C). La spiegazione è ancora imputabile all'uniformità del modello di radiazione diffusa, che descrive per eccesso la luminosità della semi-volta celeste lato Nord ma al contempo sottostima l'intensità della radiazione proveniente da Sud. Tale approssimazione viene quindi eliminata nei primi tre punti della route C, perché l'eccesso di luminosità viene attribuita alla radiazione diretta, che riesce a raggiungere ad ogni modo i primi tre punti. I restanti punti della route non sono invece raggiunti geometricamente da tale radiazione, con un conseguente calo della densità di potenza prevista dal simulatore, che nella realtà non si verifica.

Per comprendere l'impatto che hanno le interazioni nel confronto di validazione, di seguito viene fornito il grafico della densità di potenza incidente al variare delle condizioni imposte al simulatore nel calcolo di scattering e riflessioni.

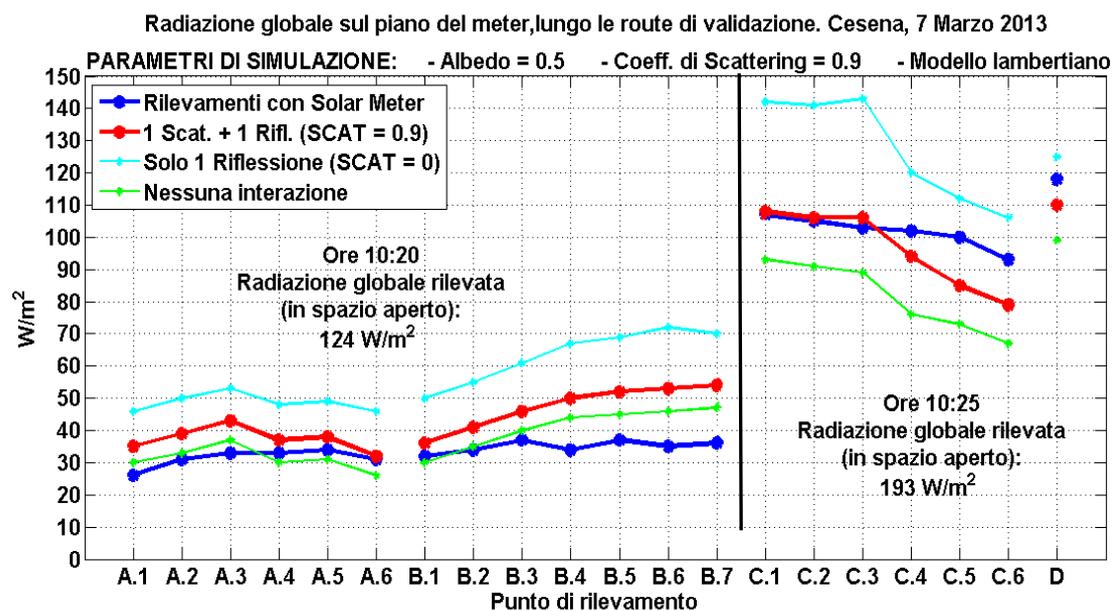


Figura 3.48: andamento della densità di potenza incidente lungo le route, rimuovendo solo lo scattering oppure tutte le interazioni.

Si può notare come la rimozione di tutte le interazioni (curva verde) crei apparentemente un confronto migliore nelle prime due route, ma in realtà la terza ha un comportamento molto diverso rispetto alle misure, rendendo mediamente il risultato peggiore di quello già analizzato, descritto dalla curva rossa. La rimozione del solo scattering crea invece il tipico innalzamento di tutti i valori, a causa della mancata radiazione respinta verso il cielo, che tipicamente si ottiene con un lobo di scattering lambertiano.

Per entrambi gli orari, viene mostrata infine la simulazione della potenza incidente su tutto il cortile, alla stessa quota del solarimetro (figura 3.49 e figura 3.50), dove è anche facile intuire come un minimo errore nel calcolo della posizione e delle altezze degli edifici possa provocare un errore di simulazione, soprattutto se il punto di misura si trova in prossimità delle linee “sole-ombra”.

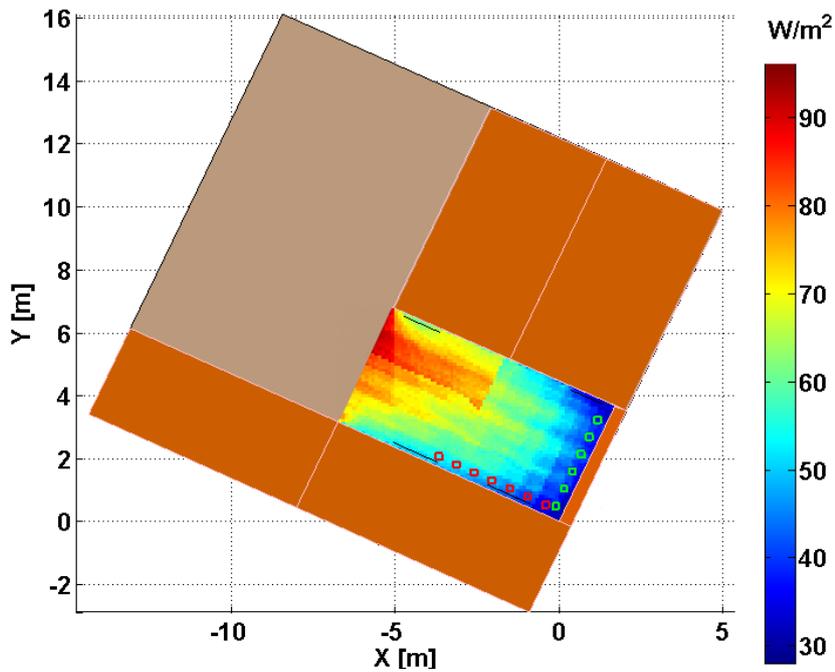


Figura 3.49: Potenza incidente sul cortile alle 10:20 del 7 Marzo 2013. In dettaglio, i punti di rilevamento delle route A e route B.

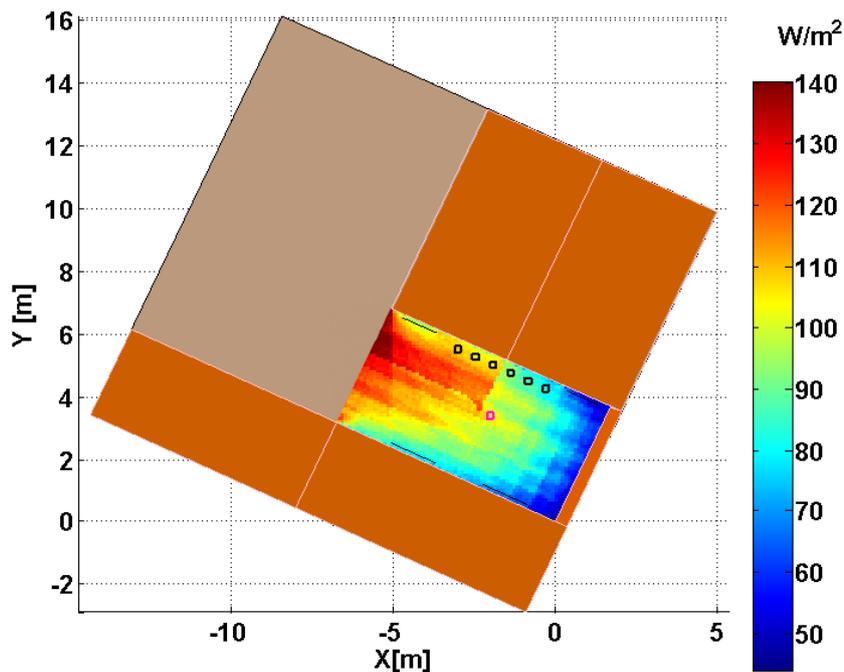
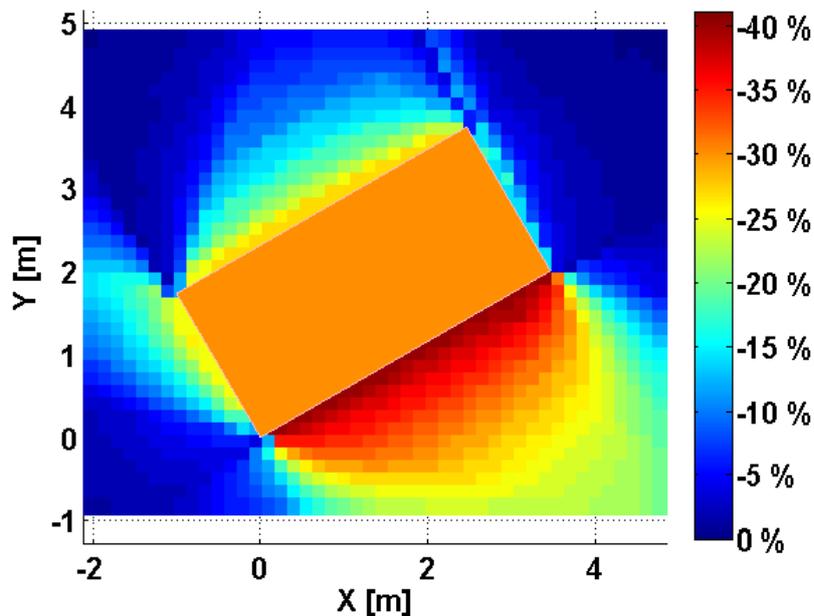


Figura 3.50: Potenza incidente sul cortile alle 10:25 del 7 Marzo 2013. In dettaglio, i punti di rilevamento della route C ed il punto singolo D.

### 3.6- Prestazioni al variare delle interazioni.

Come si è visto dai rilevamenti e dalle simulazioni, i valori di potenza in prossimità del muro dipendono fortemente dalle riflessioni e dallo scattering. La totale rimozione di tali interazioni fisiche può comportare delle variazioni rilevanti. A dimostrazione di ciò, nella figura qui di seguito viene riportata la riduzione percentuale introdotta nel calcolo dell'energia incidente al suolo nelle immediate vicinanze della costruzione balneare, durante le stesse 4 ore analizzate al paragrafo 3.5.1.1. Si può notare che tali livelli possono raggiungere valori anche molto elevati (fino al 40%), a causa della stima per difetto che non prevede le riflessioni dei raggi solari ed il calcolo di centinaia di punti di scattering sulla parete.

**Cervia, 26 Gennaio 2013, stabilimento balneare color arancione.**



**Figura 3.51: Variazione percentuale generata dalla rimozione delle interazioni nella simulazione dell'energia incidente al suolo, durante le 4 ore di rilevamenti.**

Un'altra analisi condotta è quella riferita alla variazione introdotta escludendo solo lo scattering dalle simulazioni Ray Tracing, considerando però i raggi che interagiscono per pura riflessione (figura 3.52).

Cervia, 26 Gennaio 2013, stabilimento balneare color arancione.

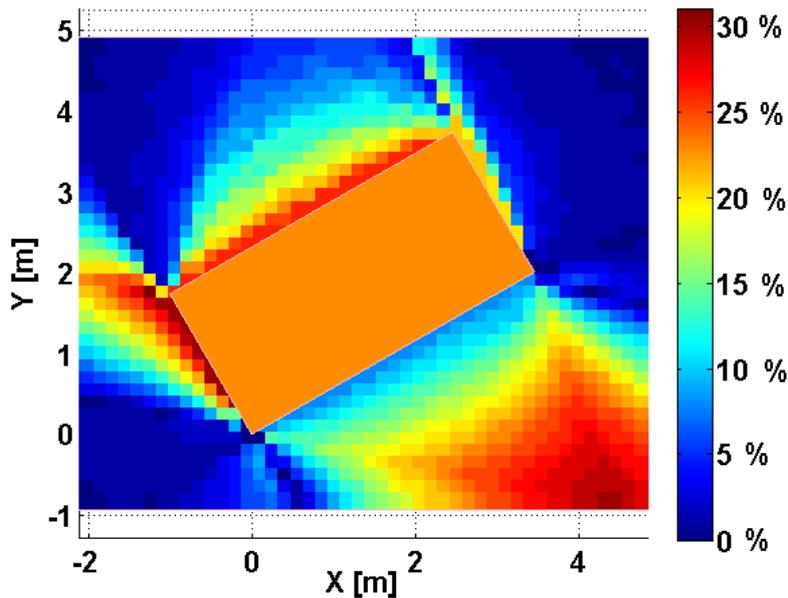


Figura 3.52: Variazione percentuale causata dalla rimozione dello scattering nella simulazione dell'energia incidente al suolo, durante le 4 ore di rilevamenti.

La stima è questa volta per eccesso perché tutta l'energia che lo scattering riuscirebbe a ritrasmettere verso il cielo grazie al suo lobo di diffusione lambertiano, viene in questo caso completamente riflessa al suolo. Tale fenomeno, non ovvio, provoca un aumento percentuale che può raggiungere valori del 30%, anche a distanza dalla superficie riflettente.

Da questi risultati bisogna concludere che la rimozione dello scattering diffuso durante le simulazioni è assolutamente non consigliabile, anche se quest'ultimo introduce un costo computazionale molto elevato, che può diventare addirittura insostenibile se si prevedono troppi punti di scattering e troppi ricevitori.

Un buon compromesso tra precisione e tempo di calcolo può essere quello di escludere le interazioni che subiscono i raggi diffusi dall'atmosfera provenienti dalla volta celeste, data la loro bassa intensità (in condizioni di cielo sereno).

