





UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELLA INFORMAZIONE  
ELETTRONICA, INFORMATICA, TELECOMUNICAZIONI


<i>Progetto di riferimento</i> <b>Progetto EMvironment</b>		<i>Documento emesso da</i> 
<i>Numero documento</i> <b>UNIP_MRL/CEI/13_03_002</b>	<i>Tipo di documento</i> <b>Rapporto Tecnico Interno - RTI</b>	<i>Classificazione</i> <b>Non classificato</b>
<i>Attività/Task di riferimento</i> <b>--</b>	<i>Lotto contrattuale</i> <b>--</b>	<i>Destinatario</i> <b>--</b>
<i>Versione</i> <b>Ver. 00</b>	<i>Numero di pagine</i> <b>53</b>	<i>Data di emissione</i> <b>28/03/2013</b>

## CERTIFICAZIONE DELLA CONFORMITÀ DEL SOFTWARE *EMVIRONMENT* ALLA NORMA CEI 211-10

	<i>Ente</i>	<i>Contatto</i>
<b>Ing. Alessandro Corucci</b>	<b>MRL - Università di Pisa</b>	<b>alessandro.corucci@iet.unipi.it</b>
<b>Ing. Pierpaolo Usai</b>	<b>MRL - Università di Pisa</b>	<b>pierpaolo.usai@iet.unipi.it</b>
<b>Prof. Ing. Agostino Monorchio</b>	<b>MRL - Università di Pisa</b>	<b>a.monorchio@iet.unipi.it</b>
<i>Data</i> 28/03/2013	<i>Firma</i>	


 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIP_L_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

<b>Indice delle revisioni</b>			
<i>Revisione n.</i>	<i>Revisionato da</i>	<i>Motivazione</i>	<i>Data revisione</i>
00	Ing. A. Corucci, Ing. P. Usai	Prima Stesura	28/03/2013


 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> <i>UNIFI_MRL/CEI/13_03_002</i>	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## INDICE

Indice.....	3
Scopo.....	5
Lista degli acronimi .....	5
Documenti di riferimento.....	5
Introduzione .....	7
1 Descrizione software <i>EMvironment</i> .....	9
1.1 Scopo di EMvironment .....	9
1.2 Descrizione algoritmi di calcolo .....	10
1.3 Trattamento dei dati territoriali .....	14
1.4 Database dei materiali .....	15
1.5 Visualizzazione dei risultati .....	15
1.6 Lavori svolti mediante il software EMvironment .....	16
2 Norma CEI 211-10: metodi di calcolo e requisiti dei software previsionali .....	17
2.1 Calcolo dei livelli di campo EM in spazio libero - formulazione di campo lontano .....	17
2.1.1 EMvironment .....	18
2.2 Calcolo dei livelli di campo con più sorgenti .....	18
2.2.1 EMvironment .....	19
2.3 Calcolo del campo su sezioni definite.....	21
2.3.1 EMvironment .....	21
2.4 Calcolo del volume di rispetto .....	23
2.4.1 EMvironment .....	23
2.5 Calcolo del volume di rispetto con più sorgenti .....	24
2.5.1 EMvironment .....	24
2.6 Calcolo dei livelli di campo EM in spazio libero - formulazione di campo vicino .....	25
2.6.1 EMvironment .....	25
2.7 Calcolo dei livelli di campo EM con tecniche raggistiche.....	26
2.7.1 EMvironment .....	27
2.8 Data base territoriali.....	28

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

2.8.1 EMvironment .....	29
2.9 Affidabilità degli algoritmi di calcolo e dell'implementazione.....	30
2.9.1 EMvironment .....	31
2.10 Elementi fondamentali dei software di simulazione .....	31
2.10.1 EMvironment .....	32
2.11 Algoritmo di calcolo .....	33
2.11.1 EMvironment .....	34
2.12 Gestione dei dati di ingresso .....	34
2.12.1 EMvironment .....	34
2.13 Rappresentazione grafica dei risultati .....	35
2.13.1 EMvironment .....	36
2.14 Commenti.....	36
3 Validazione dei risultati del software <i>EMvironment</i> .....	37
3.1 Confronti con risultati presenti in letteratura .....	37
3.1.1 Calcolo dei coefficienti di riflessione e di trasmissione.....	37
3.1.2 Calcolo della potenza ricevuta .....	40
3.1.3 Calcolo campo in zona di campo vicino .....	41
3.2 Confronti con misure .....	42
3.2.1 Camera schermata .....	43
3.2.2 Camera semi-anecoica .....	43
3.3 Confronti con misure outdoor .....	46
3.3.1 Confronto con misure a banda larga .....	46
3.3.2 Confronto con misure a banda stretta.....	47
3.4 Confronti con misure di parametri derivati dal campo em .....	48
3.4.1 Power Delay Profile .....	48
3.4.2 Spreading Function (Monaco).....	50
Conclusioni .....	51
Bibliografia .....	52

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> <i>UNIFI_MRL/CEI/13_03_002</i>	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## SCOPO


Lo scopo del presente documento è quello di certificare che il software previsionale *EMvironment* è stato sviluppato in conformità con la norma CEI 211-10 e risulta, pertanto, uno strumento idoneo al calcolo dei livelli di campo elettromagnetico in ambienti complessi.

## LISTA DEGLI ACRONIMI


CEI: *Comitato Elettrotecnico Italiano*  
 DEM: *Digital Elevation Model*  
 DXF: *Drawing Interchange Format*  
 E.M., e.m.: *Elettromagnetici*  
 EMv: *EMvironment*  
 GO: *Geometrical Optics*  
 GTD: *Geometrical Theory of Diffraction*  
 IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineering*  
 MRL: *Microwave and Radiation Laboratory*  
 PDP: *Power Delay Profile*  
 SRB: *Stazione Radio Base*  
 SF: *Spreading Function*  
 UTD: *Uniform Theory of Diffraction*

## DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- D1. Norma CEI 211-10, Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi magnetici in alta frequenza, 2002-04.
- D2. Norma CEI 211-10;V1, Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi magnetici in alta frequenza. Appendice G: valutazione dei software di calcolo previsionale dei livelli di campo elettromagnetico, 2004-01.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> <i>UNIFI_MRL/CEI/13_03_002</i>	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

- D3. Manuale Utente *EMvironment 3.1*, MRL 14/04/2012.
- D4. RT9 - Metodologia di validazione: confronto tra i risultati delle misure e la valutazione teorica, Progetto MEMPIS, 2009.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPi_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato


## INTRODUZIONE

Il software *EMvironment* è stato sviluppato presso il laboratorio di Microonde e Antenne (MRL - Microwave Radiation Laboratory) del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa. Fra i vari ambiti di utilizzo del software *EMvironment*, in questo documento, si farà riferimento a quello relativo alla previsione dei livelli di campo elettromagnetico emessi da stazioni radio base (SRB).

La norma CEI 211-10 "Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi magnetici in alta frequenza" [D1], ha come scopo quello di indicare i criteri che devono essere seguiti affinché una stazione radio base sia realizzata in modo da rispettare i limiti e gli obiettivi richiesti dalla legislazione italiana per l'esposizione dei cittadini ai campi elettromagnetici in alta frequenza [1]. Per questo scopo, la norma fornisce la procedura per verificare la conformità di una SRB alle leggi che tutelano la salute delle persone esposte ai campi elettromagnetici. Nella sua essenza, la procedura consiste nell'effettuare il confronto tra i valori di campo elettrico *calcolati* o misurati nelle aree accessibili alla popolazione ed il valore limite, imposto dalla legge. Per quanto riguarda i valori di campo elettrico calcolati, la norma fornisce, nel Cap. 6, le indicazioni tecniche necessarie e i metodi di calcolo per l'analisi previsionale numerica dei livelli di campo elettromagnetico irradiati da una SRB. I software previsionali, commerciali e non, per effettuare la valutazione dei livelli di campo elettromagnetico emessi, sia da impianti già esistenti che da impianti di futura installazione, devono quindi:


- implementare i metodi di calcolo illustrati nella norma;
- possedere le caratteristiche e le prestazioni minime, definite nell'Appendice G della stessa norma [D2], per poter essere dichiarati idonei ad eseguire il calcolo dei valori di campo elettromagnetico.

Per quanto detto sopra, il presente documento si prefigge lo scopo di certificare che il software previsionale *EMvironment* è conforme alla norma CEI 211-10, in quanto dispone dei metodi di calcolo definiti in tale norma e possiede i requisiti prestazionali indicati nella Appendice G della medesima norma.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

Il documento è organizzato come descritto nel seguito. Nel Capitolo 1 vengono illustrate le principali caratteristiche del software *EMvironment* con particolare riferimento al suo ambito di utilizzo e all'algoritmo di calcolo implementato. Nel Capitolo 2 si riportano le metodologie di calcolo del campo elettromagnetico indicate nella norma CEI 211-10 e i requisiti dei software previsionali indicati nella Appendice G. Per ognuna delle suddette indicazioni si riporta anche la rispettiva caratteristica implementata e/o disponibile nel software *EMvironment*. Pertanto, grazie a questo confronto fra le indicazioni normative e le caratteristiche di *EMvironment*, risulterà evidente come tale software sia conforme alla norma CEI 211-10 e quindi idoneo ad eseguire il calcolo dei valori di campo elettromagnetico. Nel Capitolo 3, inoltre, viene riportata un'ampia serie di confronti fra i risultati prodotti dal software *EMvironment* e quelli presenti nella letteratura scientifica o acquisiti tramite campagne di misura, che dimostra l'accuratezza e l'affidabilità delle previsioni dei livelli di campo elettromagnetico forniti dallo stesso software. Infine, nelle Conclusioni, si riassumono le principali considerazioni riportate nel documento.



 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPi_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## 1 DESCRIZIONE SOFTWARE *EMvironment*

Il software *EMvironment* è stato sviluppato presso il laboratorio di Microonde e Antenne (MRL - *Microwave Radiation Laboratory*) del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa. La versione attuale del software è il risultato del lavoro e dell'esperienza che gli ingegneri del gruppo di ricerca dell'MRL hanno maturato in oltre dieci anni nel settore dell'elettromagnetismo applicato.


### 1.1 *Scopo di EMvironment*

*EMvironment* è un software che consente l'analisi della propagazione del segnale elettromagnetico in ambienti complessi sia outdoor che indoor. Esso risulta pertanto un software previsionale utilizzabile in diversi ambiti applicativi quali:

- la verifica del rispetto delle normative vigenti in termini di compatibilità elettromagnetica e di esposizione della popolazione e dei lavoratori;
- la pianificazione delle reti cellulari o, più in generale, delle reti wireless;
- la stima dei parametri caratterizzanti il canale radiomobile.

In questo documento l'attenzione sarà rivolta principalmente all'utilizzo di *EMvironment* come software per la previsione dei livelli di campo elettromagnetico ai fini della valutazione dell'esposizione della popolazione secondo la normativa vigente. Sebbene il software sia in grado di valutare il campo emesso da numerosi tipi antenne, si farà particolare riferimento alle antenne tipicamente utilizzate nelle stazioni radio base (SRB) per telefonia mobile.

L'utente di *EMvironment* può inserire i dati necessari ad una completa ed esaustiva ricostruzione dello scenario sotto esame, nonché i dati relativi alle sorgenti di campo elettromagnetico da considerare nella simulazione e le informazioni necessarie per impostare i punti in cui si desidera calcolare il valore del campo elettromagnetico. Per l'inserimento di tali dati l'utente dispone di interfacce grafiche user friendly (GUI - *Graphical User Interface*) specifiche per il tipo di dato. Ad esempio, sono presenti GUI dedicate all'inserimento e alla caratterizzazione degli ostacoli, delle antenne e dei punti in cui calcolare il campo, nonché quelle dedicate alla visualizzazione dei risultati.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato


## 1.2 Descrizione algoritmi di calcolo

Per studiare la propagazione dell'onda elettromagnetica in scenari complessi, il software *EMvironment* applica le tecniche asintotiche ad alta frequenza, derivanti dalla *Geometrical Optics* (GO), dalla *Geometrical Theory of Diffraction* (GTD) e dalla sua estensione uniforme *Uniform Theory of Diffraction* (UTD) [1][2]. Infatti, ad alta frequenza, è lecito ricorrere al concetto di raggio per tracciare i percorsi che l'onda elettromagnetica effettua dall'antenna trasmittente all'antenna ricevente e per calcolarne l'attenuazione subita interagendo con gli ostacoli dello scenario. Tali metodi di analisi sono implementati in *EMvironment* mediante un algoritmo di *ray-tracing* tridimensionale (3D) deterministico inverso, il quale è capace di ricostruire i percorsi che i raggi effettuano dalla sorgente al punto ricevente. Tali percorsi sono dovuti ai fenomeni di riflessione speculare sulle superfici piane che compongono gli ostacoli, di diffrazione dagli spigoli a comune fra due superfici e di trasmissione attraverso le pareti [3].