### 3.7- Riepilogo sulle validazioni.

Dalle varie simulazioni svolte si può constatare la bontà del funzionamento del simulatore. I parametri ottimi utilizzati sono infatti del tutto plausibili con il grado di rugosità ed il colore dei vari muri presi in considerazione per la validazione. I grafici che riguardano l'andamento della densità di potenza incidente in funzione dei parametri evidenziano due aspetti: il primo, quello più ovvio, è che diminuendo l'albedo decresce il valore della radiazione globale orizzontale ai piedi delle

costruzioni. Il secondo fenomeno, molto meno intuitivo, è che l'abbassamento del coefficiente di diffusione induce un abbassamento della curva (rispetto ai valori rilevati col solarimetro) quando il sole è basso nel cielo (ovvero nel primo mattino e nella seconda metà del pomeriggio), mentre provoca un innalzamento dei valori ottenuti dal simulatore a partire da metà mattinata fino al primo pomeriggio. Quanto esposto è valido in modo più o meno accentuato in tutte le casistiche viste, in cui i muri in esame sono esposti in qualche modo a sud e sono investiti dalla radiazione solare diretta. La causa di ciò è da imputare al particolare pattern di ricezione del solarimetro, che presenta una scarsa capacità di captare raggi luminosi che provengono da elevati angoli di incidenza rispetto alla normale dell'interfaccia del meter. Di conseguenza, quando il sole è poco alto nel cielo, i raggi riflessi dal muro che poi giungono allo strumento sono molto radenti. Sebbene un eventuale aumento del coefficiente di scattering provocherebbe normalmente un abbassamento della densità di potenza misurata, in questi casi "geometrici" particolari può accadere l'esatto opposto, perché i raggi diffusi dalla parete giungono all'interfaccia da angoli molto più favorevoli dal punto di vista ricettivo, rispetto all'angolo di arrivo del raggio puramente riflesso. A prova di quanto esposto, viene mostrato il grafico della densità di potenza incidente simulata dal Ray Tracing che utilizza questa volta un pattern di ricezione lambertiano (e quindi ideale) per due casi di validazione già analizzati al paragrafo precedente.

Radiazione globale sul piano di un meter IDEALE, a 30 cm da una costruzione arancione, Cervia 26 Gennaio 2013

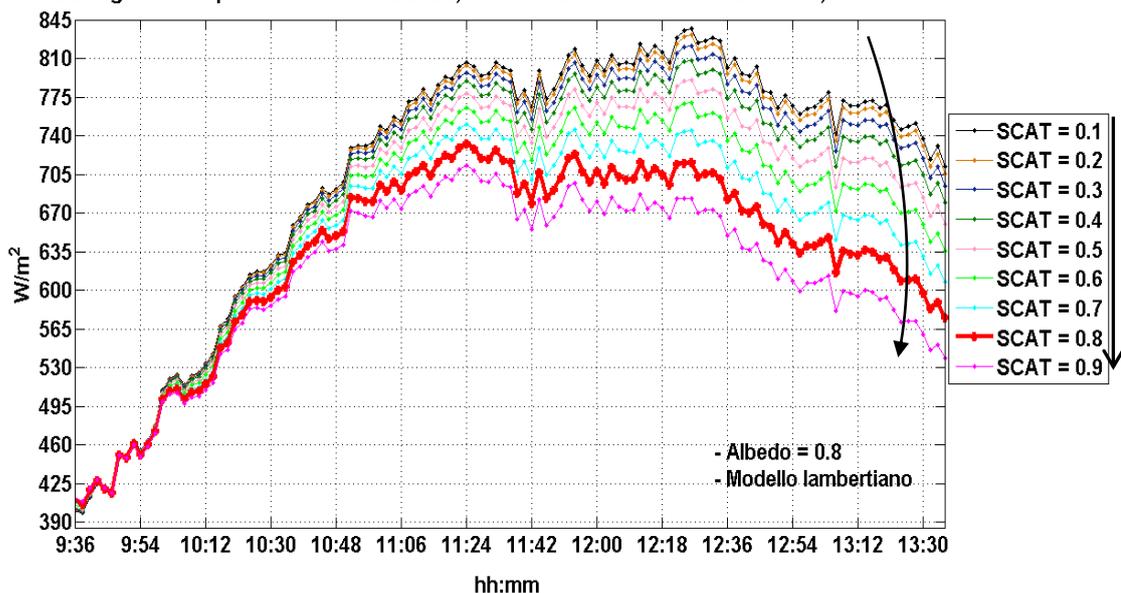


Figura 3.53: Densità di potenza incidente su un solarimetro ideale, ad una quota di 53 cm. Cervia 26 Gennaio 2013.

Come si può evincere dalla figura 3.53, ad inizio mattinata in esame nella validazione di paragrafo 3.5.1.1 non si hanno in questo caso variazioni della densità di potenza incidente, in disaccordo al caso reale dove si aveva il tipico innalzamento dei valori. Questo significa che il pattern lambertiano e la geometria dello scenario sono tali da rendere ininfluenti l'aumento dello scattering a scapito della potenza riflessa. Per assurdo, se si utilizzasse un diagramma ancora più favorevole dal punto di vista della ricezione di raggi ad elevato angolo di incidenza, si otterrebbe la completa inversione del fenomeno rispetto a quello rilevato con il pattern reale.

Come controprova, viene analizzato anche un caso in cui, già utilizzando il pattern reale, non si riscontrano comunque variazioni alle prime ore del mattino, ovvero quello di paragrafo 3.5.1.4. La sostituzione all'interno del simulatore della caratteristica del ricevitore con una ideale provoca appunto l'abbassamento dei valori per tutte le ore in esame, dimostrando che il fenomeno era dovuto alla caratteristica del solarimetro, in unione ad una particolare condizione geometrica dello scenario e della posizione del sole.

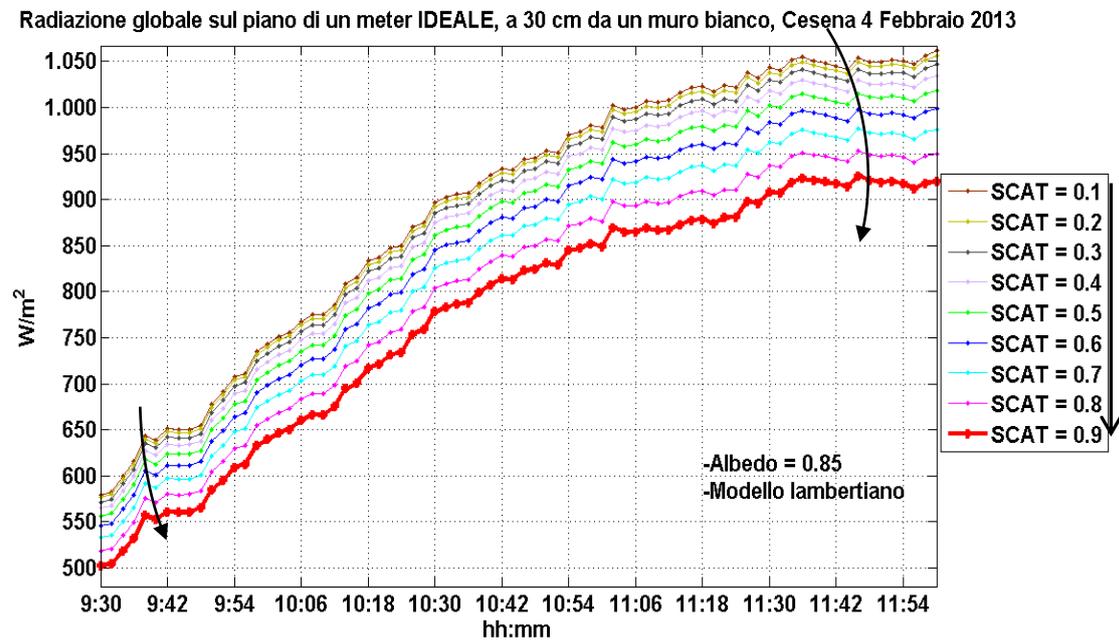


Figura 3.54: Densità di potenza incidente da un solarimetro ideale, ad una quota di 53 cm. Cesena 4 Febbraio 2013.

# Capitolo 4: Energia dissipata e pianificazione urbana.

## 4.1- Introduzione.

L'energia dissipata in un contesto urbano dipende fortemente, come già evidenziato, dal tipo di materiale e dalla colorazione dello stesso. Ma non solo: anche l'altezza degli edifici, la distanza tra questi ultimi e l'orientazione delle strade può modificarne il bilancio.

Uno degli scopi di questa tesi è infatti quello di cercare di capire se sia possibile variare la radiazione solare dissipata in un centro urbano modificandone solo l'orientamento topografico delle strade.

Considerando per semplicità una configurazione ideale con una strada infinitamente lunga, con ai lati due edifici estesi senza nessuna interruzione (street canyon ideale), si vuole determinare quale sia l'orientazione che può ridurre l'isola di calore nei mesi estivi e magari al contempo migliorare l'illuminazione interna nei mesi invernali.

## 4.2- Metodo di simulazione.

Le configurazioni prese in esame sono tre: orientazione Nord/Sud, Est/Ovest, Sud-Ovest/Nord-Est, per ognuna delle quali si è svolta una simulazione per tre tipi di street canyon:

- il primo di tipo sub-urbano, con altezza degli edifici pari a sei metri (due piani) e con una larghezza della strada di trenta metri (strade a scorrimento veloce);
- il secondo di tipo urbano, con edifici alti sedici metri (sei piani) e larghezza del manto stradale di quindici metri;
- il terzo di tipo "Manhattan like", con edifici alti quaranta metri (quindici piani) e larghezza della strada di venti metri.

Il tutto è stato esaminato per tre differenti latitudini, per comprendere come la diversa inclinazione del sole assunta durante l'anno, possa provocare un incremento o meno delle differenze di energia dissipata per le varie orientazioni dello scenario urbano.

Un ulteriore confronto è infine riguardante il comportamento del simulatore, perché va ad analizzare la risposta del Ray Tracing quando si impone ai raggi un differente numero massimo di interazioni possibili con lo scenario.

Per finire si è analizzato in qualche caso l'effetto di una eventuale sostituzione delle superfici laterali del canyon con delle vetrate a specchio.

#### 4.2.1- Parametri di simulazione.

I parametri più importanti per questi tipi di simulazioni sono senza dubbio i valori di albedo per strade ed edifici, che si tramutano in valori specifici di costante dielettrica relativa.

In particolare, l'albedo utilizzato per gli edifici è di 0.7 (ovvero il 70% della radiazione incidente viene riflessa), mentre per l'asfalto si è considerato un albedo di 0.1.

Per il canyon "Manhattan" è stata usata una ulteriore differenziazione che comporta la modifica dell'albedo sulle superfici laterali dei due edifici (portandolo da 0.7 a 0.5) per cercare in qualche modo di simulare l'eventuale presenza di due vetrate a specchio che si affacciano sulla strada.

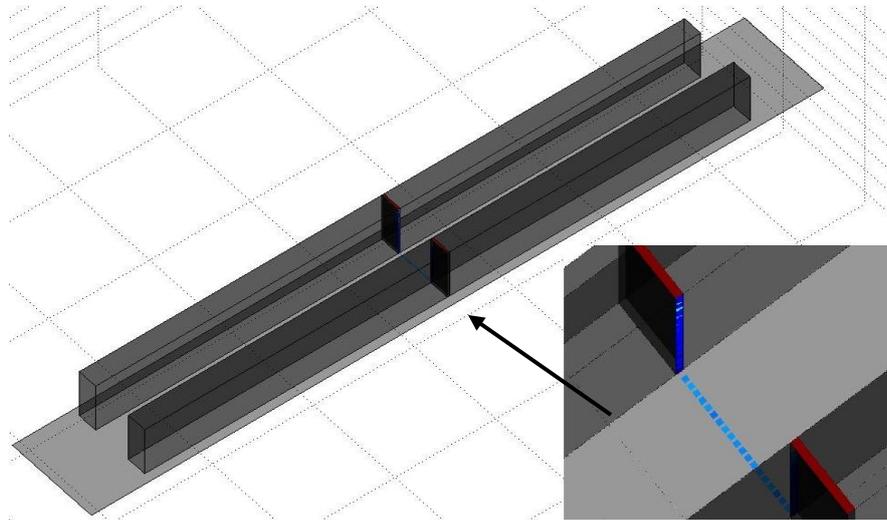
I possibili modi di interazione con cui sono state effettuate tutte le simulazioni sono i seguenti:

- 1) 0 interazioni, ovvero disabilitazione di scattering e riflessioni;
- 2) 1 interazione, quindi i raggi subiscono uno scattering oppure una riflessione;
- 3) 2 interazioni, per cui i raggi generati dallo scattering possono subire anche una riflessione;
- 4) 3 e 4 interazioni, dove si è mantenuto lo stesso vincolo di cui sopra per i raggi che subiscono uno scattering.

#### 4.2.2- Scenario di riferimento.

L'ipotesi di idealità di cui si parlava consiste nell'assenza di strade trasversali e che la strada principale sia abbastanza lunga, consentendo di escludere eventuali "effetti di bordo". Di conseguenza lo scenario di simulazione è composto da due soli edifici molto lunghi separati da una strada, con i ricevitori disposti lungo una linea trasversale collocata a metà dello scenario. Nell'ordine, tali ricevitori partono da uno

dei due tetti, scendono lungo la superficie laterale del primo edificio, attraversano la strada e risalgono la parete laterale del secondo caseggiato (figura 4.1). Il tutto viene disposto ad una distanza reciproca di 1 metro.