La Figura 1.1 mostra un semplice scenario outdoor in cui il segnale emesso dalla sorgente *S* raggiunge il punto di osservazione *O* attraverso vari raggi: si possono distinguere il raggio diretto "Dir", i raggi riflessi "R" dal suolo e dalle superfici (muri) degli edifici e il raggio diffratto "D" dallo spigolo comune a due superfici. Questi raggi costituiscono i contributi di ordine uno (contributi elementari). In generale il punto di osservazione *O* può essere raggiunto anche dai raggi trasmessi "T" attraverso le pareti e dai raggi di ordine superiore costituiti dalle combinazioni dei contributi di ordine uno come ad esempio "RR", "RD", "DR", "TR", "RRR", "RDR", ecc.. Il tracciamento dei raggi che congiungono *S* ed *O* è un processo geometrico chiamato *ray-tracing*, mentre il campo elettrico totale  $E_{Tot}$  in *O* è dato dalla somma dei campi elettrici  $E_n$  associati ai singoli raggi secondo la seguente

$$E_{Tot} = \sum_{n=1}^N E_n \quad (1.1)$$

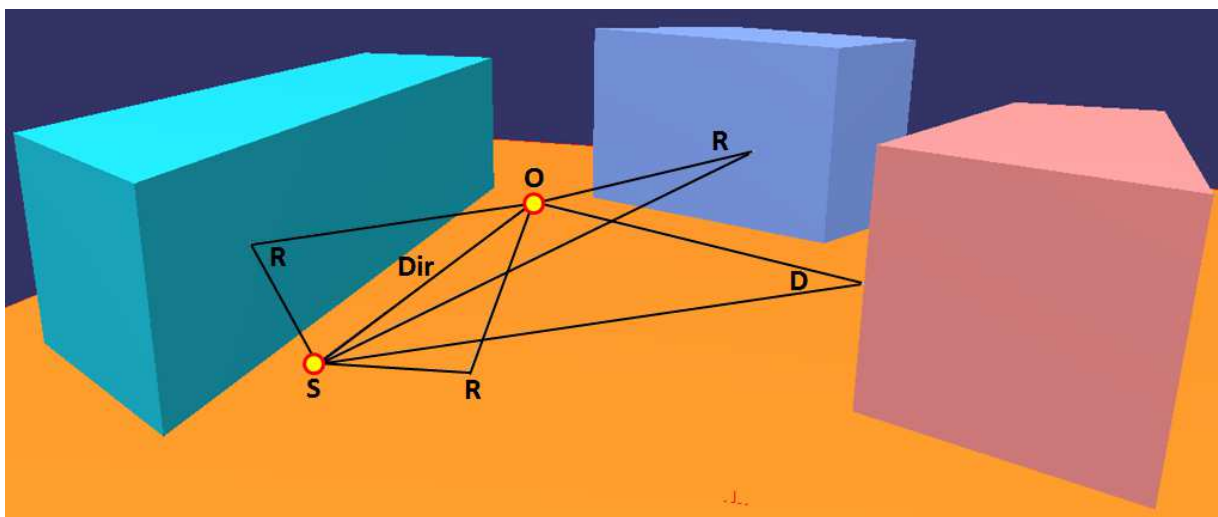
dove  $N$  è il numero dei raggi. Nella precedente formula il campo totale è dato dalla somma vettoriale dei campi associati ai singoli raggi. Questo aspetto è molto importante ai fini di una corretta stima del campo in ambienti realistici. Infatti può risultare che in alcuni punti i campi dei singoli raggi si sommino in fase (costruttivamente), mentre in altri in controfase (distruttivamente), producendo, rispettivamente, un campo sensibilmente più alto o più basso di quello ottenibile effettuando una semplice media nel medesimo punto. Tale caratteristica consente di evidenziare le aree dell'ambiente soggette a maggiore esposizione. Un'altra

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

importante caratteristica di *EMvironment* consiste nel poter considerare un numero arbitrario di antenne contemporaneamente attive nello scenario di analisi. Per ognuna di esse viene valutato il campo mediante la (1.1) e, successivamente, viene calcolato il campo totale mediante la seguente

$$E_{Tot,M} = \sqrt{\sum_{i=1}^M |E_{Tot,i}|^2} \quad (1.2)$$

nella quale  $M$  è il numero di antenne presenti nello scenario. In questo modo è possibile valutare il campo elettromagnetico in situazioni reali dove, quasi sempre, i livelli di campo in un punto sono dovuti alla presenza di diverse sorgenti (diversi gestori telefonici, diversi servizi, ecc.) attive contemporaneamente.

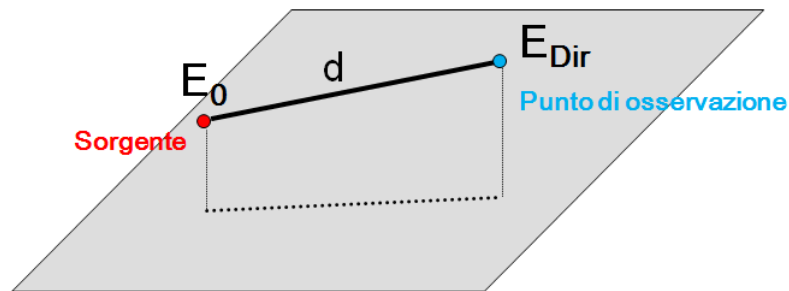


**Figura 1.1 - Esempio di visualizzazione dei raggi in un semplice scenario outdoor nel software *EMvironment*.**

Il campo elettrico associato al raggio diretto  $E_{Dir}$  è valutato come

$$E_{Dir} = E_0 \frac{e^{-jkd}}{d} \quad (1.3)$$

dove  $E_0$  è il campo nel punto sorgente,  $k = 2\pi/\lambda$  è la costante di propagazione,  $\lambda$  la lunghezza d'onda e  $d$  è la distanza sorgente-punto di osservazione, come mostrato in Figura 1.2.

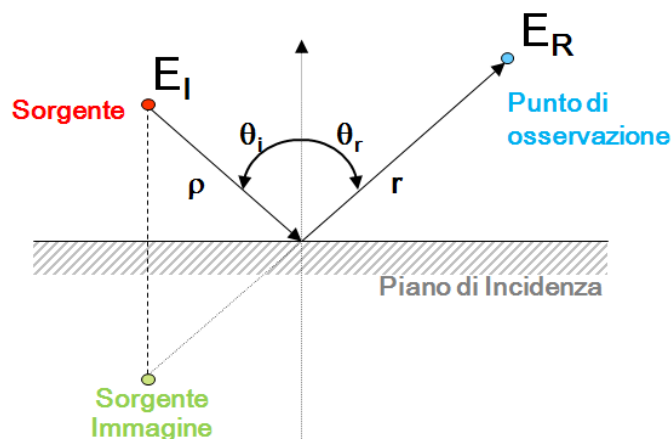


**Figura 1.2 - Valutazione del campo elettrico del raggio diretto.**

Il campo elettrico associato ad un raggio singolarmente riflesso è dato da

$$E_R = E_I \cdot R \frac{e^{-jk(\rho + r)}}{(\rho + r)} \quad (1.4)$$

dove  $E_I$  è il campo nel punto sorgente,  $R$  la matrice dei coefficienti di riflessione di Fresnel,  $\rho$  e  $r$  sono le distanze, rispettivamente, sorgente-punto di riflessione e punto di riflessione-punto di osservazione, come mostrato in Figura 1.3. La valutazione del contributo riflesso è valutato usando il metodo delle immagini [3][4].




**Figura 1.3 - Valutazione del campo elettrico del raggio riflesso.**

La matrice dei coefficienti di riflessione di Fresnel è data da

$$R = \begin{bmatrix} R_{\parallel} & 0 \\ 0 & R_{\perp} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

nella quale  $R_{\parallel}$  e  $R_{\perp}$  sono dati da

	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

$$R_{\parallel} = \frac{\varepsilon \cos \vartheta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \vartheta_i}}{\varepsilon \cos \vartheta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \vartheta_i}}, \quad (1.6)$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos \vartheta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \vartheta_i}}{\cos \vartheta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \vartheta_i}}. \quad (1.7)$$

Nelle (1.6) e (1.7)  $\varepsilon$  indica la costante dielettrica complessa del materiale riflettente definita come

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (1.8)$$

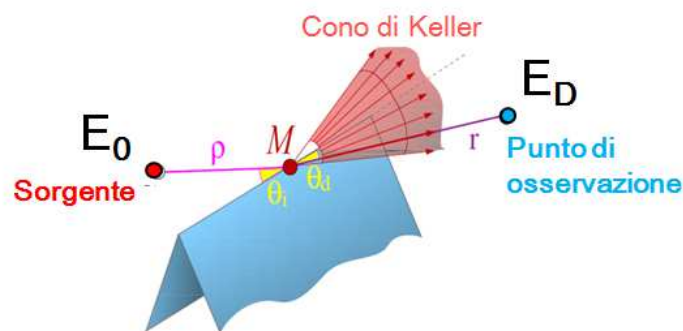
dove  $\varepsilon_r$  e  $\sigma$  sono rispettivamente la costante dielettrica relativa e la conducibilit  elettrica (misurata in S/m) del materiale,  $\varepsilon_0$    la costante dielettrica del vuoto pari a  $8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m e  $f$    la frequenza del campo elettrico incidente.

Il campo elettrico associato ad un raggio trasmesso   dato da una espressione analoga alla (1.4) dove la matrice  $R$  dei coefficienti di riflessione   sostituita dalla matrice  $T$  dei coefficienti di trasmissione [1][D3].


Il campo elettrico associato al raggio singolarmente diffratto   dato da [1][2]

$$E_D = \frac{E_0}{r} \cdot D \sqrt{\frac{\rho}{\rho + r}} e^{-j k (\rho + r)} \quad (1.9)$$

dove  $E_0$    il campo nel punto sorgente,  $D$  la matrice dei coefficienti di diffrazione (dipendente dall'angolo di incidenza del raggio sullo spigolo e anche dalle matrici dei coefficienti di riflessione definite sulle due facce che formano lo spigolo),  $\rho$  e  $r$  sono le distanze, rispettivamente, sorgente-punto di diffrazione e punto di diffrazione-punto di osservazione, come mostrato in Figura 1.4.



**Figura 1.4 - Valutazione del campo elettrico del raggio diffratto.**

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

Le (1.3), (1.4) e (1.9) consentono di valutare i campi elettrici associati ai contributi del primo ordine. In generale, il campo elettrico totale in un punto è dato dalla somma, secondo la (1.1), di questi contributi e di quelli di ordine superiore. Si vuole sottolineare l'importanza del contributo di diffrazione al campo totale: tale contributo, infatti, consente di calcolare il campo anche nelle zone d'ombra, cioè in quei punti dove la presenza di ostacoli impedisce sia al raggio diretto che al raggio riflesso di arrivare.

L'algoritmo di ray tracing implementato in *EMvironment* è ottimizzato attraverso alcune tecniche di accelerazione al fine di snellire le procedure geometriche di ricerca dei raggi, sia in fase di tracciamento dei percorsi che in fase di verifica di esistenza della tratta (shadowing test). Inoltre è implementata nell'algoritmo la tecnica dello *Space Volumetric Partitioning* (SVP) che permette di ridurre il numero degli shadowing test partendo dalla suddivisione dello scenario in celle rettangolari denominate *voxels* [4][5].

### **1.3 Trattamento dei dati territoriali**

Per costruire ambienti complessi di grandi dimensioni, il software *EMvironment* è dotato dei seguenti due sistemi per l'importazione di informazioni cartografiche digitali:

1) Importazione di file DXF (*Drawing Interchange Format* o *Drawing Exchange Format*).