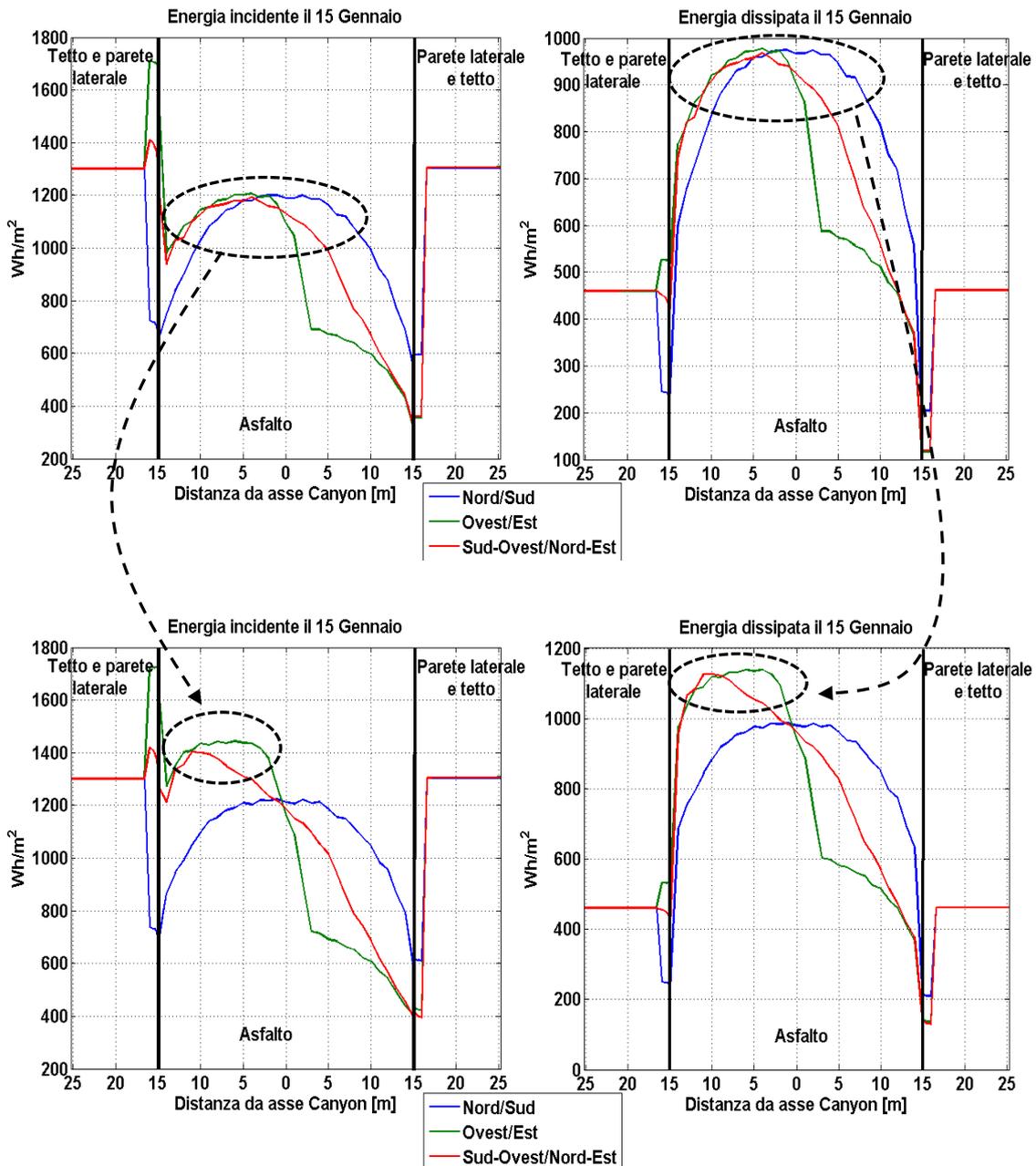
**Figura 4.1: Street canyon e disposizione dei ricevitori.**

### 4.3- Latitudine $44^{\circ} 8' N$ ; Longitudine $12^{\circ} 14' E$ .

Queste coordinate sono relative alla città di Cesena, anche se risultati del tutto analoghi si possono riscontrare, con piccole differenze, per molte località romagnole di pianura situate in zone limitrofe.

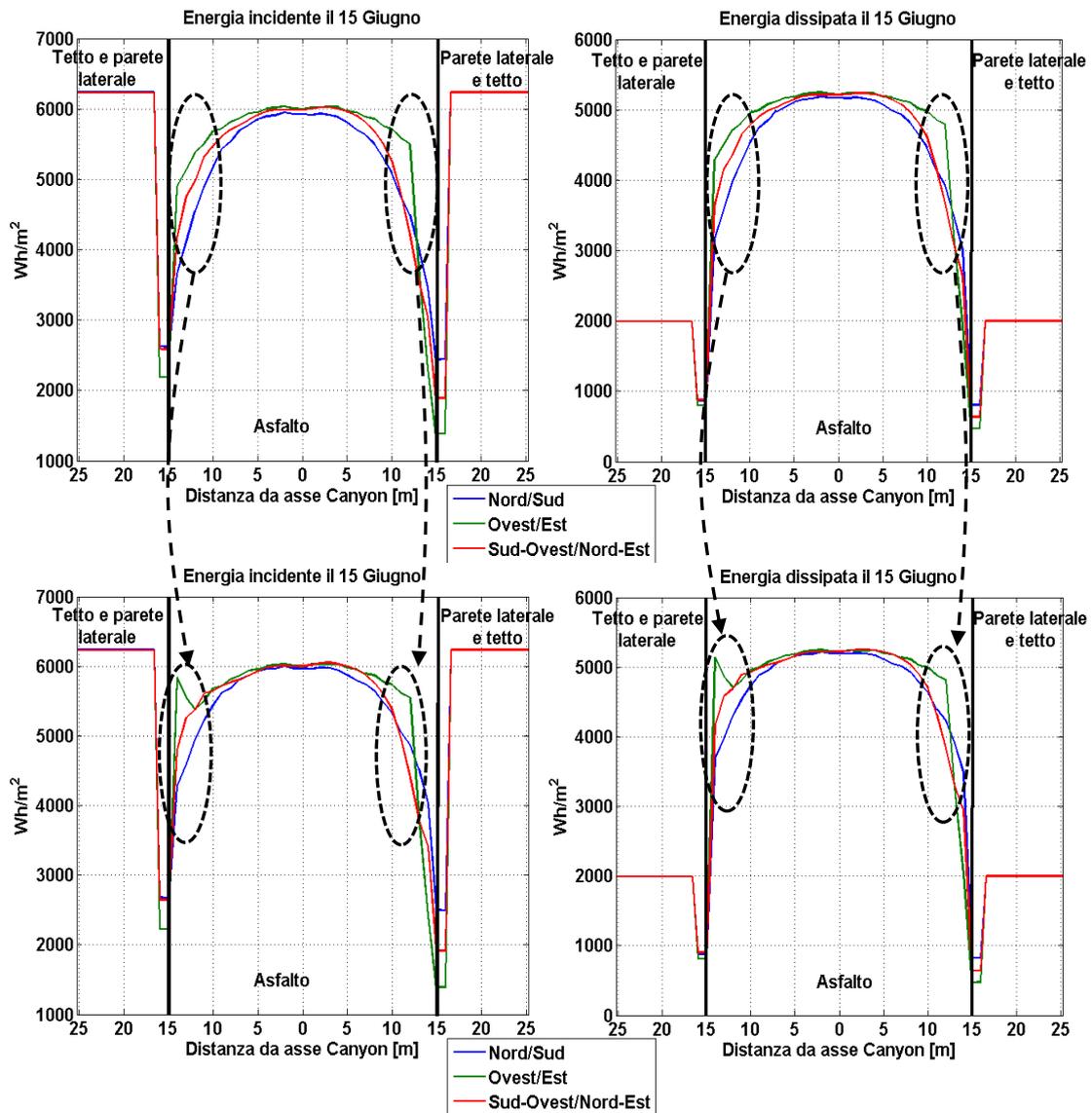
#### 4.3.1- Altezza edifici 6 m; Larghezza strada 30 m.

Si tratta di una configurazione che si propone solitamente in uno scenario suburbano. Seppur gli edifici siano relativamente bassi, dal confronto grafico tra figura 4.2.A e figura 4.2.B si può facilmente notare come la considerazione delle possibili riflessioni dei raggi solari con le pareti laterali porti ad un aumento della densità di energia incidente sul suolo stradale. In particolare, la curva tratteggiata nera di figura 4.2.B mostra come nel mese di Gennaio si possano rilevare, per l'orientazione Ovest/Est, aumenti dell'energia incidente di  $250 \text{ Wh/m}^2$  giornalieri, e di  $180 \text{ Wh/m}^2$  per l'energia assorbita, nella zona che si estende dall'asse del canyon sino all'edificio "Nord". In termini percentuali parliamo di incrementi del 19% per entrambe le energie. Fenomeni molto simili sono riscontrabili in questo caso anche per orientazioni "miste", mentre non sembrano esserci variazioni apprezzabili per quella Nord/Sud.



**Figura 4.2.A e Figura 4.2.B: Rappresentazione dell'energia incidente e dissipata lungo la route di ricevitori, per 0 interazioni e 4 interazioni rispettivamente, il 15 Gennaio.**

L'estensione spaziale di tale fenomeno sembra ridursi di dimensione nel mese di Giugno, dove l'aumento dell'energia incidente e assorbita sulla superficie stradale avviene solo nelle immediate vicinanze di entrambi gli edifici (figura 4.3.A e 4.3.B). La curva tratteggiata indica che l'incremento è comunque considerevole, anche se spazialmente limitato, infatti si parla di variazioni di picco che si aggirano sui 600 Wh/m<sup>2</sup> giornalieri sia per l'energia incidente che per quella dissipata, che si traducono in incrementi percentuali del 14% e del 17%, rispettivamente.



**Figura 4.3.A e Figura 4.3.B: Rappresentazione dell'energia incidente e dissipata lungo la route di ricevitori, per 0 interazioni e 4 interazioni rispettivamente, il 15 Giugno.**

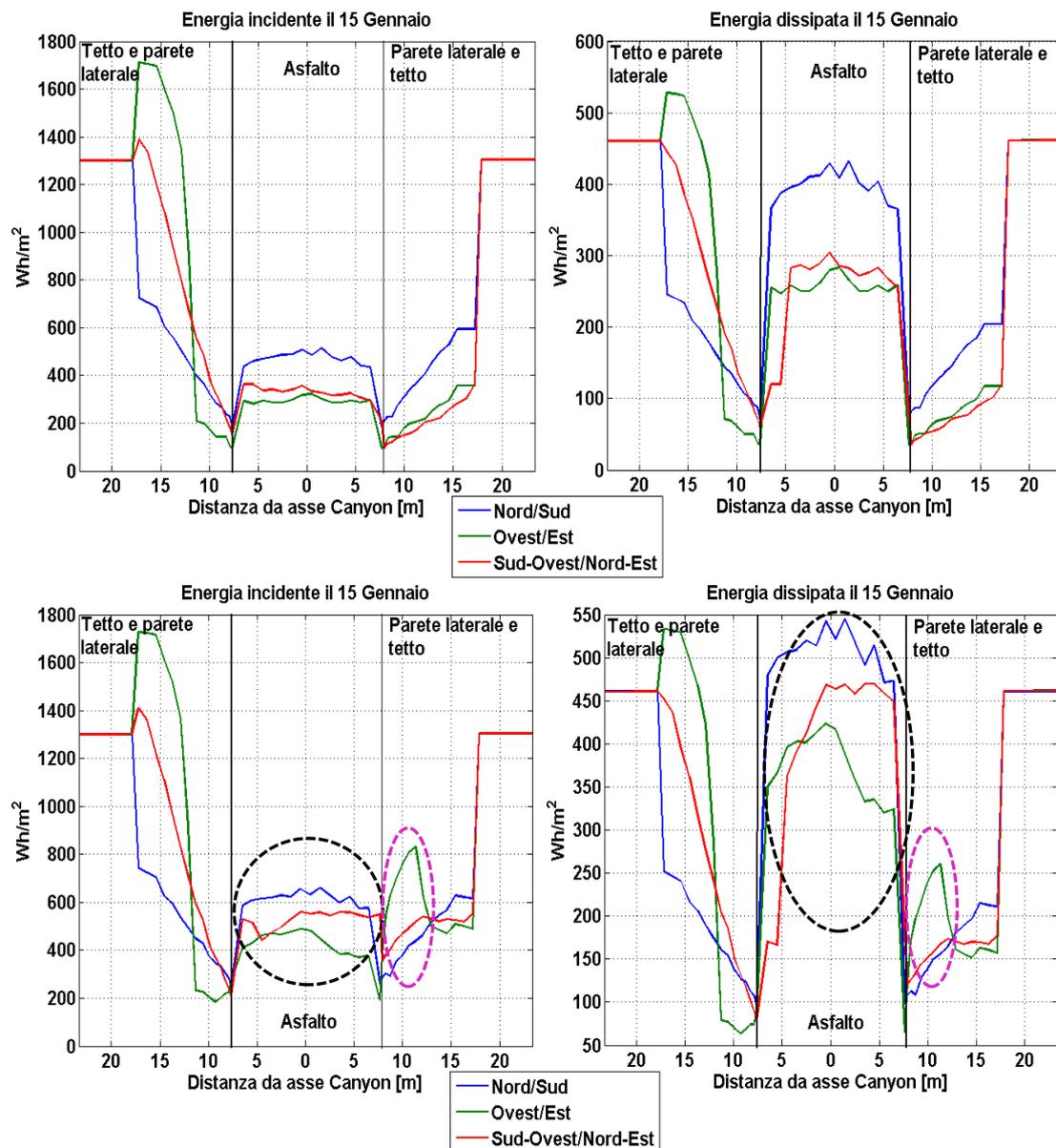
Per quanto riguarda le altre due orientazioni, si riscontrano anche qui leggeri aumenti ma di minore intensità rispetto a quello appena descritto per il caso “Ovest/Est”.

#### 4.3.2- Altezza edifici 16 m; Larghezza strada 15 m.

Tale scenario corrisponde alla tipica configurazione urbana, come ad esempio il centro della città di Cesena. La maggior vicinanza degli edifici e la loro altezza può far subito intuire che le variazioni di energia incidente e dissipata in funzione del numero di interazioni si ripercuoterà su tutta l'estensione stradale. La variazione percentuale (tra i due funzionamenti del Ray Tracing presi in esame) arriva a toccare anche il 50% nel caso di orientamento Ovest/Est (per entrambe le energie considerate), mentre si riduce al 30% per orientamenti di tipo Nord/Sud.

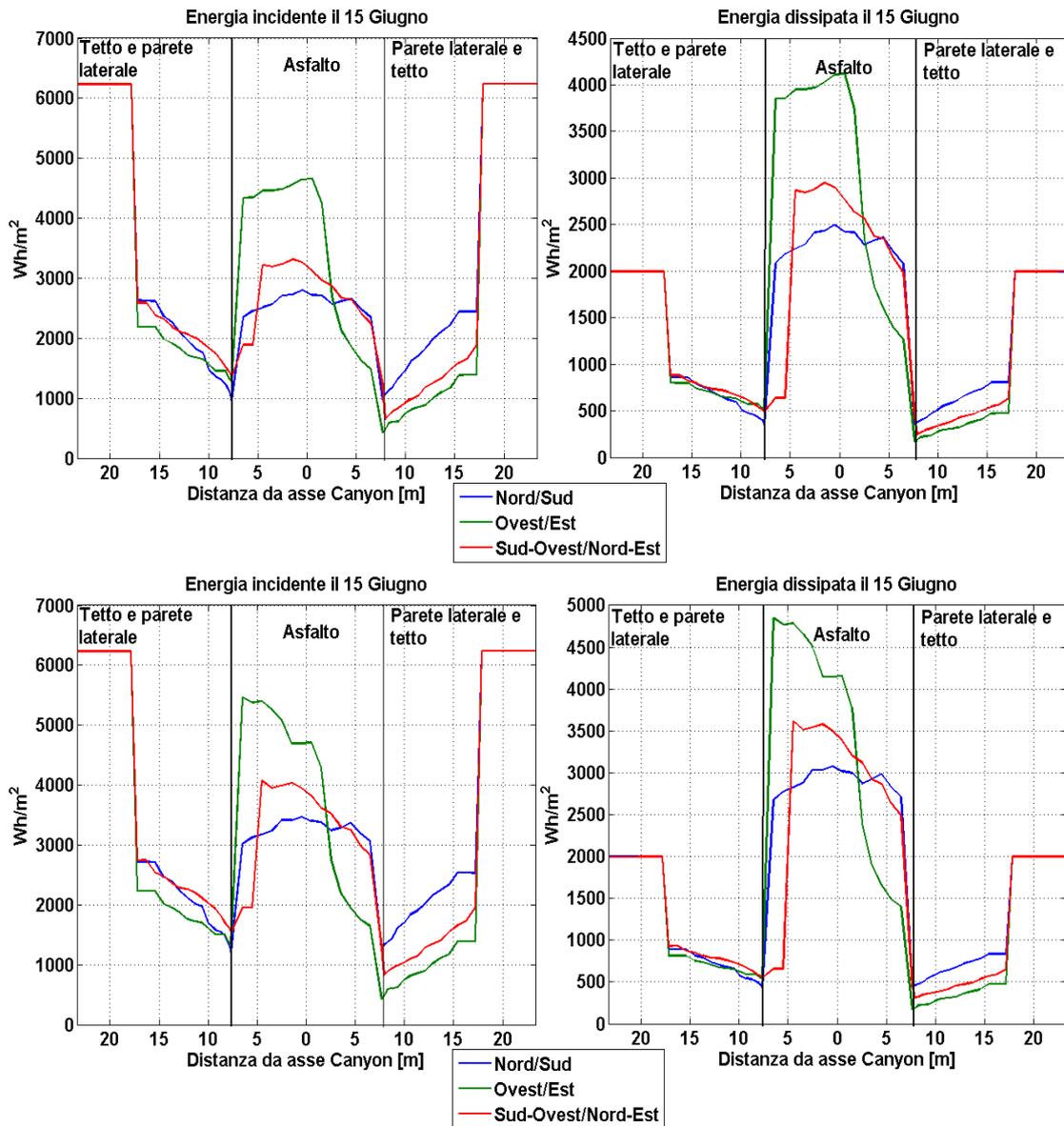
Incrementando il numero di riflessioni si può anche notare una sostanziale variazione dell'energia incidente ed assorbita sulla parete laterale Sud nella configurazione Ovest-Est (curve tratteggiate magenta di figura 4.4.B), proprio perché il sole illumina parte della parete dell'edificio Nord e si crea un discreto contributo sulla parete opposta grazie alla riflessione dei raggi.

Tale fenomeno avviene però solo se gli edifici sono abbastanza alti e vicini tra loro provocando, come in questo caso, un picco energetico differenziale di  $600 \text{ Wh/m}^2$  di energia incidente e di  $180 \text{ Wh/m}^2$  di energia dissipata: incrementi percentuali del 300% e 240% rispettivamente, localizzati sulla parete "Sud", a circa 5 metri dal suolo.



**Figura 4.4.A e Figura 4.4.B: Rappresentazione dell'energia incidente e dissipata lungo la route di ricevitori, per 0 interazioni e 4 interazioni rispettivamente, il 15 Gennaio.**

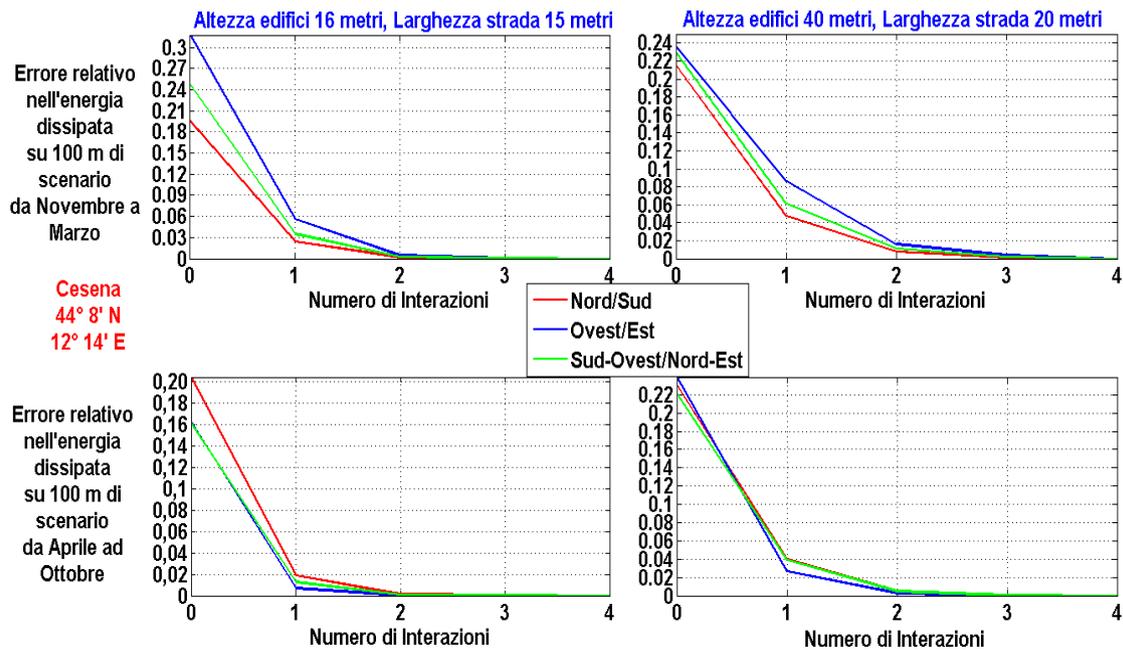
Per il mese di Giugno le variazioni diminuiscono e inoltre scompare il picco di energia sulla parete laterale Est (figura 4.5.A e 4.5.B).



**Figura 4.5.A e Figura 4.5.B: Rappresentazione dell'energia incidente e dissipata lungo la route di ricevitori, per 0 interazioni e 4 interazioni rispettivamente, il 15 Giugno.**

### 4.3.3- Analisi prestazionale del simulatore.

Per riassumere il comportamento del simulatore al diminuire o addirittura all'annullarsi del numero di interazioni previste, commesso in uno scenario lungo cento metri, viene mostrato di seguito un grafico multiplo, che analizza lo scenario urbano e metropolitano nelle varie tipologie di orientazione dello street canyon ideale.



**Figura 4.6: Comportamento del simulatore in funzione del numero di interazioni imposte, nelle varie orientazioni dello scenario e per due suddivisioni dell'anno.**

Nella figura precedente può essere interessante notare come l'errore introdotto vari in modo diverso a seconda del tipo di scenario, del suo orientamento e del periodo temporale di riferimento. Tuttavia le differenze di errore tra le orientazioni diminuiscono per scenari metropolitani oppure per mesi a maggiore altezza solare.

Un altro risultato molto più intuibile dal grafico è che aumentare oltre a due il numero di interazioni possibili del Ray Tracing non comporta, per qualsiasi configurazione descritta, una variazione significativa dei risultati. Tale affermazione (che risulta sempre più vera man mano che lo scenario si fa più rilassato, con edifici distanti e bassi) è importante perché consentirà di ridurre i tempi di calcolo delle future simulazioni solari, con la consapevolezza di commettere un errore molto limitato. Tutti i risultati riassuntivi che vengono esposti nei successivi paragrafi di questo capitolo si riferiranno comunque a simulazioni a quattro interazioni.

#### 4.3.4- Analisi delle orientazioni.

Per comprendere meglio le differenze dovute alle varie orientazioni bisogna analizzare il grafico del bilancio energetico annuale. Di seguito (figura 4.7) verrà fatta ancora una volta la distinzione tra mesi "freddi" (da Novembre a Marzo) e mesi "caldi" (da Aprile a Ottobre) proprio per analizzare l'effetto malevolo dell'isola di calore nei mesi estivi e per verificare se sia possibile allo stesso tempo avere dei

benefici nel periodo invernale in termini di illuminazione o lieve riscaldamento delle strutture abitative o lavorative. Inoltre abbiamo una separazione tra pareti laterali e asfalto, che contribuiscono in maniera differente al riscaldamento urbano.

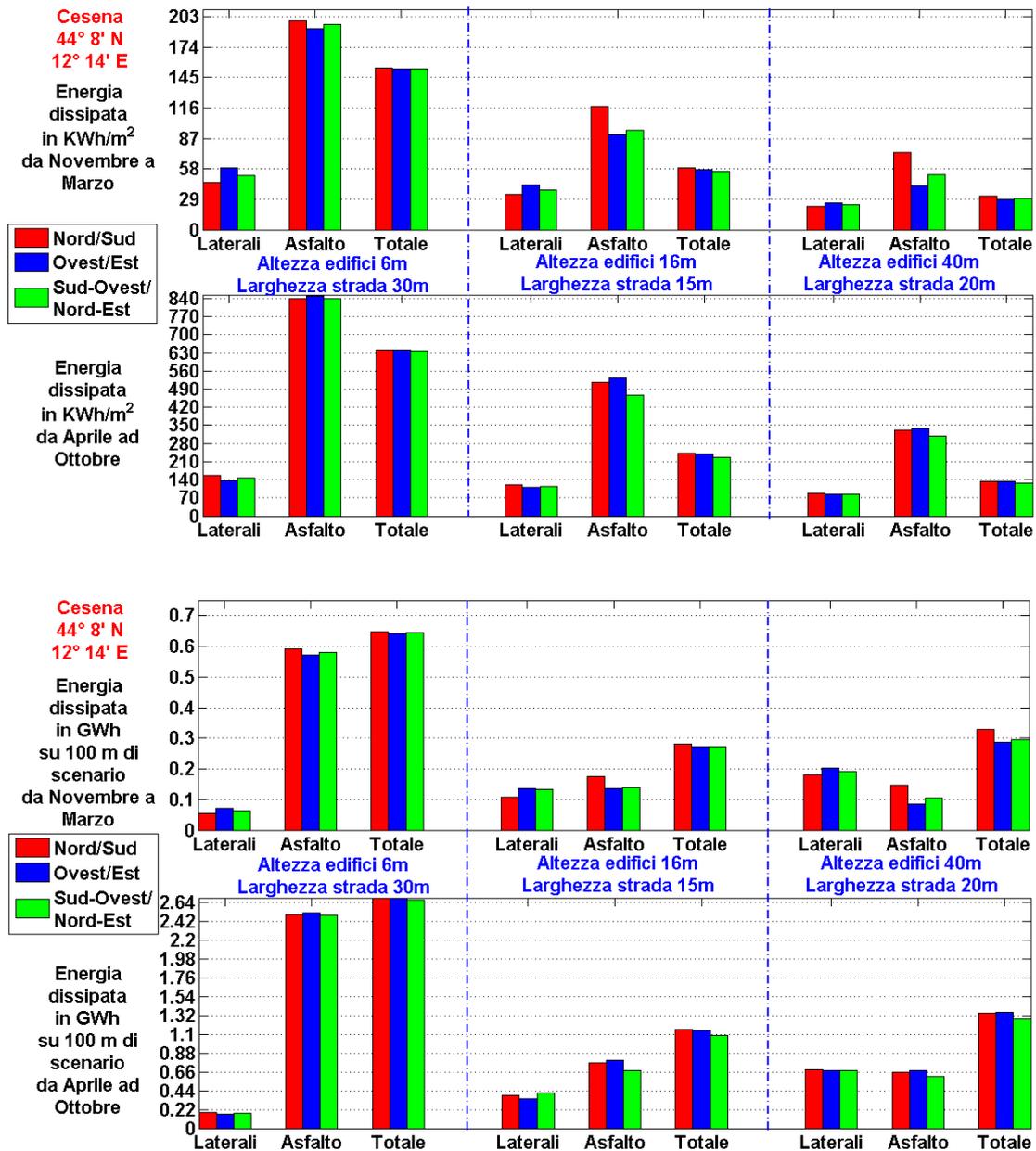
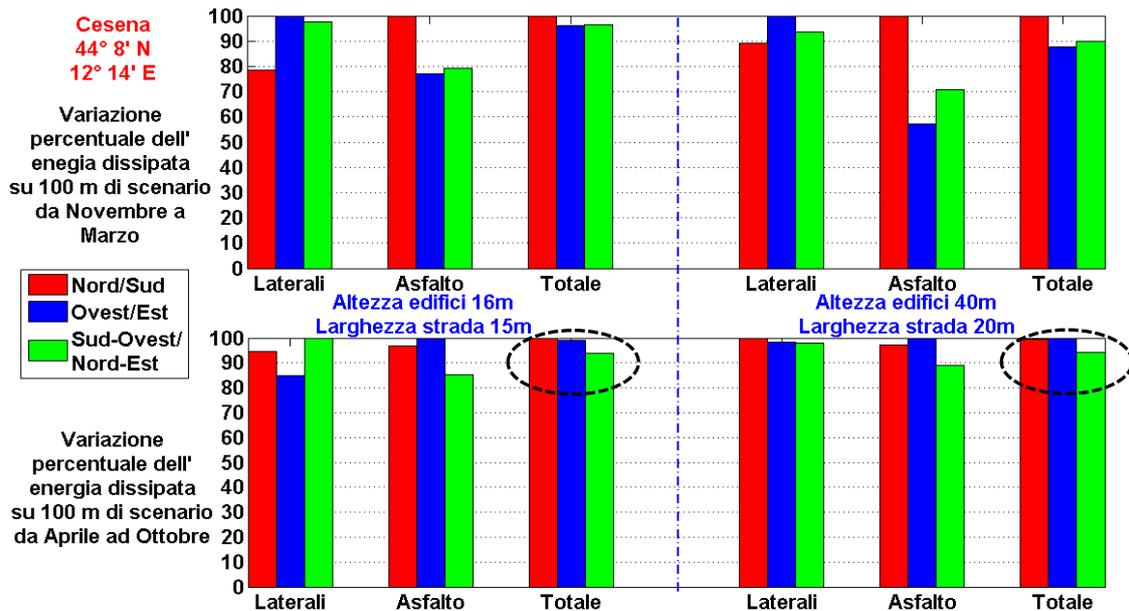


Figura 4.7.A e Figura 4.7.B: Densità di energia ed energia complessiva dissipata su 100 m di street canyon per le varie orientazioni e tipologie di scenario urbano.