Il software *EMvironment* permette l'importazione automatica delle planimetrie degli edifici in formato digitale DXF (DXF di AutoCAD R12/LT2<sup>®</sup>). Si fa notare che la versione futura di *EMvironment*, in fase di implementazione al momento della scrittura del presente documento, consentirà anche l'importazione automatica di file *shape*.

2) Importazione di file DEM (*Digital Elevation Model*).

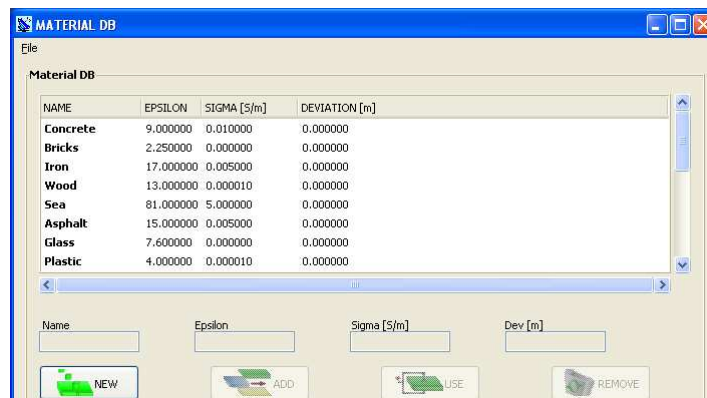
Il software *EMviroment* permette di creare un terreno partendo da un file DEM. Un file DEM è una rappresentazione digitale dell'orografia del terreno. Il software è compatibile con file *grid*. Un file *grid* è un grigliato quadrato di punti a ciascuno dei quali è associata la quota sul livello del mare. *EMvironment* trasforma l'informazione raster in un insieme di superfici triangolari, in accordo con le impostazioni definite dall'utente.

## 1.4 Database dei materiali

Per calcolare il campo elettrico associato ai raggi riflessi, trasmessi e diffratti, secondo le espressioni fornite nel paragrafo 1.2, è necessario conoscere le proprietà dielettriche dei materiali di cui sono costituite le superfici in cui sono scomposti gli ostacoli e il terreno. Per questo motivo il software *EMvironment* dispone di un data base dei materiali per ognuno dei quali contiene (Figura 1.5):

- la costante dielettrica relativa;
- la conducibilità elettrica;
- la rugosità.

Il database contiene una lista di materiali di cui, generalmente, sono costituiti gli oggetti dello scenario in esame. Le proprietà dielettriche di questi materiali sono impostate con valori tipici noti dalla letteratura scientifica [1]. Si mette in evidenza che il database può essere aggiornato e modificato dall'utente per definire le caratteristiche dei materiali prima di effettuare la simulazione.




NAME	EPSILON	SIGMA [S/m]	DEVIATION [m]
Concrete	9.000000	0.010000	0.000000
Bricks	2.250000	0.000000	0.000000
Iron	17.000000	0.005000	0.000000
Wood	13.000000	0.000010	0.000000
Sea	81.000000	5.000000	0.000000
Asphalt	15.000000	0.005000	0.000000
Glass	7.600000	0.000000	0.000000
Plastic	4.000000	0.000010	0.000000

**Figura 1.5 - Data base dei materiali presente nel software *EMvironment*.**

## 1.5 Visualizzazione dei risultati

Il software *EMvironment* permette di calcolare il campo elettromagnetico in punti posizionati arbitrariamente dall'utente all'interno dello scenario di analisi. In particolare i punti possono essere posti:

- 1) in posizioni singole;
- 2) lungo linee;

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

- 3) su griglie orientate arbitrariamente;
- 4) su griglie che seguono l'orografia del terreno ad una quota arbitraria;
- 5) su superfici sferiche;
- 6) su volumi.

Nei casi 2 ÷ 6 il passo di campionamento dei punti è impostabile arbitrariamente. La visualizzazione dei risultati di simulazione è direttamente presentata nel software *EMvironment* mediante opportune interfacce grafiche. Di particolare interesse ai fini del presente documento sono:


- la visualizzazione del campo mediante curve isolivello tracciate in corrispondenza di un valore arbitrario;
- la visualizzazione della distribuzione spaziale del campo mediante mappe a colori;
- la visualizzazione del campo mediante volumi di rispetto ottenuti con il tracciamento di iso-superfici in corrispondenza di particolari valori di campo.

### ***1.6 Lavori svolti mediante il software EMvironment***

Il Gruppo di Ricerca in Elettromagnetismo Applicato del Laboratorio di Microonde e Antenne (MRL) del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa ha da tempo sviluppato una vasta esperienza relativa all'analisi della propagazione del segnale elettromagnetico in ambienti complessi realistici; si citano in particolare le seguenti significative esperienze nelle quali è stato fatto ampio uso del software *EMvironment*:

- piano di monitoraggio e studio della copertura per il Comune di Viareggio con stesura del regolamento comunale (anno 2001).
- coordinamento scientifico del progetto regionale A.P.I.C.E (Analisi della Popolazione Investita dai Campi Elettromagnetici), che ha coinvolto il Comune di Pisa e il Comune di Scandicci ([www.progettoapice.it](http://www.progettoapice.it)) (anno 2010-2012).
- coordinamento scientifico del progetto M.E.M.P.I.S (Monitoraggio dei Campi Elettromagnetici del Poligono Interforze del Salto di Quirra) relativo al monitoraggio e alla valutazione dell'inquinamento elettromagnetico del Poligono Interforze del Salto di Quirra, Sardegna (anno 2009).



 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## 2 NORMA CEI 211-10: METODI DI CALCOLO E REQUISITI DEI SOFTWARE PREVISIONALI

Nel presente capitolo si riportano le metodologie di calcolo del campo elettromagnetico indicate nella norma CEI 211-10 [D1] e i requisiti dei software previsionali indicati nella Appendice G [D2]. Per ognuna delle suddette indicazioni si riporta anche la rispettiva caratteristica implementata e/o disponibile nel software *EMvironment*.

### 2.1 Calcolo dei livelli di campo EM in spazio libero - formulazione di campo lontano

Il metodo di calcolo dei livelli di campo elettromagnetico in spazio libero mediante la formulazione di campo lontano, è il metodo più semplice che possa essere implementato ed il primo ad essere indicato dalla norma CEI 211-10. La sua semplicità deriva essenzialmente dai seguenti aspetti.


1. In campo lontano, cioè ad una distanza dall'antenna maggiore o uguale a  $2D^2/\lambda$  dove  $D$  è la dimensione maggiore dell'antenna e  $\lambda$  la lunghezza d'onda del segnale trasmesso, il campo elettrico  $E$  e il campo magnetico  $H$  risultano ortogonali tra loro e sono ricavabili l'uno dall'altro dalla seguente relazione

$$H = E / Z_0 \quad (2.1)$$

dove  $Z_0$  è l'impedenza caratteristica del vuoto pari a  $376.7\Omega$ . Indicato con  $P(r, \theta, \varphi)$  il generico punto dello spazio a distanza  $r$  dall'antenna nella direzione individuata dai due angoli  $\theta$  e  $\varphi$ , il modulo del campo elettrico in  $P(r, \theta, \varphi)$  è dato da

$$E(P) = \frac{\sqrt{30P_r G(\theta, \varphi)}}{r} \quad (2.2)$$

dove  $P_r$  è la potenza irradiata dall'antenna e  $G(\theta, \varphi)$  è la funzione guadagno dell'antenna. Quindi per calcolare il campo elettrico è sufficiente conoscere la distanza fra antenna e punto di osservazione, la potenza irradiata, generalmente fornita dal gestore dell'impianto,

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Uschi, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

e la funzione guadagno che può essere nota matematicamente, nel caso delle antenne più semplici, oppure direttamente fornita dai costruttori delle antenne.

2. In spazio libero si trascurano le riflessioni da parte del terreno, di infrastrutture e di altri oggetti presenti nell'ambiente e l'effetto della vegetazione.

### 2.1.1 EMvironment

Il calcolo del campo elettromagnetico in spazio libero con la formulazione di campo lontano, può essere effettuato in *EMvironment* limitando la ricerca dei raggi al solo raggio diretto. Il modulo del campo elettrico, associato al raggio diretto, calcolabile mediante la (1.3) è equivalente a quello fornito dalla (2.2). Infatti la costante  $E_0$  nella (1.3) equivale al numeratore della (2.2), ovvero

$$E_0 = \sqrt{30P_r G(\theta, \varphi)}. \quad (2.3)$$

*EMvironment* determina la costante  $E_0$  una volta nota la direzione del raggio (corrispondente al versore direzione individuato dagli angoli  $\theta$  e  $\varphi$ ), la potenza irradiata dall'antenna e la funzione guadagno. Quest'ultima è direttamente implementata nell'algoritmo di calcolo del campo nel caso di antenne elementari (dipoli, loop, ecc.), oppure è fornita come input all'algoritmo mediante file di testo ricavati dai dati forniti dal costruttore dell'antenna. In particolare i file contengono le funzioni guadagno  $G_V$  e  $G_H$  sui piani principali (verticale e orizzontale) contenenti la direzione di massima irradiazione dell'antenna. Infatti risulta

$$G(\theta, \varphi) = G_M G_V(\theta) G_H(\varphi) \quad (2.4)$$

dove  $G_M$  è il guadagno massimo dell'antenna, fornito dal costruttore, e  $G_V$  e  $G_H$  si intendono funzioni normalizzate.

## 2.2 Calcolo dei livelli di campo con più sorgenti

La norma mette in evidenza che, nella grande maggioranza delle installazioni, si è in presenza di più antenne trasmettenti che, operando su sistemi diversi, coprono radioelettricamente i medesimi settori o che presentano i diagrammi di irradiazione parzialmente sovrapposti. In queste situazioni è necessario valutare il campo elettromagnetico considerando contemporaneamente le emissioni di tutte le antenne che contribuiscono al

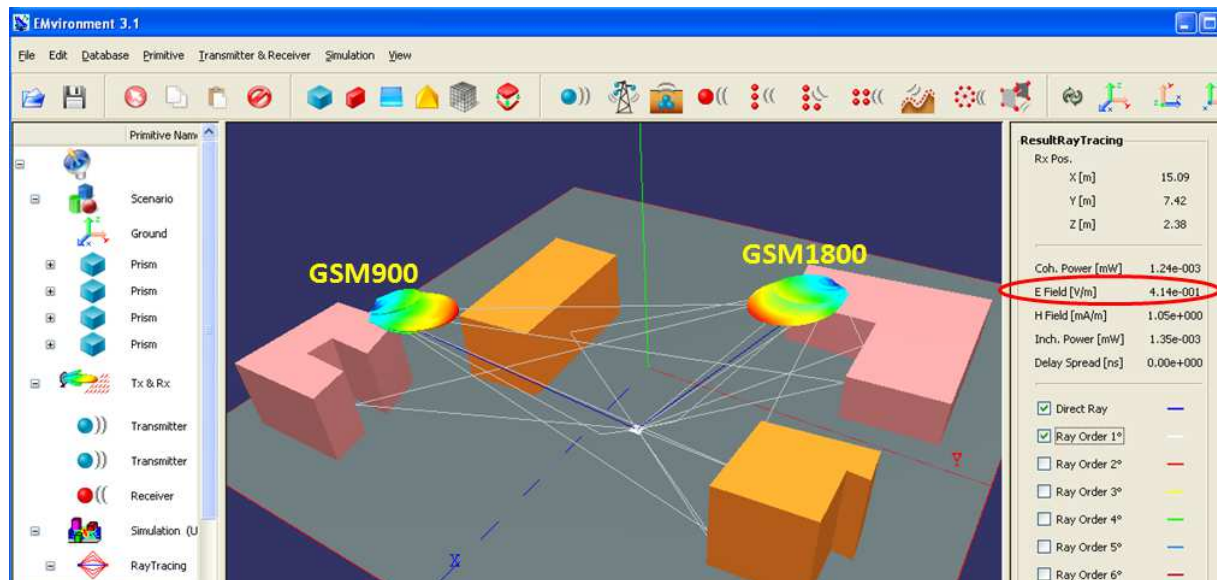
valore di campo. Il campo totale è dato dalla somma quadratica dei singoli contributi secondo la seguente espressione

$$E_{tot}(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (2.5)$$

nella quale  $E_i$  indica il campo elettrico dovuto all'emissione della  $i$ -ma sorgente ed  $N$  il numero di antenne.