Dai grafici di figura 4.7.A e 4.7.B apparentemente non si notano sostanziali differenze energetiche assolute al variare dell'orientazione dello street canyon, quindi con un altro grafico delle variazioni relative (figura 4.8) si evidenziano differenze soprattutto nel periodo invernale ma, seppur minime, anche nel periodo estivo.



**Figura 4.8: Variazione energetica percentuale in funzione dell'orientazione di 100 metri di street canyon.**

In entrambi i casi, ovvero per il semplice scenario urbano e per lo street canyon “Manhattan like”, l'orientazione che consente di avere, sul totale delle sole pareti laterali, maggior riscaldamento (o illuminazione) invernale è quella Ovest/Est. Se prendiamo invece in considerazione anche l'asfalto e quindi lo scenario nel suo complesso, l'orientazione Nord/Sud è quella che consente di ottenere un riscaldamento urbano maggiore nel periodo invernale.

Nel periodo estivo non ci sono sostanziali variazioni percentuali dell'energia dissipata sulle pareti laterali di uno scenario metropolitano, ma una orientazione obliqua consente di avere una riduzione dell'energia dissipata sull'asfalto di circa il 10-11%, e una riduzione sul totale di circa il 5% (curva nera tratteggiata). Questa buona caratteristica dell'orientazione Sud-Ovest/Nord-Est si riscontra anche per normali scenari urbani, con una riduzione percentuale praticamente identica a quella della tipologia “Manhattan”. Un aspetto importante da sottolineare è che l'asfalto, se pur non a diretto contatto con gli interni abitativi, contribuisce in maniera maggiore all'effetto “isola di calore” a causa del suo basso albedo, e produce un innalzamento della temperatura dell'aria. Ciò significa che per l'analisi dell'orientazione ottima estiva è anche doveroso fare il confronto sull'energia totale dissipata e non specificatamente solo su quella dissipata dalle pareti laterali.

In termini quantitativi, la possibilità di scegliere una orientazione “obliqua” può consentire una riduzione della dissipazione energetica totale (nei mesi da Aprile ad Ottobre) rispetto all'orientazione Nord/Sud di circa 0.7 GWh per lo scenario urbano

e di circa 0.8 GWh per quello metropolitano, con una riduzione di circa il 5% per entrambe.

#### 4.3.5- Analisi con vetrate a specchio.

Nello scenario di tipo Manhattan si vuole determinare come può influire l'albedo delle pareti sull'energia totale dissipata. In particolare, si è sostituito l'albedo classico (0.7) utilizzato per simulare il comportamento dell'intonaco chiaro, con quello caratteristico di una vetrata a specchio (il cui albedo può giungere a 0.5). Un ulteriore accorgimento, per meglio simulare tale superficie liscia, è quella di ridurre il coefficiente di scattering, portandolo ad un valore prossimo allo zero a causa dell'assenza di imperfezioni e rugosità.

Dall'analisi di figura 4.9, che mostra un confronto energetico tra i due casi, si può constatare innanzitutto che, per entrambe le casistiche, l'orientazione che consente di avere una minima riduzione dell'energia dissipata estiva è ancora quella mista (Sud-Ovest/Nord-Est oppure Sud-Est/Nord-Ovest). La riduzione di energia totale che si ha apportando questa topologia strutturale è praticamente la stessa per entrambi i tipi di scenari presi ora in esame (come viene mostrato nelle curve tratteggiate di figura 4.9).

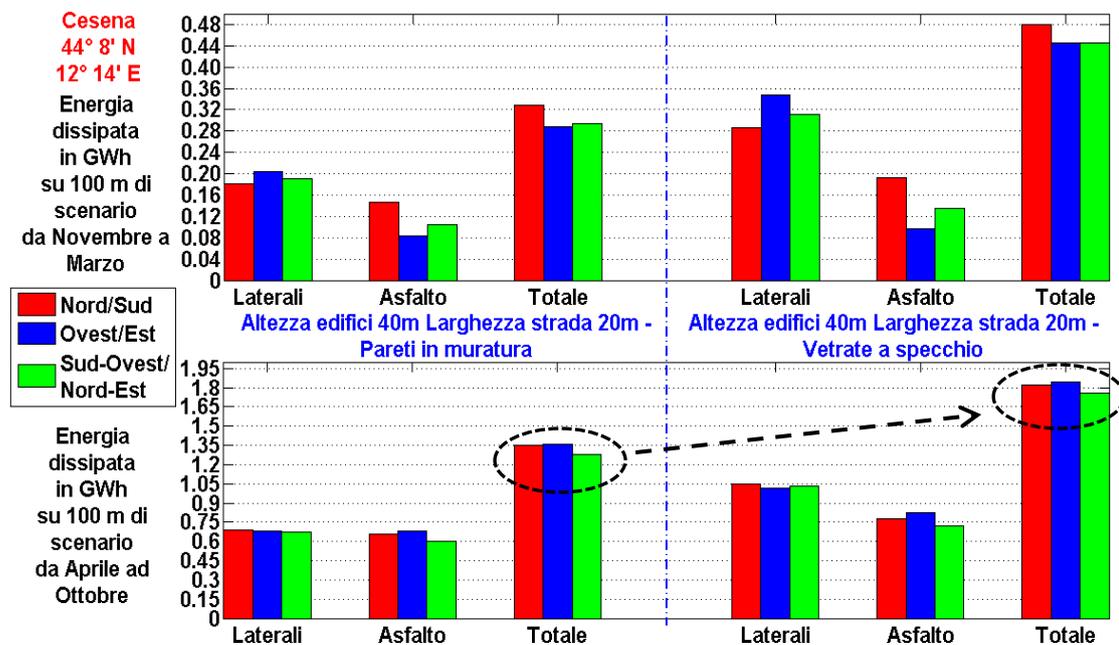


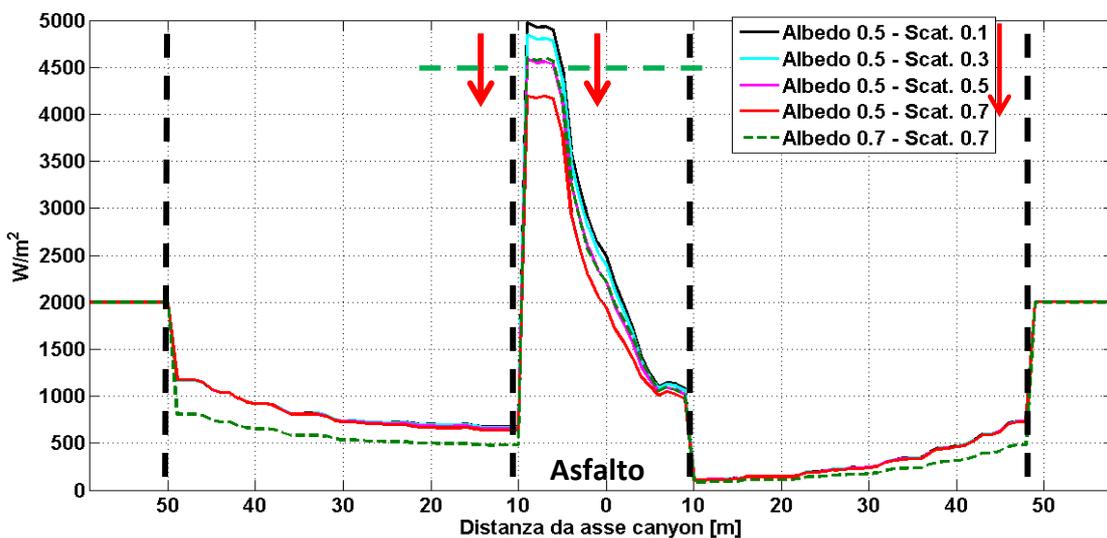
Figura 4.9: Bilancio energetico su 100 metri di street canyon nel confronto pareti/vetrate.

Al contrario di quanto si possa aspettare, un secondo aspetto che salta subito in evidenza è che l'energia dissipata sull'asfalto subisce un leggero aumento rispetto al caso delle pareti. Mentre questo avvenimento potrebbe essere ovvio per le superfici laterali (dato che è stato decrementato il loro albedo), meno lo è per il manto stradale, che per lo stesso motivo dovrebbe ricevere per riflessione dalle pareti una porzione minore di energia.

La soluzione a tale quesito è da ricercare nell'adozione del nuovo coefficiente di scattering: le vetrate a specchio “respingono” sì meno energia, ma lo fanno quasi esclusivamente per pura riflessione, dato che lo scattering è praticamente inesistente. Per via della geometria dello scenario e della posizione relativa del sole, molta di questa radiazione riflessa impatta sull'asfalto.

Le pareti in muratura invece hanno un coefficiente di scattering molto più elevato (per via della loro rugosità) e la porzione di radiazione incidente che viene diffusa è evidentemente maggiore di quella puramente riflessa. Data la natura dello scattering, parte dell'energia viene scatterata in direzioni diverse rispetto a quella di riflessione, e sulla strada giunge una quantità minore di radiazione.

A sostegno di questa affermazione sono state fatte alcune simulazioni ad albedo costante (pari a 0.5) ma con coefficiente di scattering progressivamente crescente. Oltre un determinato valore di quest'ultimo si riscontra effettivamente un'inversione di tendenza, con un sensibile abbassamento della radiazione dissipata sull'asfalto rispetto al caso delle pareti in muratura (quest'ultima rappresentata in figura 4.10 dalla linea verde tratteggiata).



**Figura 4.10: Radiazione dissipata sullo street canyon Ovest/Est il 15 Giugno al variare del coefficiente di scattering delle pareti.**

La linea verde orizzontale tratteggiata indica appunto il picco massimo di radiazione dissipata sull'asfalto nel caso di canyon con pareti laterali in muratura. Come si può notare, tale livello viene superato, nel caso di albedo laterale pari a 0.5, solo se il coefficiente di scattering è minore a sua volta di circa 0.5.

#### 4.4- Latitudine 30° 4' N; Longitudine 31° 13' E.

Il sito in questione rappresenta Il Cairo, città egiziana situata a nord del Tropico del Cancro.

##### 4.4.1- Analisi delle orientazioni.

Dallo studio di queste simulazioni (figura 4.11.A e 4.11.B) è possibile notare un incremento (rispetto alla precedente posizione geografica analizzata) delle differenze di radiazione dissipata sulle varie orientazioni, sia nei mesi invernali che estivi. Anche in questo contesto non si riscontrano però variazioni sensibili nel caso di scenario sub-urbano.

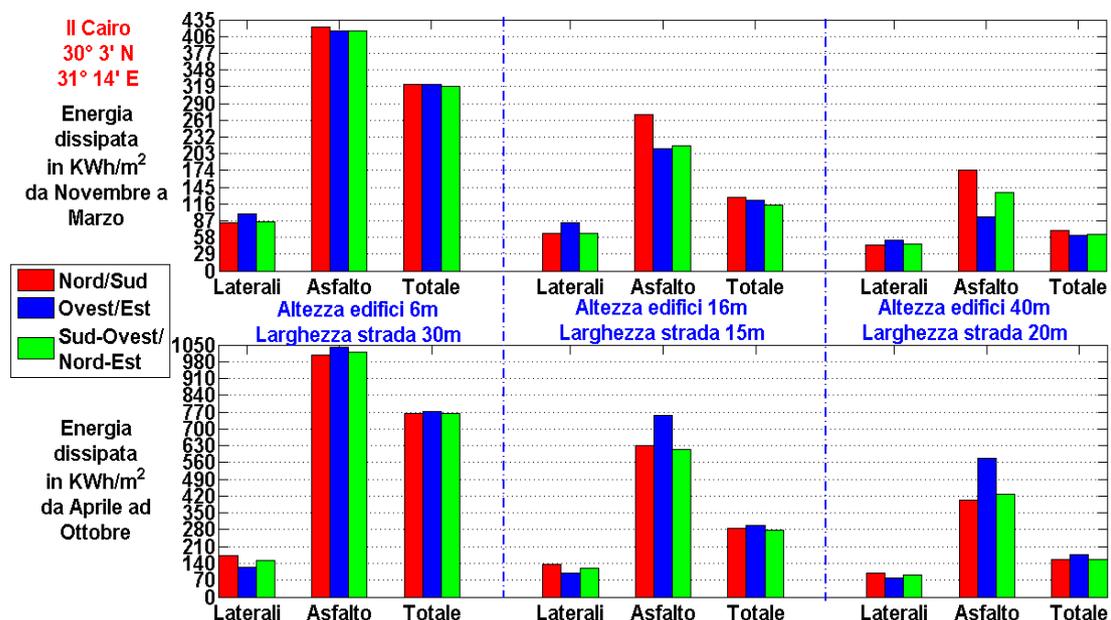


Figura 4.11.A: Densità di energia dissipata sullo street canyon per le varie orientazioni e tipologie di scenario urbano.