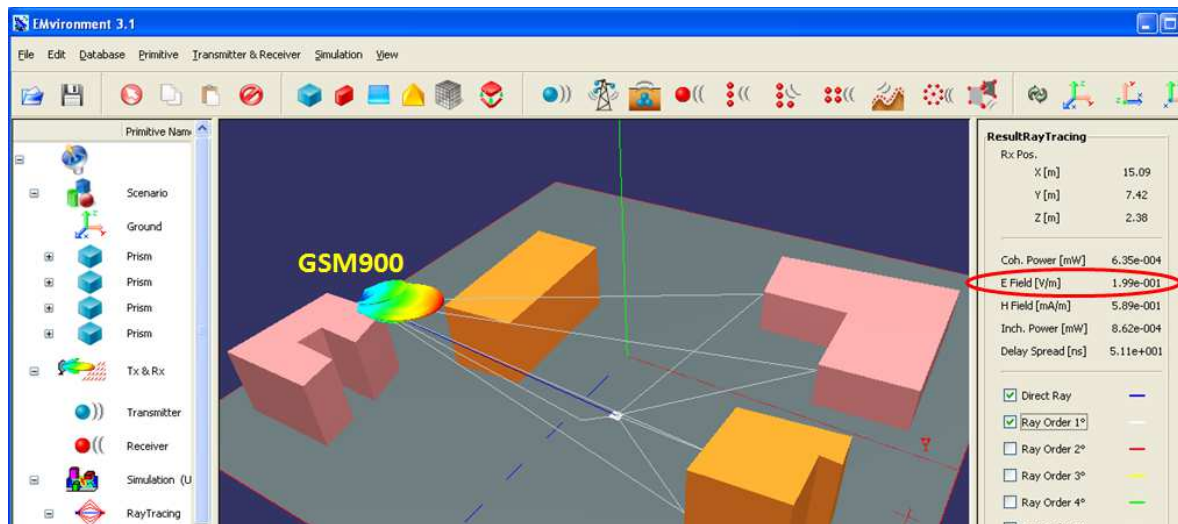
### 2.2.1 EMvironment

Il software *EMvironment* permette di calcolare il campo elettromagnetico dovuto ad un numero arbitrario di antenne contemporaneamente presenti nell'ambiente di analisi. Il valore del campo elettrico totale è dato dalla (2.5). Per dimostrare questa capacità, nella seguente Figura 2.2, è rappresentato uno scenario in cui sono contemporaneamente attive una antenna GSM 900 e una antenna GSM 1800. Nella stessa figura è evidenziato anche il valore del campo elettrico totale pari a 0.414V/m.



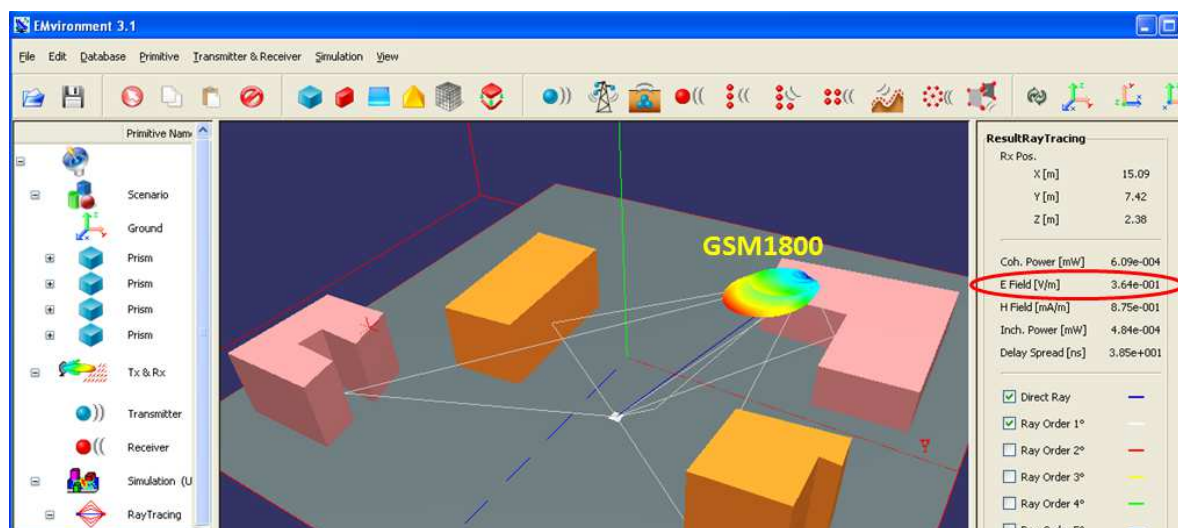
**Figura 2.1 - Valore di campo elettrico, pari a 0.414V/m, dovuto all'antenna GSM900 e all'antenna GSM1800 operanti contemporaneamente.**

La seguente Figura 2.2, invece, mostra il medesimo scenario in cui è attiva solo l'antenna GSM 900. Nella stessa figura è evidenziato anche il valore del campo elettrico totale pari a 0.199V/m.




**Figura 2.2 - Valore di campo elettrico, pari a 0.199V/m, dovuto alla sol antenna GSM900.**

Infine, nella seguente Figura 2.3, è mostrato lo stesso scenario dove è attiva solo l'antenna GSM 1800. Nella stessa figura è evidenziato anche il valore del campo elettrico totale pari a 0.364V/m.



**Figura 2.3 - Valore di campo elettrico, pari a 0.364V/m, dovuto alla sol antenna GSM1800.**

	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	Doc. Nr. UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	Versione 00	Classifica Non Classificato

Risulta evidente come, il valore di campo elettrico totale pari a 0.414V/m, si ricavi applicando la (2.5) ai valori di campo elettrico dovuti alle due antenne operanti singolarmente:

$$\sqrt{0.199^2 + 0.364^2} = \sqrt{0.0396 + 0.132} = \sqrt{0.172} = 0.414 \text{ V/m} .$$

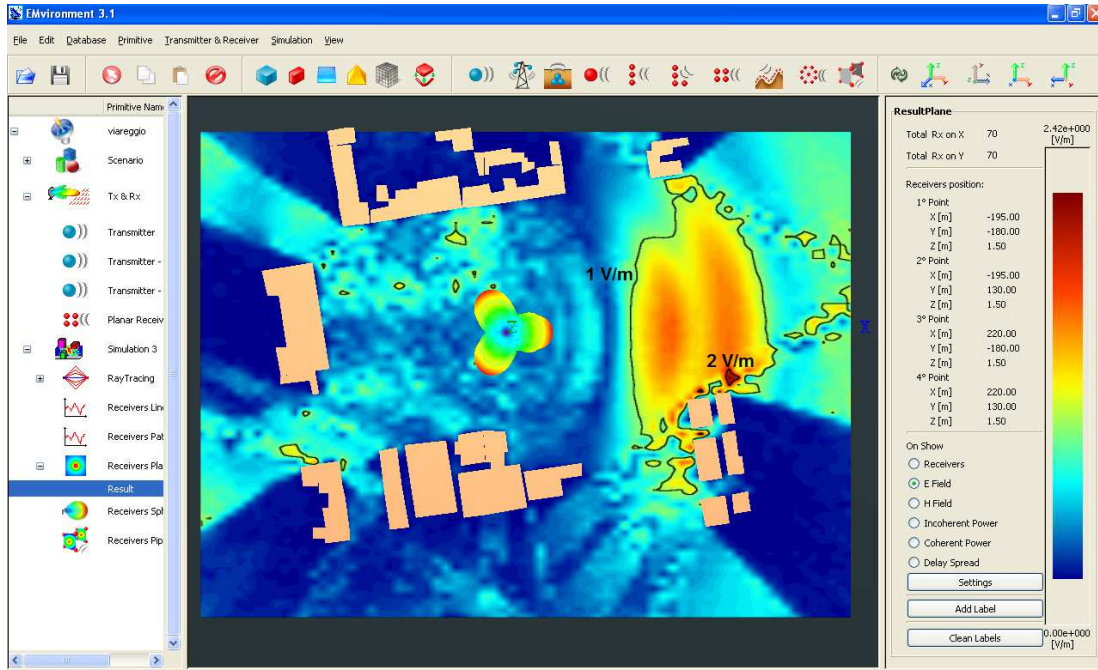
### 2.3 *Calcolo del campo su sezioni definite*

La norma sottolinea l'importanza di una corretta e immediata rappresentazione grafica dei risultati. Una volta calcolato il campo elettrico su un insieme di punti, il risultato grafico più comunemente utilizzato per evidenziare la distribuzione spaziale di campo è quello mediante le curve iso-livello (*contour-plot*). Le curve iso-livello sono tracciate unendo tutti i punti in cui il campo elettrico risulta uguale al valore desiderato. In questo modo è immediato individuare le zone spaziali in cui il campo è inferiore o superiore al valore specificato per il tracciamento della curva iso-livello.

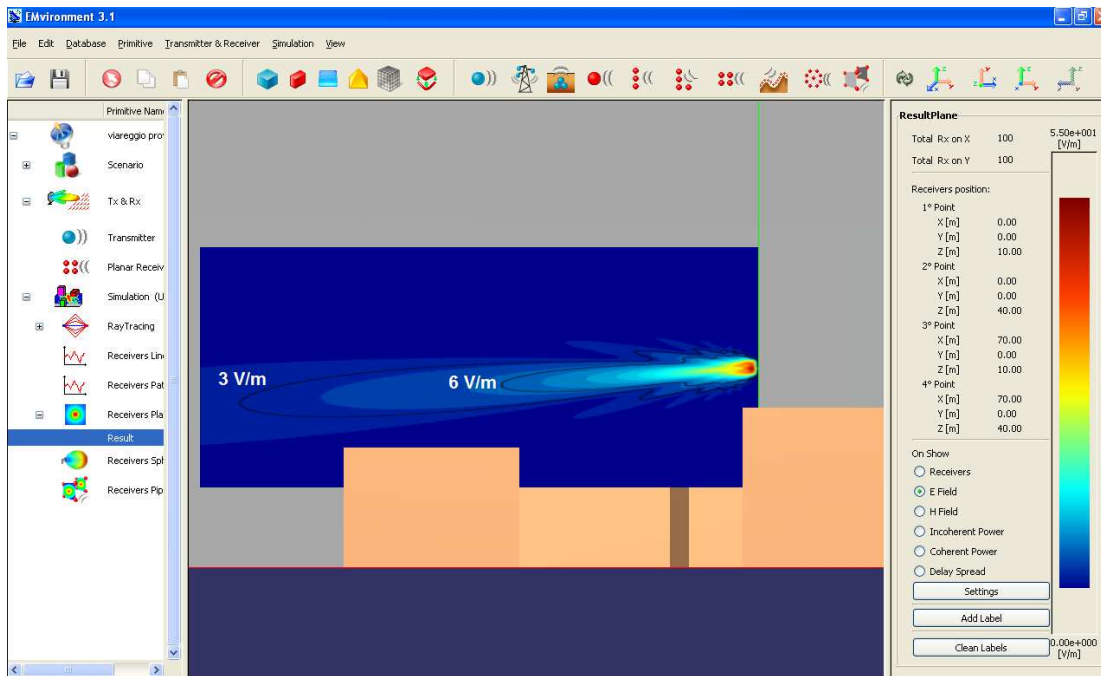
#### 2.3.1 *EMvironment*

Il software *EMvironment* permette il calcolo del campo elettromagnetico su griglie di punti disposte in maniera arbitraria nell'ambiente di analisi. Quindi è possibile disporre tali griglie parallelamente al suolo a diverse quote (Figura 2.4), verticalmente (Figura 2.5) e anche su piani inclinati. Una volta calcolato il campo sulle griglie di punti, è possibile tracciare le curve iso-livello in corrispondenza di uno o più valori arbitrari (per esempio corrispondenti ai limiti di esposizione previsti dalla normativa vigente). In questo modo è possibile verificare se una particolare curva iso-livello interseca aree accessibili alla popolazione.






**Figura 2.4 - Visualizzazione dei valori di campo elettrico su una griglia orizzontale di punti posta a 1.5m dal suolo dovuti ad una SRB. In evidenza le curve iso-livello a 1 V/m e 2V/m.**



**Figura 2.5 - Visualizzazione dei valori di campo elettrico su una griglia di punti verticale. In evidenza le curve iso-livello a 3V/m e 6 V/m.**

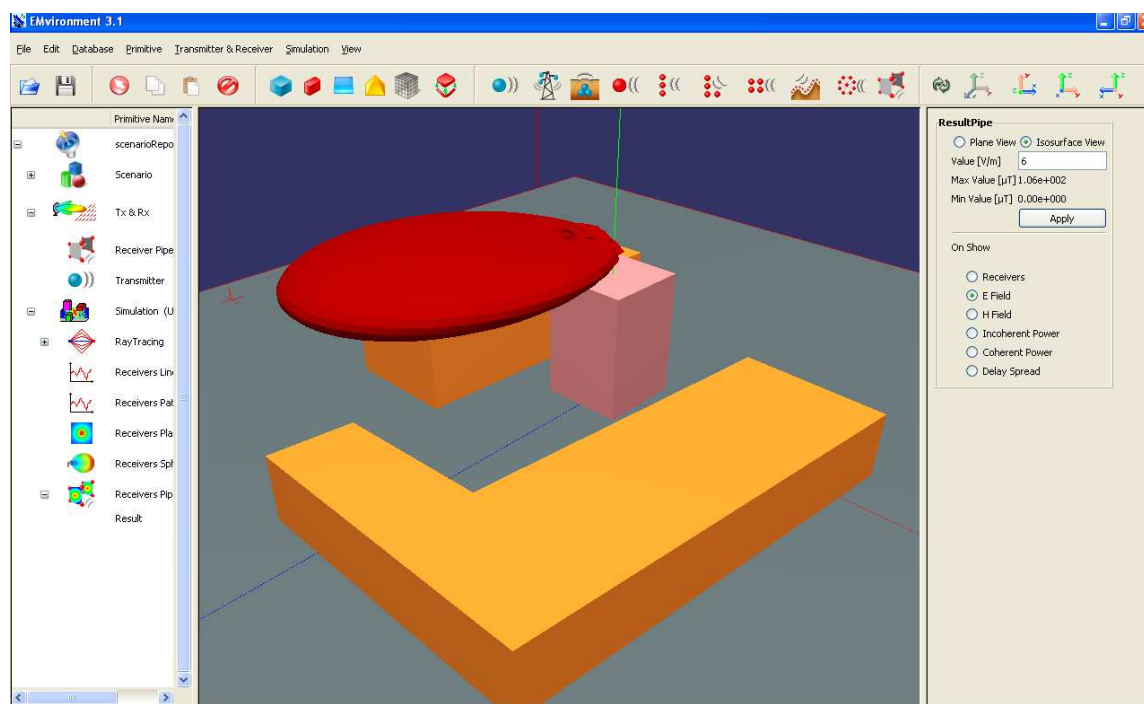
	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> <i>UNIFI_MRL/CEI/13_03_002</i>	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## 2.4 Calcolo del volume di rispetto


La norma prevede il calcolo del volume di rispetto per la verifica della conformità di una SRB. Il volume di rispetto definisce una regione di spazio intorno all'antenna all'esterno della quale il campo elettromagnetico risulta certamente inferiore al valore specificato (per esempio il limite di esposizione previsto dalla normativa vigente). Il volume di rispetto è quindi rappresentato da una iso-superficie tridimensionale che può essere utilizzata sia in fase progettuale che in fase di verifica di uno impianto.

### 2.4.1 EMvironment

Per determinare il volume di rispetto attorno ad una antenna, il software *EMvironment* consente il posizionamento di un volume di punti in cui calcolare il campo elettromagnetico. Successivamente è possibile specificare il valore di campo elettrico in corrispondenza del quale tracciare la iso-superficie. Si ottiene quindi una superficie tridimensionale all'interno e all'esterno della quale il campo elettrico risulta rispettivamente superiore e inferiore al valore specificato (Figura 2.6).



**Figura 2.6 - Visualizzazione volume di rispetto a 6V/m per una singola antenna posizionata sopra il tetto di un edificio.**

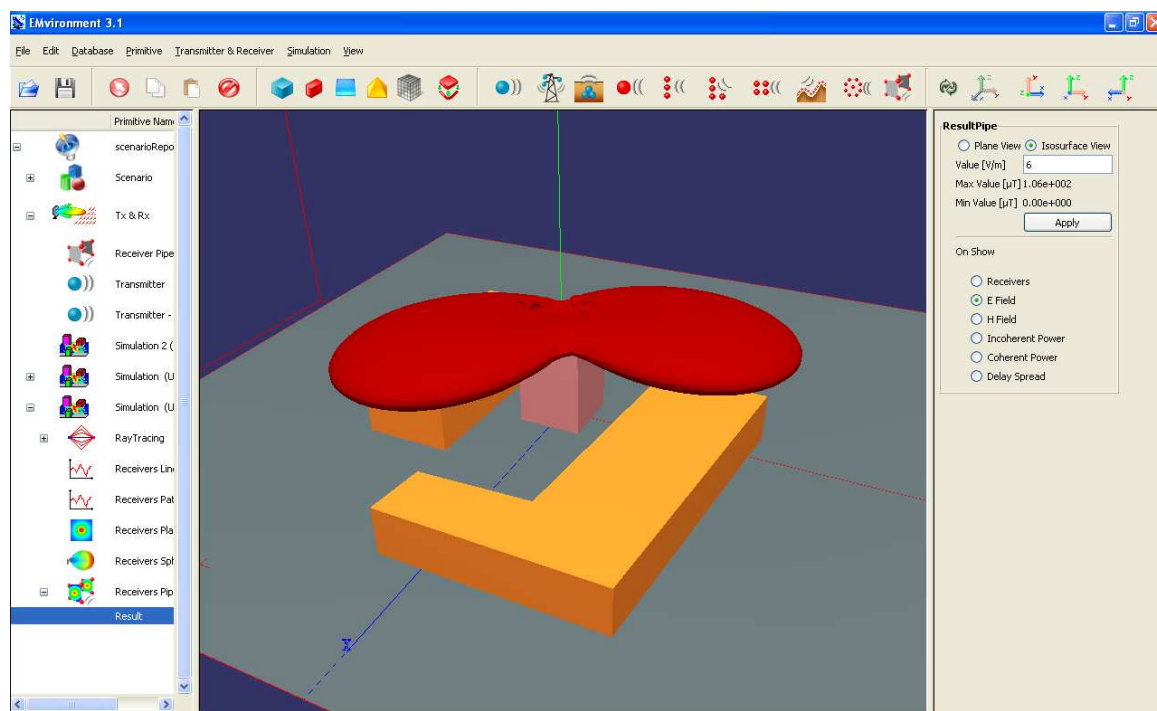
 <b>MRL</b> Microwaves Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## 2.5 Calcolo del volume di rispetto con più sorgenti

La norma specifica che, in presenza di più antenne trasmettenti, è necessario valutare i volumi di rispetto di ciascuna sorgente tenendo in considerazione anche i contributi derivanti dalle altre sorgenti presenti.


### 2.5.1 EMvironment

La determinazione, mediante il software *EMvironment*, del volume di rispetto attorno ad una antenna nel caso di più antenne contemporaneamente presenti, è sostanzialmente uguale a quella del caso di una singola antenna. Infatti è possibile posizionare nello scenario di analisi un volume di punti di estensione tale da racchiudere più antenne contemporaneamente. In questo modo il campo in un punto del volume è il risultato della somma dei singoli contributi, secondo la (2.5), di tutte le antenne e pertanto il tracciamento della iso-superficie attorno ad una antenna considera automaticamente anche l'effetto delle altre antenne (Figura 2.7).



**Figura 2.7 - Visualizzazione del volume di rispetto a 6V/m attorno a 2 antenne ubicate sullo stesso sostegno sopra ad un edificio.**



 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato


## ***2.6 Calcolo dei livelli di campo EM in spazio libero - formulazione di campo vicino***

La norma mette in evidenza che l'applicazione della (2.2), valida a grandi distanze dall'antenna, a punti che non sono in regione di campo lontano, conduce generalmente a valori di campo elettromagnetico che possono essere sovrastimati oppure molto conservativi. Quindi, per determinare con maggiore precisione il valore del campo nella regione di campo vicino attorno all'antenna, è possibile ricorrere a tecniche più sofisticate rispetto alla formulazione di campo lontano a scapito di una maggiore complessità. Fra le varie tecniche possibili la norma cita le seguenti.

1. Approssimazione dell'antenna come sorgente lineica: questa tecnica è valida se l'antenna della SRB è costituita da una schiera verticale di elementi moderatamente direttivi e sufficientemente numerosi.
2. Ricostruzione del campo vicino a partire dalla: a) determinazione di una distribuzione di corrente equivalente che produce, in campo lontano, gli stessi campi dell'antenna in esame; b) espansione in onde sferiche del campo lontano dell'antenna. In entrambi i casi il campo vicino è successivamente determinato implementando l'integrale d'irradiazione in maniera esatta o approssimata.
3. Metodo dei singoli elementi: consente di calcolare il campo nel generico punto (sia in regione di campo vicino che lontano) come somma dei campi prodotti dai singoli elementi radianti di cui è costituita l'antenna.

### ***2.6.1 EMvironment***

Il software *EMvironment* dispone di due metodi per calcolare il campo elettromagnetico nella regione di campo vicino di una antenna. Il primo consiste nel definire una corrente equivalente su una antenna ad apertura di dimensioni tali da produrre gli stessi diagrammi di irradiazione in campo lontano dell'antenna in esame. Successivamente si calcola il campo vicino mediante l'implementazione esatta dell'integrale di irradiazione [1] (un metodo analogo è adottato anche in [6]). Il secondo metodo consiste nel sintetizzare un'antenna equivalente a quella in esame, in termini di campo lontano prodotto, costituita da una schiera planare di elementi radianti alimentati da opportune correnti [7]. Quindi, una volta

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

nota la posizione dei singoli elementi all'interno della schiera e la loro corrente di alimentazione, il campo vicino è calcolato come somma dei contributi di campo prodotti dai singoli elementi radianti [8].


## 2.7 *Calcolo dei livelli di campo EM con tecniche raggistiche*

In ambienti realistici le condizioni di spazio libero non sono praticamente mai realizzate. La norma fa notare che le SRB sono generalmente poste in prossimità di edifici e pertanto il calcolo del campo elettromagnetico in un generico punto deve tener conto almeno degli effetti di riflessione da questi introdotti. Per questo motivo la norma indica le tecniche raggistiche come quelle più idonee per effettuare il calcolo del campo. L'implementazione delle tecniche raggistiche è basata sulla:

- Ottica Geometrica (GO - *Geometrical Optics*), secondo la quale è possibile determinare i raggi riflessi e i campi elettromagnetici ad essi associati;
- Teoria Geometrica della Diffrazione (GTD - *Geometrical Theory of Diffraction*) secondo la quale è possibile determinare i raggi diffratti e i relativi campi elettromagnetici.

Le suddette teorie vengono implementate attraverso algoritmi di ray-tracing che possono essere di due tipi: diretti o inversi. Nel primo caso si segue il percorso dei raggi che vengono "lanciati" dall'antenna verso il punto di osservazione. Nel secondo caso il percorso dei raggi viene determinato a partire dal punto di osservazione e procedendo a ritroso verso l'antenna dopo aver determinato tutti i punti di riflessione tramite l'applicazione del teorema delle immagini. In entrambi i procedimenti si calcola l'attenuazione che il raggio subisce ad ogni interazione con gli ostacoli presenti nell'ambiente. Tale attenuazione tiene conto dell'angolo di incidenza dell'onda elettromagnetica sull'ostacolo e delle caratteristiche elettriche (costante dielettrica, conducibilità elettrica) del materiale di cui è costituito l'ostacolo.