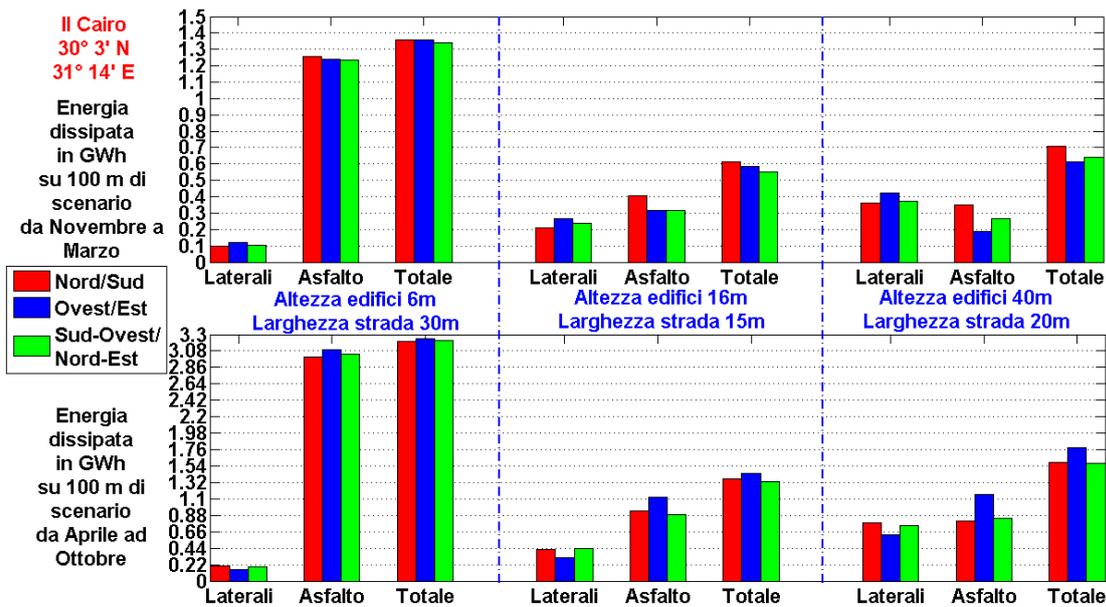


Figura 4.11.B: Energia complessiva dissipata su 100 m di street canyon per le varie orientazioni e tipologie di scenario urbano.

Il prossimo grafico (figura 4.12) consente di analizzare più nel dettaglio la variazione relativa di energia dissipata.

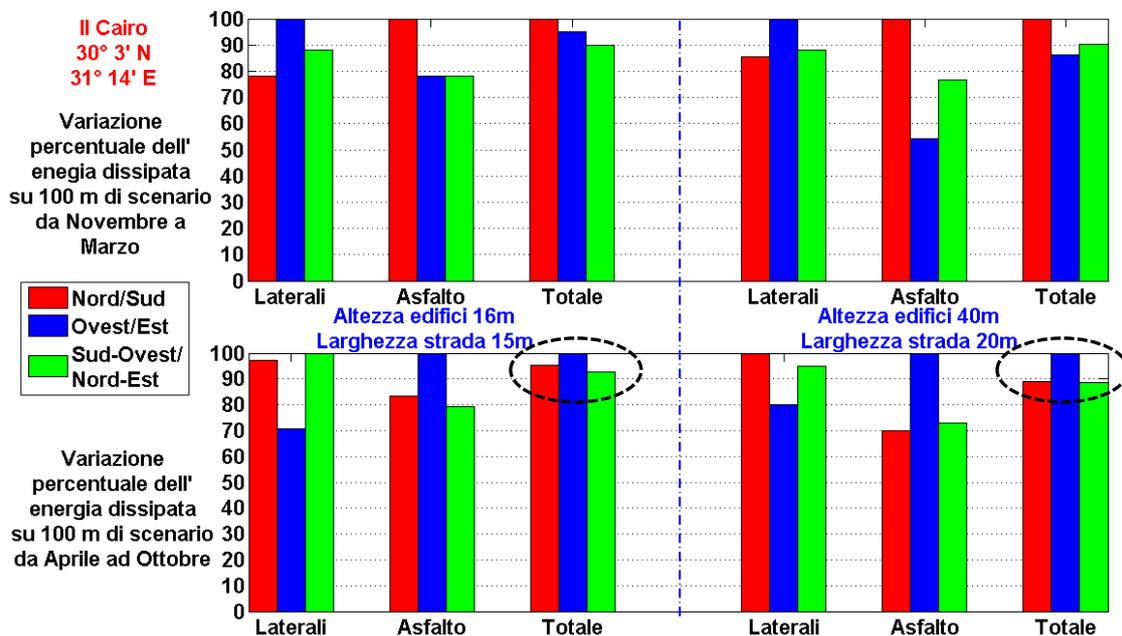


Figura 4.12: Variazione energetica percentuale in funzione dell'orientazione di 100 metri di street canyon.

Anche in tale analisi è necessario fare alcune considerazioni sugli effetti dell'energia dissipata. Nei mesi invernali (seppur probabilmente in questo caso non si ha a che fare con problemi di riscaldamento o illuminazione) l'orientazione ottima figura essere quella Ovest/Est (per quanto riguarda le pareti laterali) e Nord/Sud se invece

si considera un bilancio complessivo del riscaldamento urbano. Per quanto riguarda i mesi estivi, si ha un abbassamento dell'energia dissipata sulle pareti laterali se si costruiscono i canyon nella direzione Ovest/Est, ma ciò non consente di avere un abbassamento dell'energia complessiva dissipata, che la si ottiene invece con orientazioni Nord/Sud o, ancora meglio, Sud-Ovest/Nord-Est. In termini quantitativi, con l'adozione di queste due ultime, si ottiene una riduzione dell'energia "estiva" rispetto alla direzione Ovest/Est dal 4 al 6% (~0.1 GWh) per lo scenario urbano e 11 punti percentuali (~0.21 GWh) per lo scenario metropolitano (curve nere tratteggiate in figura 4.12).

#### 4.4.2- Analisi con vetrate a specchio.

Nella prossima figura si può ancora notare, questa volta in modo più evidente, il fenomeno già descritto dell'incremento dell'energia dissipata sull'asfalto, così come quella totale. Però, al contrario del caso a maggior latitudine, dove non si riscontravano variazioni nelle differenze energetiche, qui la sostituzione delle pareti con le vetrate a specchio fa sì che ci sia un minor discostamento energetico tra le varie orientazioni dello scenario (come si può notare nelle zone cerchiare di nero in figura 4.13). Rimangono comunque valide le considerazioni espresse nel paragrafo precedente, ovvero sul peggioramento dell'isola di calore nel caso di adozione di una orientazione Ovest/Est per lo street canyon.

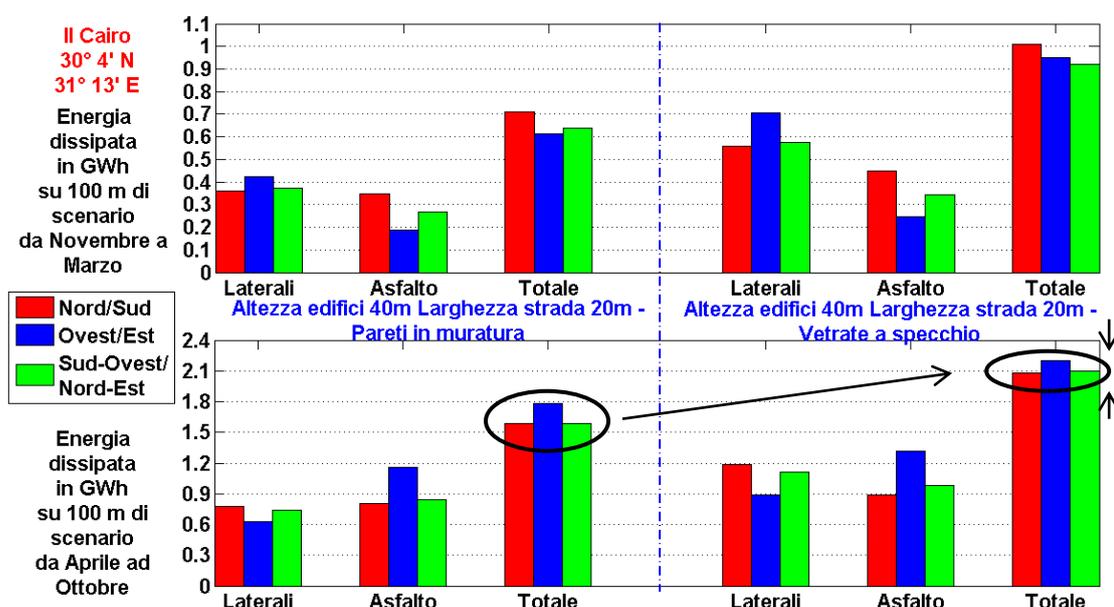


Figura 4.13: Bilancio energetico su 100 metri di street canyon nel confronto pareti/vetrate.

## 4.5- Latitudine 14° 43' N; Longitudine 17° 27' W.

Tali coordinate si riferiscono alla città di Dakar (Senegal), situata sull'Oceano Atlantico ad una latitudine compresa tra il Tropico del Cancro e l'Equatore.

### 4.5.1- Analisi delle orientazioni.

A tali latitudini si ha una perdita di significato della suddivisione dell'anno nei due intervalli temporali utilizzati sinora. In questo sito infatti il path solare presenta un andamento molto diverso rispetto a quello con il quale siamo abituati. Innanzitutto il sole raggiunge lo zenit vero e proprio (90 gradi di elevazione rispetto all'orizzonte) sia ad Aprile che ad Agosto, mentre il minimo assoluto di elevazione viene raggiunto a Dicembre (figura 4.14.A e 4.14.B). Inoltre la radiazione solare durante quest'ultimo mese non si riduce drasticamente come può accadere se si oltrepassano i tropici.

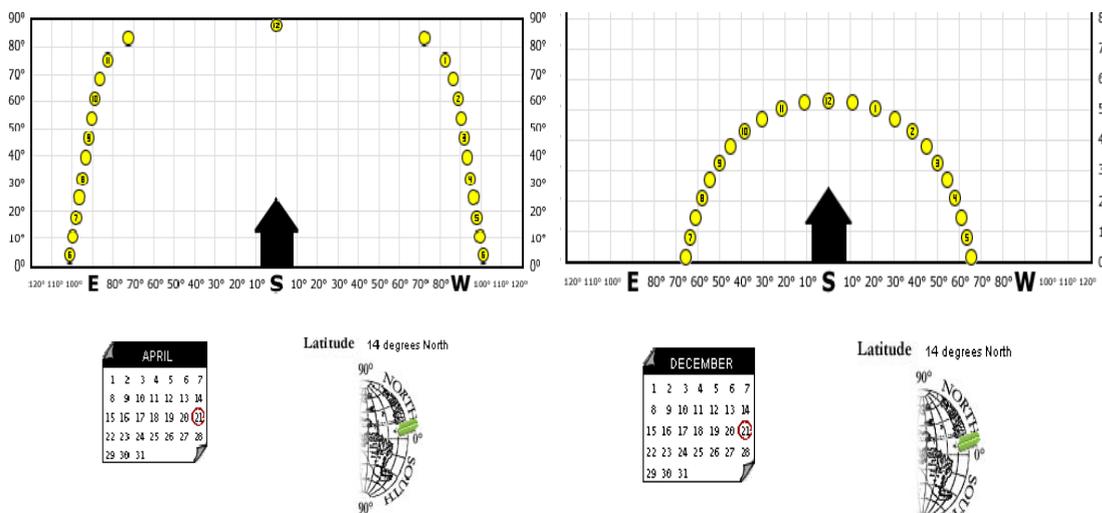
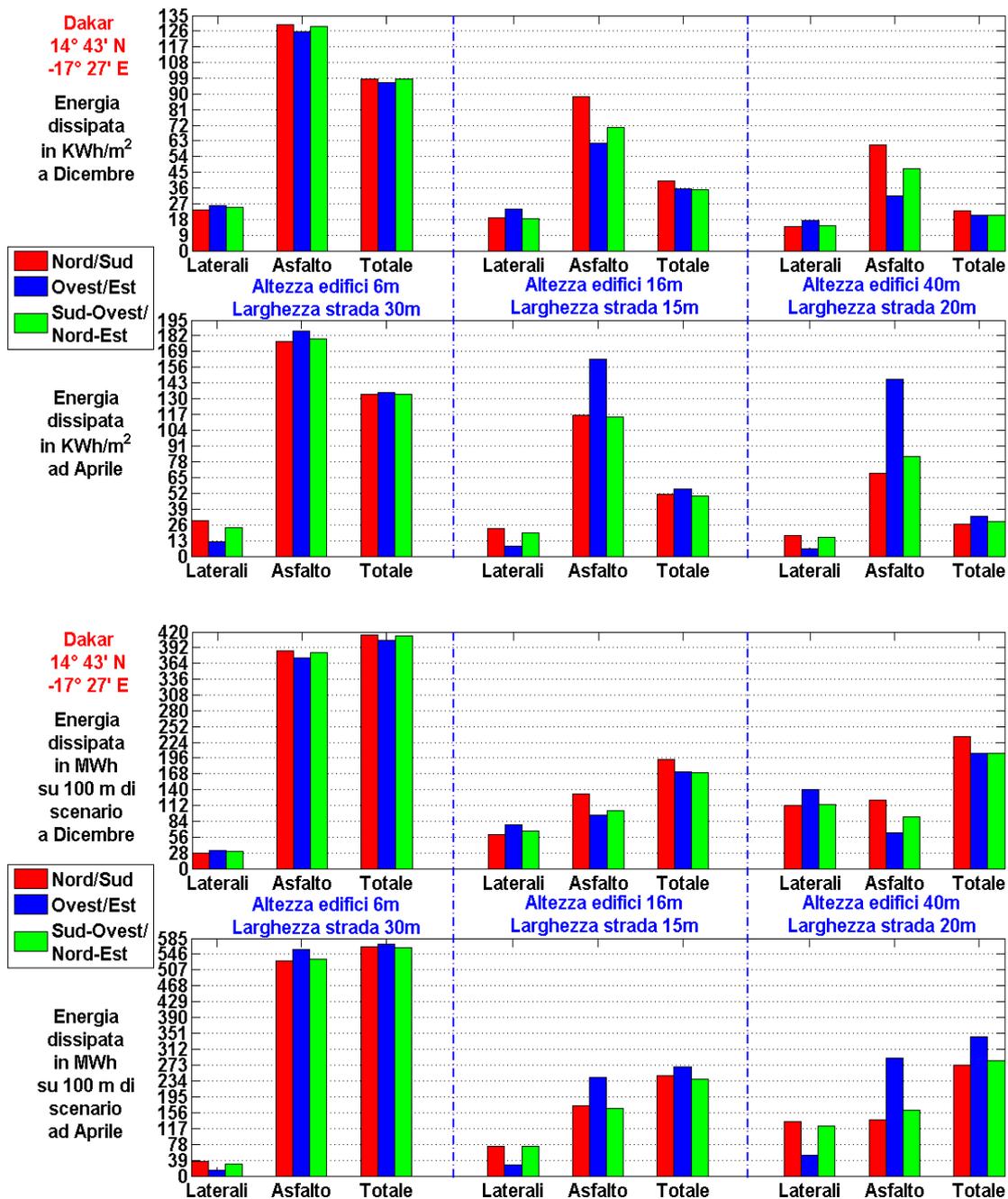


Figura 4.14.A e Figura 4.14.B: Path solare in Aprile ed in Dicembre a 14° di latitudine Nord [8].