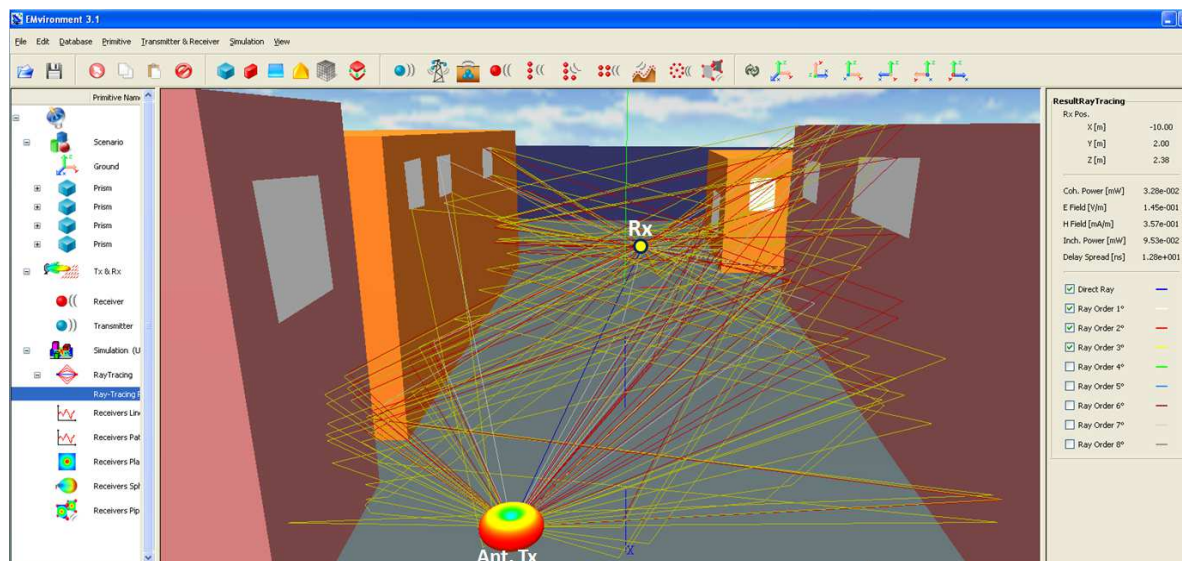
Le tecniche raggistiche, a scapito di una maggiore complessità computazionale, consentono una valutazione maggiormente accurata del campo elettromagnetico rispetto alla formulazione di spazio libero che, peraltro, non consente di valutare il campo nelle zone d'ombra. L'onere computazionale di tali tecniche è dovuto principalmente all'esecuzione dei

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

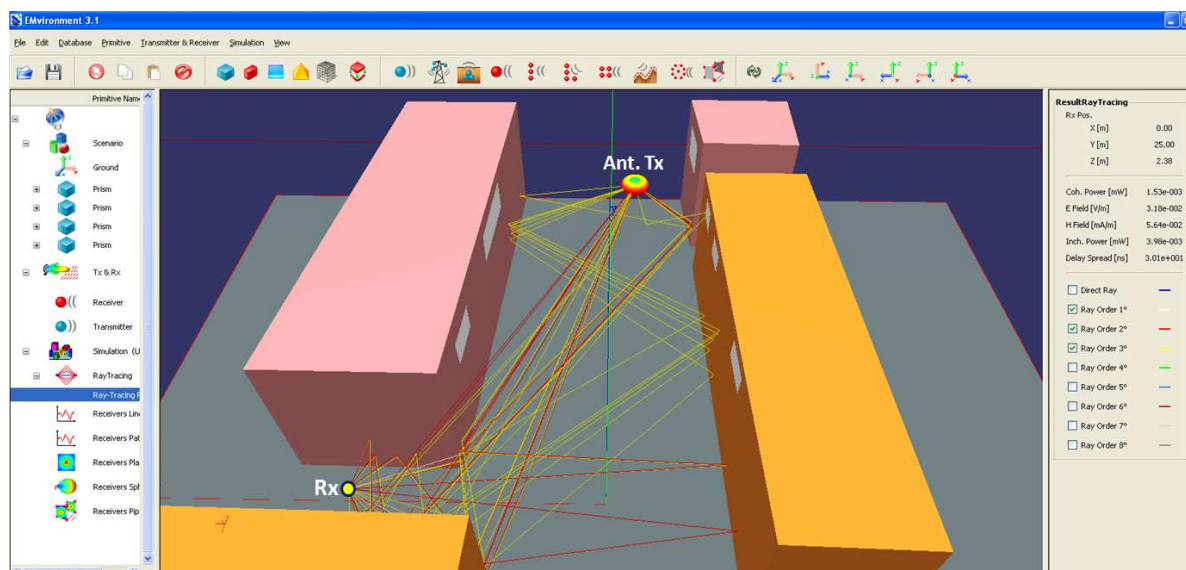
test di visibilità (shadowing test) in base ai quali si determina se un potenziale raggio raggiunge effettivamente il punto in cui calcolare il campo.

### 2.7.1 *EMvironment*

Il software *EMvironment* calcola il campo elettromagnetico dopo aver determinato tutti i possibili raggi che collegano l'antenna ai vari punti di osservazione. A tale scopo, come descritto nel paragrafo 1.2, è stato implementato un algoritmo di ray-tracing tridimensionale di tipo inverso basato sull'applicazione ricorsiva del teorema delle immagini sulle superfici planari in cui sono scomposti gli edifici e il terreno. Inoltre l'algoritmo consente anche la determinazione dei raggi diffratti, mediante la costruzione del cono di Keller sugli spigoli degli ostacoli, e dei raggi trasmessi attraverso le pareti. In questo modo è possibile determinare raggi di ordine superiore al primo (è possibile impostare un ordine di ray-tracing arbitrario) determinando, quindi, il campo elettromagnetico in maniera accurata soprattutto nelle zone d'ombra. Si ricorda, infine, che l'esecuzione degli shadowing test è accelerata mediante la determinazione, nella fase di pre-processing dell'algoritmo di ray-tracing, di opportune relazioni di visibilità fra gli ostacoli dello scenario e mediante l'applicazione della tecnica *Space Volumetric Partitioning* (SVP). La combinazione di queste due tecniche di accelerazione consente di ridurre notevolmente il numero di shadowing test per raggio [3]. La seguente Figura 2.8 mostra uno scenario con un punto di osservazione posto in linea di vista (*Line of Sight*) con l'antenna trasmittente in cui sono visualizzati il raggio diretto e i raggi fino al terzo ordine. La seguente Figura 2.9 mostra lo stesso scenario dove, invece, il punto di osservazione è posto in una zona d'ombra (*Non Line of Sight*). Tale punto viene raggiunto dai raggi diffratti dagli spigoli, dai raggi molteplici riflessi dalle pareti e dai raggi costituiti da sequenze miste di contributi di riflessione e diffrazione.




**Figura 2.8 - Visualizzazione dei raggi diretto e del terzo ordine nel caso di punto di osservazione posto in *Line of Sight*.**



**Figura 2.9 - Visualizzazione dei raggi fino al terzo ordine nel caso di punto di osservazione posto in una zona d'ombra (*Non Line of Sight*).**

## 2.8 Data base territoriali

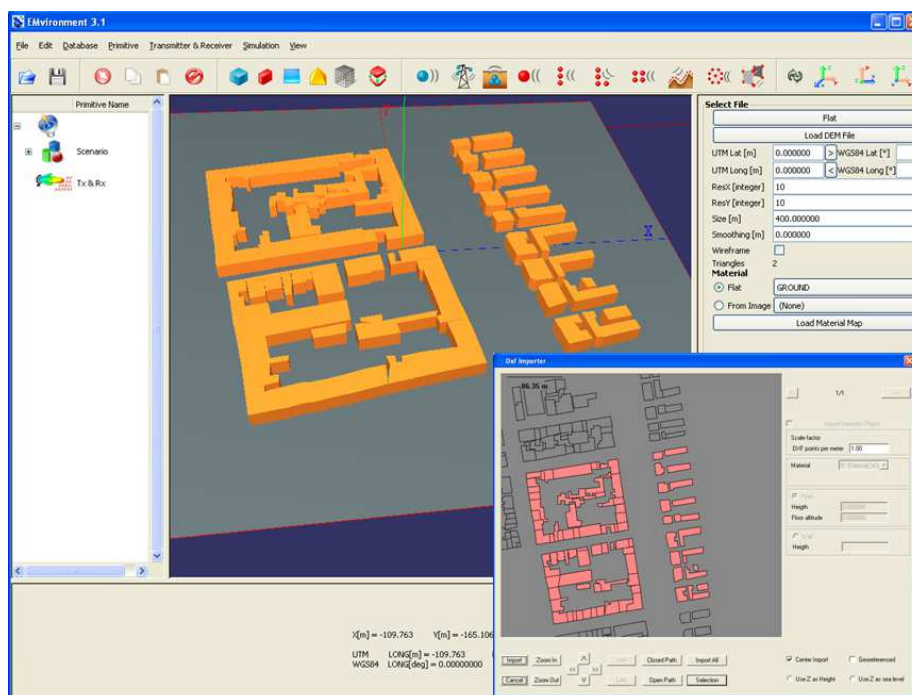
Per la verifica della conformità rispetto alla normativa vigente in merito ai limiti di esposizione ai campi elettromagnetici, risulta di fondamentale importanza stabilire in che modo i livelli di campo o i volumi di rispetto possano essere messi in relazione alle zone di accessibilità in prossimità di una SRB. Per questo motivo la norma evidenzia che è necessario

	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> <i>UNIFI_MRL/CEI/13_03_002</i>	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

disporre delle coordinate geografiche e della quota delle antenne, delle planimetrie degli edifici ed eventualmente anche di mappe orografiche del terreno. Questi dati sono, a maggior ragione, necessari qualora si utilizzino i metodi previsionali basati su tecniche raggistiche.

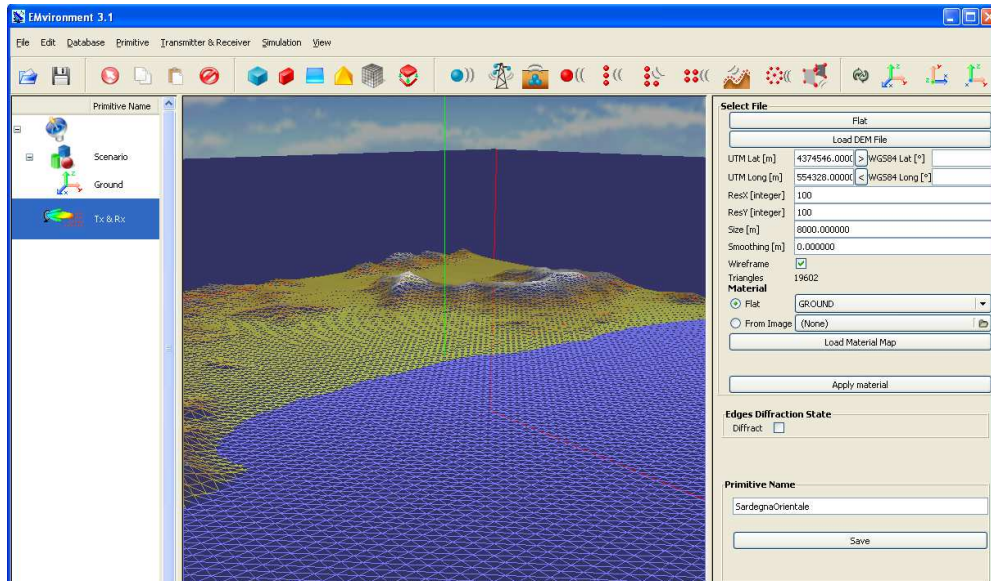
### 2.8.1 EMvironment

Il software *EMvironment*, come illustrato nel paragrafo 1.3, consente di costruire l'ambiente di analisi mediante l'inserimento, da parte dell'utente, di primitive geometriche elementari (come prismi, muri, ecc.) e, soprattutto, mediante l'importazione automatica di file DXF (*Drawing Interchange Format*) e di file DEM (*Digital Elevation Model*). La prima tipologia di file è generalmente utilizzata per l'importazione delle planimetrie degli edifici (Figura 2.10), mentre la seconda per l'importazione dell'orografia del terreno, qualora l'approssimazione di terreno piatto risulti troppo approssimativa (Figura 2.11). Inoltre si mette in evidenza che *EMvironment* consente anche la georeferenziazione di file DXF su file DEM, in modo da ricostruire l'ambiente di analisi nella maniera più fedele possibile all'ambiente reale (Figura 2.12).