Quindi i grafici di figura 4.15.A e 4.15.B riportano entrambi valutazioni energetiche per il mese di Dicembre e di Aprile, ma la successiva loro analisi è rivolta in particolar modo al mese di Aprile. Considerando le temperature medie di quelle zone infatti, è del tutto inutile studiare l'orientazione che consente di ottenere riscaldamento maggiore nei mesi più freschi, semplicemente perché mediamente le temperature non scendono mai sotto i 20 gradi centigradi.



**Figura 4.15.A e Figura 4.15.B: Densità di energia ed energia complessiva dissipata su 100 metri di street canyon per le varie orientazioni e tipologie di scenario urbano.**

Analizzando il mese di Aprile, si scopre nuovamente che l'orientazione Ovest/Est è quella peggiore, mentre risultano più ridotte le energie per le orientazioni Nord/Sud o miste. Tale risultato si poteva intuire per le caratteristiche appena descritte sul percorso solare di questa posizione geografica in tale momento dell'anno. Ancora una volta, con l'ulteriore ausilio di figura 4.16, si riportano alcuni valori indicativi di queste variazioni: nello scenario urbano (altezza edifici 16 m, larghezza strada 15 m), si hanno diminuzioni, rispetto al caso Ovest/Est, del 8.5% e 11% (circa 23 e 30 MWh) con l'adozione di orientazioni Nord/Sud o Sud-Est/Nord-Ovest

rispettivamente. Nello scenario metropolitano ( altezza edifici 40 m, larghezza strada 20 m) aumentano le fluttuazioni: il guadagno in termini di risparmio di energia dissipata sono di 70 MWh e 60 MWh, corrispondenti in termini percentuali a diminuzioni del 21% e 17% rispettivamente.

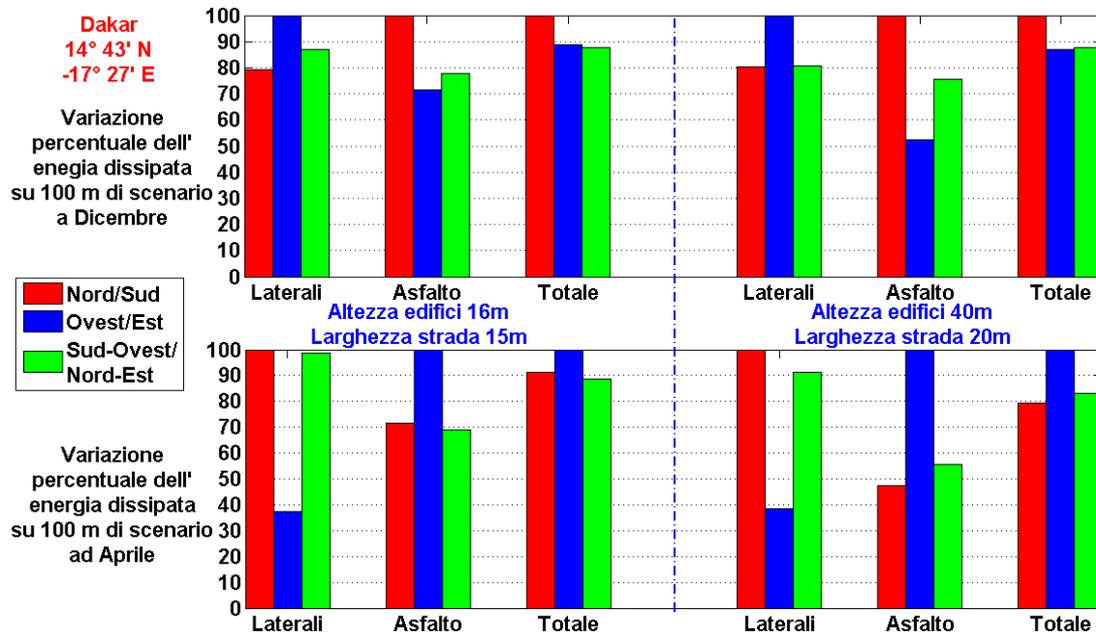


Figura 4.16: Variazione energetica percentuale nel mese di Dicembre e Aprile, in funzione dell'orientazione di 100 metri di street canyon.

In seguito a quanto detto sul clima di questa località, può essere utile analizzare anche il grafico relativo al bilancio energetico annuale (figura 4.17), dato che oltre ad Aprile, tutti gli altri mesi hanno un'insolazione media elevata.

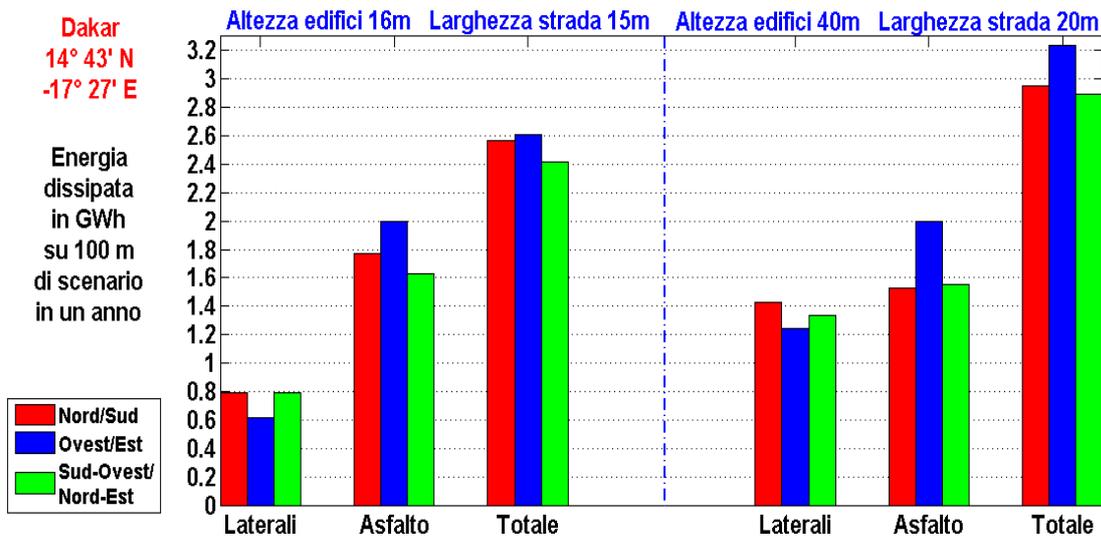
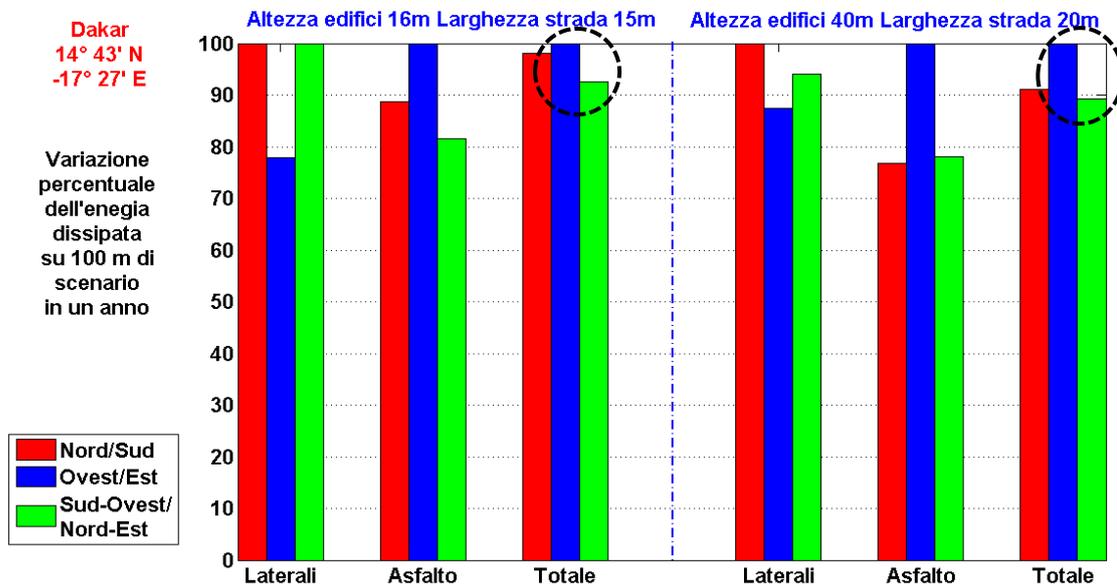


Figura 4.17: energia complessiva annuale dissipata su 100 m di street canyon per le varie orientazioni e tipologie di scenario urbano.

Complessivamente si scopre quindi che la migliore orientazione per gli street canyon urbani a queste latitudini è sempre quella “mista”, ossia Sud-Ovest/Nord-Est (o equivalentemente Sud-Est/Nord-Ovest). Per meglio rappresentare tale risultato, la figura 4.18 mostra le variazioni energetiche percentuali.



**Figura 4.18: Variazione energetica percentuale in funzione dell’orientazione di 100 metri di street canyon.**

Dall’analisi di quest’ultimo risulta un miglioramento (rispetto al caso sempre peggiore Ovest/Est) dell’energia totale dissipata di circa l’8% per scenari urbani e dell’11% per scenari metropolitani (curve nere tratteggiate in figura 4.18).

#### 4.5.2- Analisi con vetrate a specchio.

Ancora una volta si nota (figura 4.19) l’incremento energetico in seguito alla sostituzione dei parametri delle superfici laterali, mentre rimangono quasi completamente invariate le differenze relative energetiche tra le tre orientazioni analizzate in questa tesi, come viene fatto evidenziare dai cerchi di colore nero.

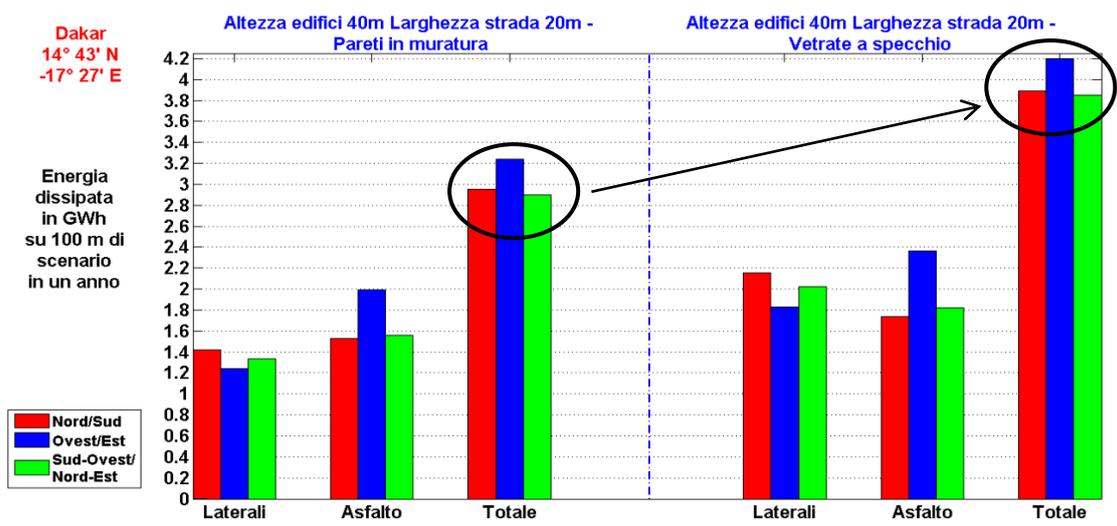


Figura 4.19: Bilancio energetico su 100 metri di street canyon nel confronto pareti/vetrata.

## Conclusioni.

Dal lavoro svolto nell'elaborato, si può intuire come sia innovativo questo approccio di simulazione solare, in quanto ha la capacità di prevedere, oltre ad ostruzioni ed ombreggiamenti, anche le interazioni multiple che la radiazione solare ha con i manufatti, consentendo il calcolo di una porzione di radiazione incidente (e quindi assorbita) assolutamente non trascurabile.

Dai rilevamenti di validazione, condotti in questo studio, si è poi dimostrato il buon comportamento del nuovo simulatore solare basato sul Ray Tracing nell'analisi di intensità solare per semplici scenari urbani. Stando infatti ai risultati ottenuti, la nuova modellizzazione dell'irradiazione introdotta nel programma di simulazione è migliorata rispetto alla precedente. Sebbene si siano evidenziati ancora problemi non risolvibili sull'esatta distribuzione luminosa della volta celeste, il confronto con le misure è stato molto soddisfacente, considerando che tutti i valori di potenza mostrati nei grafici sono espressi in lineare.

Ulteriori modifiche al pre e post-processing del simulatore, hanno inoltre consentito di agevolare l'utente, soprattutto per quanto riguarda il calcolo automatico del path solare in un dato luogo e momento dell'anno, che non deve più essere reperito via internet. Tutto ciò ha concesso di effettuare una moltitudine di simulazioni per stabilire in linea di massima se esiste la possibilità concreta di ridurre l'effetto "isola di calore", andando esclusivamente a modificare le orientazioni topografiche di strade ed edifici in un contesto urbano. Da quanto è emerso nell'elaborato, conviene avere strade orientate obliquamente rispetto ai punti cardinali, perché complessivamente consentono di avere una riduzione dell'energia dissipata totale nello street canyon. La diminuzione della complessità lato utente ha consentito anche di analizzare posizioni geografiche differenti (seppur ancora ristrette al continente europeo e africano a causa della disponibilità ristretta dei dati climatici solari). In questo modo si è scoperto che l'orientazione ottima per le latitudini italiane rimane tale anche avvicinandoci verso l'equatore, con addirittura un incremento degli effetti positivi che tale modello edificativo potrebbe introdurre nel risparmio energetico di un complesso abitativo di nuova costruzione.