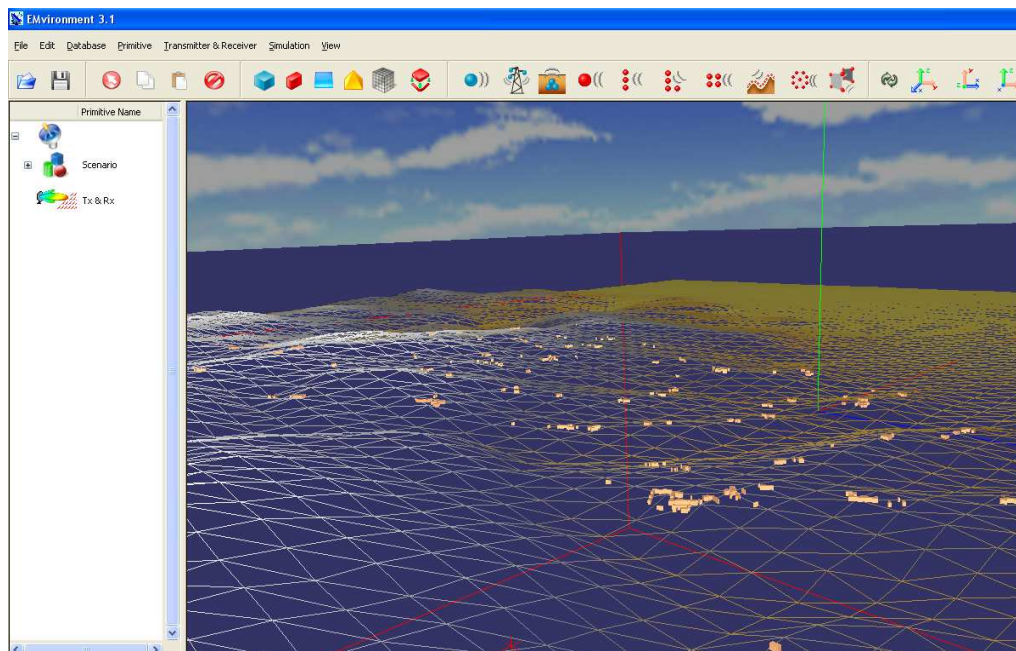


**Figura 2.10 - Finestra per l'importazione di file DXF e relativa visualizzazione nel software *EMviroment*.**






**Figura 2.11 - Esempio di visualizzazione di un terreno orografico tramite importazione del relativo file DEM: costa sud-orientale della Sardegna.**



**Figura 2.12 - Esempio di georeferenziazione di file DXF su file DEM: comune di Scandicci.**

## ***2.9 Affidabilità degli algoritmi di calcolo e dell'implementazione***

La norma riporta alcune osservazioni sull'affidabilità degli algoritmi di calcolo e dell'implementazione dei medesimi. In particolare la norma detta delle indicazioni che

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

dovrebbero essere fornite da chiunque si proponga come fornitore di strumenti di analisi basati su metodi di calcolo numerici come quelli descritti nella norma stessa. Tali indicazioni sono:


1. descrizione il più possibile dettagliata degli algoritmi utilizzati;
2. riferimenti pertinenti alla letteratura scientifica;
3. confronti con dati riportati da altri di cui si ritiene accettabile il livello di affidabilità;
4. confronto con codici di calcolo universalmente noti;
5. confronti con dati sperimentali ottenuti con strumentazione e procedure di misura in linea con le finalità della norma stessa.

### **2.9.1 EMvironment**

Il software *EMvironment* è stato sottoposto a test di validazione durante tutte le sue fasi di sviluppo che si sono susseguite nel corso degli ultimi dieci anni. Con riferimento alle cinque indicazioni, riportate nel precedente paragrafo, si mette in evidenza quanto segue. Per quanto riguarda le prime due indicazioni, nel presente documento, sono stati descritti gli algoritmi di calcolo del campo elettromagnetico, l'algoritmo di ray-tracing e sono stati forniti i riferimenti più significativi alla letteratura scientifica su cui si basano detti algoritmi. Ulteriori dettagli e approfondimenti sull'implementazione del nucleo di calcolo di *EMvironment* sono consultabili in [D3] e [3]. Relativamente alle restanti tre indicazioni, che riguardano la validazione dei risultati forniti dal software, nel Capitolo 3 del presente documento, viene riportata un'ampia serie di confronti dei risultati con dati presenti nella letteratura scientifica, con software di calcolo commerciali e con dati sperimentali ottenuti da campagne di misura.

### **2.10 Elementi fondamentali dei software di simulazione**

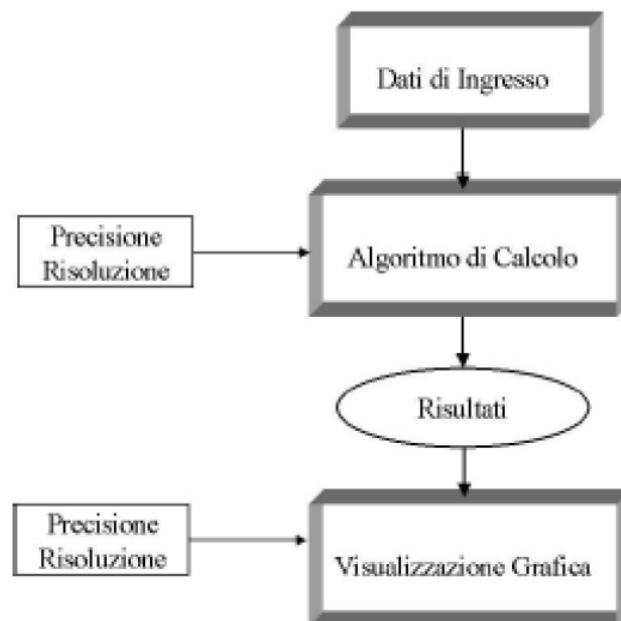
La norma CEI 211-10 descrive quali sono i dati di input necessari allo svolgimento del calcolo dei livelli di campo elettromagnetico, i metodi di calcolo dello stesso e come devono essere rappresentati i risultati calcolati. L'Appendice G della stessa norma indica, invece, le principali caratteristiche e le prestazioni minime che devono essere possedute dai software previsionali per essere dichiarati idonei ad eseguire il calcolo dei valori di campo elettromagnetico.

	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	Doc. Nr. UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	Versione 00	Classifica Non Classificato

Gli elementi fondamentali di un programma che sono considerati nell'appendice della norma sono:

- l'algoritmo di calcolo,
- i dati di ingresso,
- i dati di uscita.

Questi tre elementi sono indispensabili per permettere ad uno software di simulazione di calcolare il campo elettromagnetico e di rappresentare in modo facilmente interpretabile i risultati. Ogni software di calcolo può essere strutturato schematicamente come mostrato in Figura 2.13.




**Figura 2.13 - Schematizzazione di un software di calcolo numerico secondo la norma CEI 211-10V1 Appendice G.**

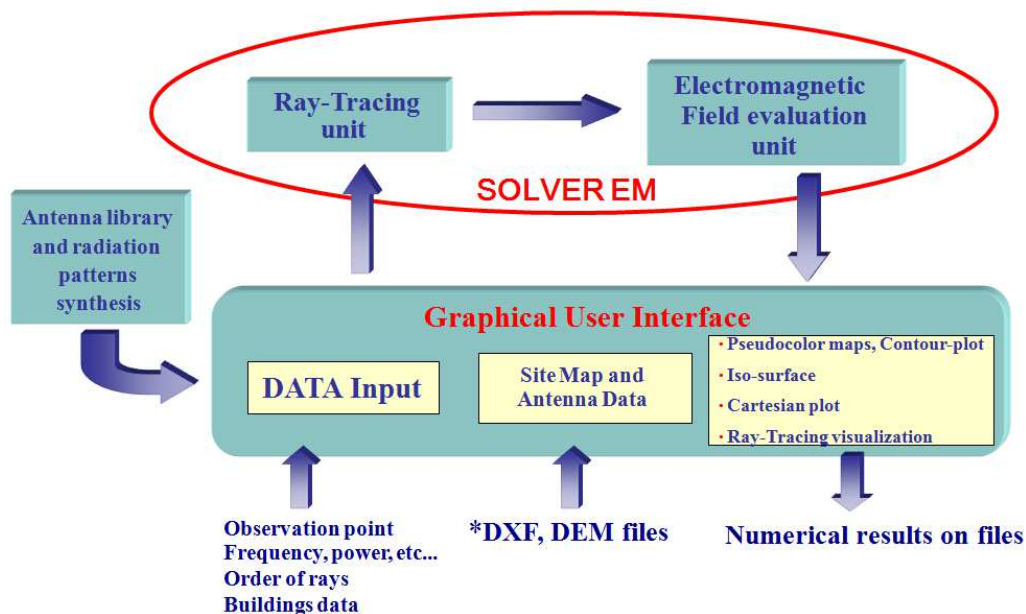
### 2.10.1 EMvironment

La Figura 2.14 mostra la schematizzazione dei vari blocchi funzionali del software *EMvironment*. Dal confronto fra la Figura 2.13 e Figura 2.14 è evidente come l'architettura di *EMvironment* rispetti quella indicata dalla norma. Infatti, mediante l'interfaccia grafica (GUI - *Graphical User Interface*), i dati di ingresso sono memorizzati e passati all'algoritmo di



 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

calcolo (indicato come "Solver EM" in Figura 2.14) il quale fornisce i risultati (dati di uscita) su file di testo che sono caricati e direttamente visualizzati graficamente nella stessa GUI.



**Figura 2.14 - Schematizzazione funzionale del software *EMvironment*.**


### 2.11 Algoritmo di calcolo

L'appendice della norma riassume, brevemente, gli algoritmi di calcolo indicati nella stessa norma. Questi possono essere raggruppati in tre famiglie principali:

1. formulazione di campo lontano in spazio libero;
2. formulazione di campo vicino in spazio libero;
3. formulazioni per il calcolo del campo in ambienti complessi, ovvero in presenza di ostacoli (es. ray-tracing).

Almeno una di queste tre formulazioni deve essere implementata nei software previsionali che inoltre devono consentire:

- il calcolo del campo in un punto o in un insieme di punti nel sistema di riferimento globale;
- il calcolo del campo in presenza di più di una sorgente contemporaneamente (almeno dieci);

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

- il tracciamento del volume di rispetto complessivo (2D o 3D) per una o più sorgenti contemporaneamente.

### **2.11.1 EMvironment**

L'algoritmo di calcolo del software *EMvironment* implementa tutte e tre le formulazioni sopracitate. Infatti *EMvironment* implementa un algoritmo di calcolo basato sul ray-tracing ma questo, come descritto nel paragrafo 2.1.1, se limitato alla determinazione del solo raggio diretto, equivale al calcolo del campo elettromagnetico nelle condizioni di campo lontano e spazio libero. Inoltre l'algoritmo permette anche l'analisi in campo vicino, come illustrato nel paragrafo 2.6.1, nel quale sono riportati anche i riferimenti alla letteratura scientifica. Infine, nei precedenti paragrafi, è stato mostrato come il software *EMvironment* consenta il calcolo su insiemi di punti, arbitrariamente definiti dall'utente, e la visualizzazione dei volumi di rispetto sia 2D che 3D.


## **2.12 Gestione dei dati di ingresso**

Nell'appendice della norma è messa in evidenza l'importanza della gestione ed il controllo dell'accuratezza dei dati di ingresso che è un processo essenziale per la determinazione corretta dei livelli di campo elettromagnetico. Pertanto i software devono trattare senza perdita di informazioni i seguenti dati di ingresso:

- diagrammi di radiazione delle antenne con passo di campionamento minore o uguale a due gradi;
- dati di impianto come specificato nella norma;
- coordinate spaziali;
- cartografia cartacea e/o elettronica con risoluzione minore o uguale a un metro;
- per le formulazioni basate sul ray-tracing: parametri rappresentativi delle caratteristiche dielettriche delle superfici utilizzate per modellare gli edifici (indispensabile il riferimento alla letteratura scientifica in materia).

### **2.12.1 EMvironment**

In relazione ai precedenti punti il software *EMvironment* permette:


 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

- ✓ la memorizzazione dei diagrammi di radiazione delle antenne con un passo di campionamento angolare arbitrario, quindi anche minore o uguale a due gradi;
- ✓ l'impostazione e la memorizzazione dei dati di impianto in termini di potenza irradiata, polarizzazione, frequenza;
- ✓ l'impostazione e la memorizzazione delle coordinate spaziali, della quota e dell'orientazione delle antenne presenti nell'ambiente di analisi;
- ✓ l'importazione nell'ambiente di analisi di cartografia digitale con risoluzione arbitraria, quindi anche minore o uguale ad un metro;
- ✓ l'impostazione e la memorizzazione di un database contenente le caratteristiche dielettriche dei materiali di cui sono costituite le superfici che modellizzano gli edifici ed il terreno: il data base, come descritto nel paragrafo 1.4, contiene la costante dielettrica, la conducibilità elettrica e la rugosità dei materiali; inoltre è possibile associare uno spessore alle superfici e definire superfici multi-strato che vengono opportunamente considerate in fase di calcolo dei coefficienti di riflessione e di trasmissione [1].