Un'ottima caratteristica del lavoro svolto durante questi mesi è la versatilità che tutto questo potrà avere in studi futuri, con la consapevolezza che l'applicazione verrà

successivamente utilizzata, modificata e quindi migliorata dai miei relatori e dai loro prossimi laureandi.

# Appendice A- File di input del Ray Tracing.

## A.1- File solare.

Con lo sviluppo di un nuovo eseguibile di supporto, il passaggio delle informazioni principali da parte dell'utente è stato reso più agevole. Il nuovo file di input richiede, per ogni istante temporale che si vuole tenere in considerazione per la simulazione, solo informazioni strettamente necessarie quali:

- data e ora;
- latitudine e longitudine;
- fuso orario;
- coefficiente di diffusione per quel preciso momento della giornata.

A queste informazioni è possibile aggiungere anche la radiazione globale orizzontale, ovviamente nel caso in cui siano disponibili delle rilevazioni a riguardo, in modo da non dover utilizzare la formula di conversione già vista nel capitolo precedente. Quest'ultima infatti è abbastanza funzionale ma non infallibile, e quindi è certamente consigliabile utilizzarla solo in caso di necessità.

Esempio A.1: particolare di un file solare.

```
# Latitude: value in decimals (positive for Northern hemisphere)
# Longitude: value in decimals (positive for places eastern than
# Greenwich
# Time Zone: int value (add +1 for daylighth saving time)
# An example of possible Time Zone is: +1 (CET: Central Europe Time)
# or +2 (CEST: Central Europe Summer Time)
DAY      3
MONTH    12
YEAR     2012
HOUR     10
MINUTE   0
LATITUDE 44.13
LONGITUDE 12.23
TIME_ZONE 1
Kd       0.19853
```

Quest'ultimo dato deve essere reperito dal database europeo sotto forma di tabella, e rimane sostanzialmente l'unica informazione che l'utente deve ricercare "manualmente", rendendo minore la probabilità di errore umano rispetto al passato, dato che non devono più essere specificati manualmente le altezze e gli azimut solari.

Sarà infatti compito dell'applicazione calcolare la posizione del sole, nonché la potenza da associare ai trasmettitori, generando i soliti file di input necessari al Ray Tracing. Un secondo modo può essere invece l'inserimento manuale dei valori orari del coefficiente di diffusione, ottenuti tramite delle misure apposite di radiazione solare effettuate in spazio aperto.

## A.2- File dello scenario.

### A.2.1- File PLANET.

Come nel caso del classico Ray Tracing Outdoor, è necessario compilare il file PLANET dello scenario, che deve comprendere le coordinate cartesiane nel piano x-y dei vertici del poligono di base degli edifici che lo compongono.

Esempio A.2: file PLANET dello scenario di figura 2.15.

```

1      "CasaPadronale"      5
    -0.291458    0.797917
    4.950078    12.036198
    -9.577819    18.810156
    -14.818053    7.571875
    -0.291458    0.797917

2      "StallaFienile"      5
    31.238424    5.827734
    38.296855    20.962826
    24.334941    27.473893
    17.276795    12.338558
    31.238424    5.827734

3      "EdificioCasella"    5
    14.907044    33.395443
    17.548076    39.059993
    1.496440    46.544857
    -1.155456    40.885677
    14.907044    33.395443

```

Ovviamente è necessario specificare anche l'altezza dei vari edifici e, nel caso di zone collinari o montuose, l'altezza relativa del terreno su cui i palazzi sono edificati, tutte informazioni contenute in due appositi file separati.

Esempio A.3: file delle altezze degli edifici dello scenario di figura 2.15.

```

1      "CasaPadronale"      5.4600
2      "StallaFienile"      7.9000
3      "EdificioCasella"    6.2700

```

## A.2.2- File WallData.

Come già anticipato, è possibile distinguere la natura delle varie pareti che compongono gli edifici, come l'attraversabilità ed il valore di albedo. Tramite lo stesso file è possibile inoltre escludere o meno la parete dal posizionamento dei ricevitori, nel caso in cui non sia interessante conoscerne le caratteristiche di insolazione, al fine di rendere la simulazione più rapida.

Esempio A.4: file walldata dello scenario di figura 2.15.

```
00001      "CasaPadronale"      00006
-1      0.2      1
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.1      0

00002      "StallaFienile"      00006
-1      0.2      1
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.1      0

00003      "EdificioCasella"      00006
-1      0.2      1
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.2      0
0      0.1      0
```

Quando il primo numero (in questo caso un flag) è impostato a “-1”, significa appunto che sulla parete in questione non deve giacere nessun ricevitore. Il secondo valore si riferisce al coefficiente di albedo della parete, mentre il terzo indica la sua penetrabilità.

Un programma apposito si occuperà poi della conversione del formato PLANET in quello 3D, aggiungendo ulteriori informazioni facoltative contenute in un altro file, che si occupa della descrizione accurata, parete per parete, dei vari edifici.

### A.2.3- File SingleWalls.

In questo file vengono elencate eventuali precisazioni dello scenario, come ad esempio finestre, porte o altri tipi di discontinuità. Inoltre è possibile aggiungere pareti singole (da qui il nome singlewalls) che rendono gli edifici più dettagliati, come ad esempio i particolari sulla forma dei tetti.

Esempio A.5: particolare del file singlewalls dello scenario di figura 2.15.

```
01      "BaseTettoCasaPadronale"      05      2      0.27      0      1
0.0000      0.0000      5.4600
5.7476      12.3258      5.4600
-9.8681      19.6075      5.4600
-15.6157      7.2817      5.4600
0.0000      0.0000      5.4600

02      "TettoStallaFienileVolta1"      05      2      0.27      0      1
31.5600      5.0960      7.9000
35.3118      13.1418      11.1100
20.2619      20.1597      11.1100
16.5100      12.1139      7.9000
31.5600      5.0960      7.9000
...

015     "Finestra1_CasaPadronale_Sud_Est" 05      2      0.1      1      0
0.8000      1.5000      5.70000      3.0000      00001      00001

016     "Finestra_Altal_CasaPadronale_Sud_Est" 05      2      0.1      1      0
0.9000      0.8000      0.40000      0.2000      00001      00001
```

Dopo il numero identificativo e il nome dato alla parete singola, deve essere specificato il numero di vertici dell'oggetto, la risoluzione del grigliato di ricezione ("1" per la disabilitazione), l'albedo specifico e due flag, che indicano rispettivamente:

- la natura del manufatto (se è una "nuova" parete oppure una discontinuità di una parete preesistente;
- la penetrabilità dello stesso.

In base al flag sulla tipologia dell'elemento si procede, nel caso di una nuova parete, con la stesura dell'elenco dei vertici che lo compongono, proprio come nel formato PLANET. Se invece si tratta di una discontinuità, basta inserire la coordinata di un unico vertice inferiore, preceduta dall'altezza della finestra, con gli identificativi dell'edificio e della parete di appartenenza.

## A.2.4- File della vegetazione.

In alcuni casi è disponibile anche un file che descrive la presenza di vegetazione all'interno dello scenario. La disponibilità di tali informazioni può essere molto utile perché consente di identificare le aree in cui si ha una minore energia solare assorbita e conseguentemente un minor effetto di "isola di calore". Il file contiene i perimetri delle varie aree verdi, in un formato del tutto simile a quello di un file di descrizione degli edifici.

Esempio A.6: particolare del file della vegetazione dello scenario di figura 2.15.

```
00001      "PratoSinistraCasaPadronale"      0009
-12.516    -0.374
-10.39     4.178
-16.411    6.983
-10.155    20.41
-2.838     17.01
-1.291     20.33
-11.683    25.135
-12.516    -0.374
```

## A.3- File di trasmettitore e ricevitore.

Eseguiti tutti calcoli necessari per ottenere la giusta posizione e potenza da associare ai vari trasmettitori, il passo successivo è la scrittura dei relativi file di input necessari al Ray Tracing. In particolare, vengono redatti in automatico due tipi di file: uno per quanto riguarda il path solare (e quindi la radiazione diretta) e un altro che descrive la volta celeste (e quindi la radiazione diffusa). Infatti la simulazione solare è in realtà l'unione di due elaborazioni distinte, i cui risultati generati vengono uniti per ottenere il valore di radiazione globale.

Di seguito si mostra un esempio per ognuno dei due tipi di file.

Esempio A.7: particolare del file di trasmettitore di radiazione diretta del 3 Dicembre.

```
#Clock Time:      10:0
Position:      47066.1 -82459.1      31267.5
Power:         140.403 dBW
Frequency:     2.154e+009 Hz
Radiation File: INPUT/antenne/antenna_ISOTROPA.ant
Angle 1:      0
Angle 2:      0
Angle 3:      0
```

Esempio A.8: particolare del file di trasmettitore di radiazione diffusa.

```
Position: 98588.1 107.303 17364.8
Power: 100 dBW
Frequency: 2.154e+009 Hz
Radiation File: INPUT/antenne/antenna_ISOTROPA.ant
Angle 1: 0
Angle 2: 0
Angle 3: 0
```

Bisogna però precisare il fatto che nei trasmettitori adibiti alla radiazione diffusa si è scelto di non specificare sin da subito la giusta potenza di trasmissione. Infatti, a causa della staticità di questi, sarebbe inutile e anche molto costoso dal punto di vista computazionale effettuare una simulazione per ogni istante di tempo preso in considerazione. Quindi si è scelto di far eseguire un unico calcolo per ogni giornata in esame, con una potenza simbolica di 100 dBW; tale valore verrà poi “sostituito” in post-processing, in modo da ottenere la giusta radiazione diffusa in ogni momento della giornata.

Il file relativo alla descrizione dei ricevitori è rimasto invariato nel formato tipico del simulatore a raggi, proprio come per il trasmettitore. In entrambi i file non sono per il momento state effettuate modifiche sostanziali alle informazioni contenute, anche se in questo caso le voci relative alla frequenza di funzionamento e all'angolo di polarizzazione rispetto ai tre assi cartesiani, perdono di significato dato che i raggi solari non possiedono né polarizzazione né frequenza ben definita.

## A.4- File delle tipologie di elementi.

Per consentire la compatibilità all'indietro con il simulatore (che ricordiamo essere basato su simulazioni indoor), dopo aver stilato tutti i file di descrizione dello scenario, in automatico viene generato un riassunto con l'elenco delle varie tipologie di muratura, buchi, porte e finestre, e le loro caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche quali:

- lo spessore;
- la permittività relativa  $\epsilon_r$  e la conducibilità  $\sigma$  ( espressa in Siemens/m);
- se la tipologia è attraversabile o meno dai raggi ottici;
- se l'oggetto in questione sia in grado di riflettere il raggio da entrambe le sue superfici.

### Esempio A.9: file degli elementi.

;tipo	eps	sigma	thick	bilat	attravers
"floor"	4.9998	0.0	0.0	.false.	.false.
"roof"	4.9998	0.0	0.0	.false.	.false.
"wall"	4.9998	0.0	0.0	.false.	.false.
"asphalt"	3.7054	0.0	0.0	.false.	.false.

Ovviamente l'inserimento di queste ultime due tipologie di input dovrà essere sempre associata ad una condizione falsa, dato che ci stiamo riferendo ad una simulazione solare di tipo outdoor. Un eventuale errore in questo caso non compromette i risultati della simulazione ma ne può causare un sensibile rallentamento nell'esecuzione.

## A.5- File dei parametri ausiliari.

In questo file vengono elencati tutti i parametri ausiliari, i flag di pilotaggio e le varie opzioni che l'applicazione rende disponibili.

In particolare, fornisce molte opzioni sul controllo dello scattering, tra cui:

- abilitazione dello scattering coerente (ovvero si può scegliere se eseguire la somma delle potenze trasportate considerando o meno le interferenze costruttive e distruttive causate dalle loro differenti fasi);
- abilitazione dello scattering lato trasmettitore o lato ricevitore (è possibile infatti una sola interazione di questo tipo, con l'utilizzo del modello distribuito);
- discretizzazione delle coordinate  $\theta - \varphi$  nel calcolo dei punti di scattering;
- considerazione o scarto dei raggi che subiscono sia scattering, sia riflessione (o diffrazione);
- scelta del tipo di modello di scattering diffuso che si vuole adottare e tutti i relativi valori parametrici sul controllo della quantità di potenza incidente che viene ridistribuita per diffusione.

Non mancano ovviamente i parametri di controllo sul numero massimo di interazioni possibili.



## Bibliografia

- [1] Fonte wikipedia.org: [http://it.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_spectrum\\_ita.svg](http://it.wikipedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_ita.svg)
- [2] Fonte eniscuola.net: <http://www.eniscuola.net/it/energia/contenuti/conoscere-lenergia/grafici-e-tabelle/>
- [3] Kasten F, Young AT, “Revised optical air mass tables and approximation formula”, 1989, Applied Optics (Internet).
- [4] ASHRAE handbook: HVAC applications. Atlanta (GA): ASHRAE, 1999.
- [5] Joint Research Center, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [6] M. Iqbal, “An Introduction to Solar Radiation” (pag. 257), 1983, Academic Press, University of California.
- [7] Prof. Ing. Vittorio Degli Esposti, “Radiazione solare ed efficienza energetica in ambiente urbano II”, Corso Professionale ITFS, AA 2011-2012.
- [8] Fonte Sustainable By Design: <http://www.susdesign.com/solpath/index.php>



# Ringraziamenti

*Desidero ringraziare di cuore i miei docenti Prof. Ing. Vittorio Degli Esposti e Dott. Ing. Enrico Vitucci che, con la loro enorme disponibilità, hanno seguito questo mio elaborato, dandomi consigli importanti per lo svolgimento della tesi.*

*Un grazie anche a Mauro Zanuccoli che mi ha fornito consigli utili sull'uso corretto della lampada solare e sul solarimetro.*

*Un particolare ringraziamento vorrei farlo inoltre anche ai miei familiari che, insieme ai miei migliori amici, sono stati presenti in ogni momento di questo mio lungo e difficile percorso.*