### **2.13 Rappresentazione grafica dei risultati**

L'ultimo elemento indispensabile di ogni software previsionale, trattato nell'appendice della norma, riguarda la presentazione grafica dei risultati di calcolo. Questo è un punto fondamentale per la valutazione della conformità di un tool di simulazione che deve permettere all'utente di interpretare in modo immediato e non ambiguo ciò che i risultati rappresentano. Un programma deve consentire una rappresentazione grafica che rientri fra quelle di seguito elencate:

- Rappresentazione bidimensionale:
  - linea isocampo su piani orizzontali e verticali o mappe riportanti su piani orizzontali o verticali aree corrispondenti a differenti intervalli di campo elettromagnetico individuabili con colori o motivi grafici;
  - linea isocampo ottenuta come proiezione sui piani coordinati del volume di rispetto avente estensione su 3 dimensioni.
- Rappresentazione tridimensionale:

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

- volumi di rispetto di una o più antenne rappresentabili attraverso forme geometriche semplificate come indicato nella norma;
- volumi di rispetto di una o più antenne rappresentabili attraverso superfici a campo costante;
- distribuzione 3D del campo in una regione calcolata su tutte le superfici accessibili (superficie più terreno).

### 2.13.1 EMvironment


In relazione ai precedenti punti il software *EMvironment* permette:

- ✓ il tracciamento di linee isocampo su piani orizzontali, verticali e orientati arbitrariamente e visualizzazione dei valori di campo elettromagnetico mediante mappe a colori;
- ✓ il tracciamento dei volumi di rispetto mediante superfici a campo costante in corrispondenza di valori arbitrari impostabili dall'utente;
- ✓ visualizzazione della distribuzione del campo su tutte le superfici accessibili degli edifici e del terreno.

Si ricorda infine che le superfici di punti su cui calcolare il campo elettromagnetico definibili in *EMvironment*, possono essere campionate con risoluzione arbitraria, quindi anche inferiore al metro come indicato nell'appendice della norma, e possono essere poste ad una quota arbitraria che viene mantenuta costante anche sopra il terreno orografico (file DEM).

### 2.14 Commenti

In questo Capitolo sono state riportate le indicazioni presenti nella norma CEI 211-10 e nella relativa Appendice G, rispettivamente, sui metodi di calcolo del campo elettromagnetico e sulle prestazioni minime che devono essere possedute dai software previsionali. E' stato quindi dimostrato come tutti i suddetti requisiti normativi siano ampiamente soddisfatti dalle caratteristiche del software *EMvironment*.

 <b>MRL</b> Microwaves Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

### 3 VALIDAZIONE DEI RISULTATI DEL SOFTWARE *EMVIRONMENT*

Nel presente Capitolo viene riportata un'ampia serie di confronti fra i risultati prodotti dal software *EMvironment* e quelli presenti nella letteratura scientifica o acquisiti tramite campagne di misura, che dimostra l'accuratezza e l'affidabilità delle previsioni dei livelli di campo elettromagnetico forniti dal software medesimo.

#### 3.1 *Confronti con risultati presenti in letteratura*

In questo paragrafo i risultati forniti dal software *EMvironment* vengono confrontati con i risultati presenti nella letteratura scientifica di cui si riportano i riferimenti bibliografici. Vengono quindi presi in considerazione i risultati relativi al calcolo di:

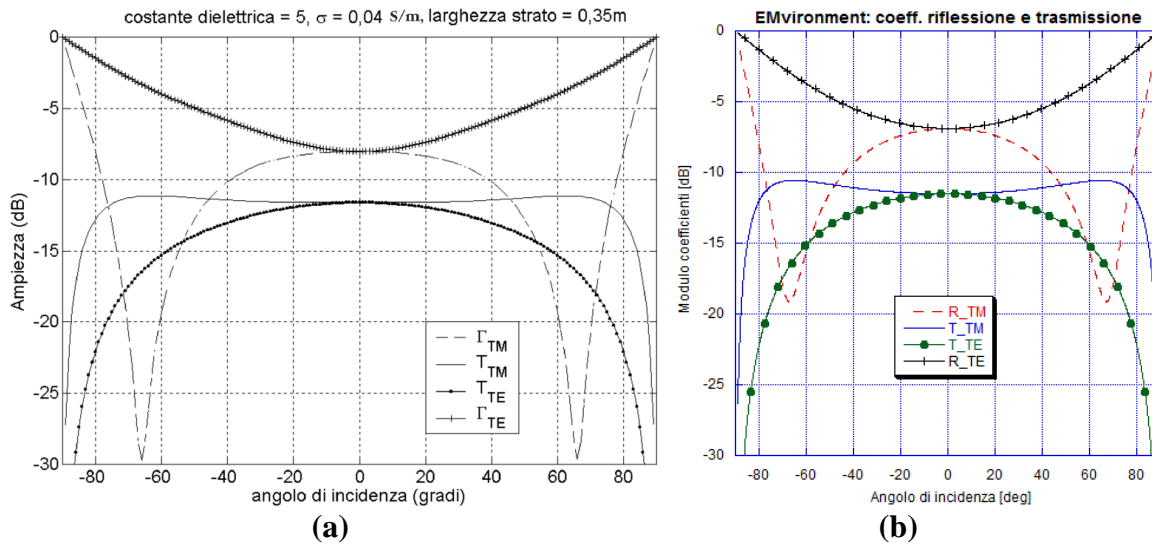
- coefficienti di riflessione e di trasmissione,
- potenza ricevuta (la quale è direttamente proporzionale al quadrato del modulo del campo elettrico),
- campo elettrico in zona di campo vicino attorno all'antenna.

##### 3.1.1 *Calcolo dei coefficienti di riflessione e di trasmissione*

Il primo confronto riguarda il calcolo dei coefficienti di riflessione e trasmissione in funzione dell'angolo di incidenza nel seguente caso riportato nel paragrafo 6.4.8 della norma CEI 211-10:

- frequenza: 900MHz
- spessore parete: 35cm
- costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$ : 5.0
- conducibilità elettrica  $\sigma$ : 0.04S/m

Nelle seguenti Figura 3.1 a) e b) sono mostrati, rispettivamente, i coefficienti di riflessione e di trasmissione riportati nella norma e quelli calcolati dal software *EMvironment*, dal confronto dei quali, è evidente l'accordo fra i risultati.



**Figura 3.1 - Coefficienti di riflessione e di trasmissione in funzione dell'angolo di incidenza: a) riportati nella CEI 211-10 e b) calcolati dal software *EMvironment*.**

Il secondo confronto riguarda il calcolo dei coefficienti di riflessione e trasmissione in funzione dell'angolo di incidenza nei seguenti casi riportati in [9]:

- frequenza: 1845MHz
- parete spessa (*Thick wall*): spessore = 35cm;  $\epsilon_r = 9.0$ ;  $\sigma = 0.1$ S/m
- parete sottile (*Thin wall*): spessore = 15cm;  $\epsilon_r = 9.0$ ;  $\sigma = 0.1$ S/m
- pannello di legno (*Wooden panel*): spessore = 3cm;  $\epsilon_r = 5.0$ ;  $\sigma = 0.0$ S/m
- vetro (*Glass*): spessore = 0.3cm;  $\epsilon_r = 2.4$ ;  $\sigma = 0.0$ S/m

Nelle seguenti Figura 3.2 a) e b) sono mostrati, rispettivamente, i coefficienti di riflessione e di trasmissione riportati in [9] e quelli calcolati dal software *EMvironment*, confrontando i quali, risulta evidente l'accordo fra i risultati.

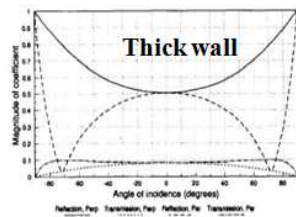


Fig. 1. Reflection and transmission coefficients for a thick wall within the model.

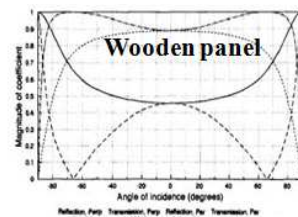


Fig. 3. Reflection and transmission coefficients for a wooden partition within the model.

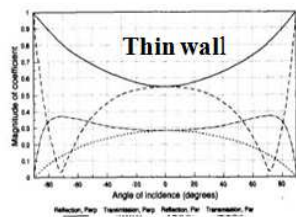


Fig. 2. Reflection and transmission coefficients for a thin wall within the model.

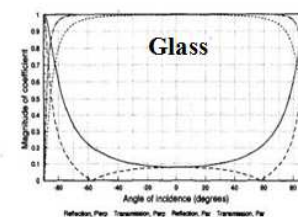
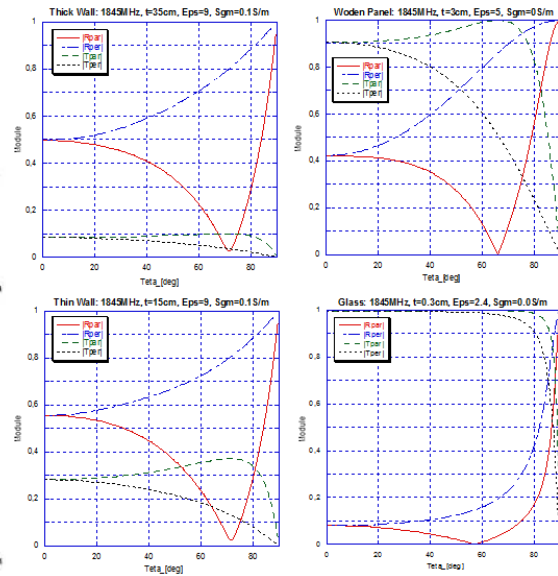


Fig. 4. Reflection and transmission coefficients for a glass window within the model.

(a)



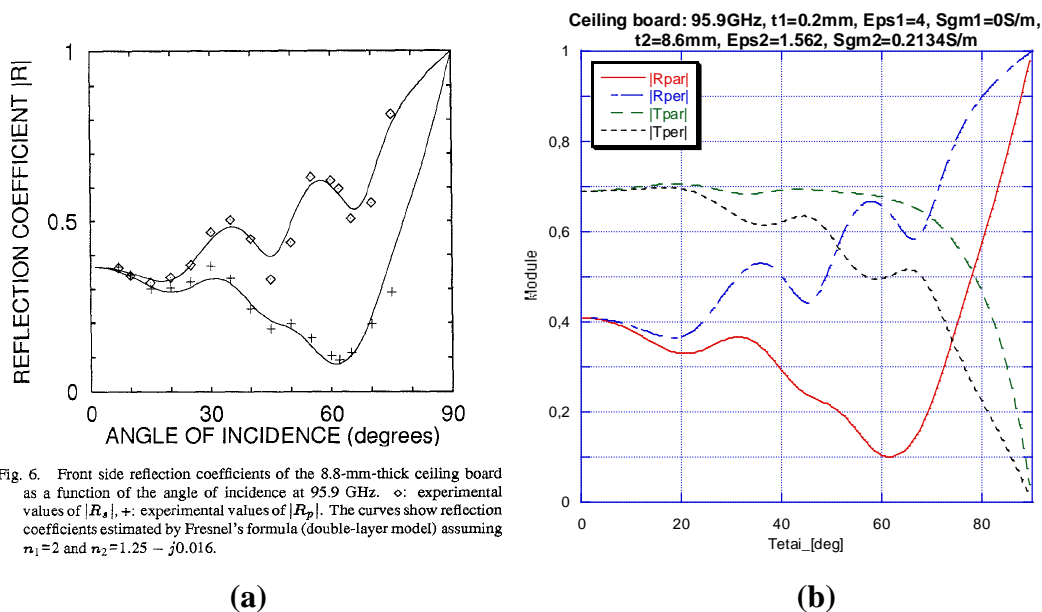
(b)

**Figura 3.2 - Coefficienti di riflessione e di trasmissione in funzione dell'angolo di incidenza: a) riportati in [9] e b) calcolati dal software EMvironment.**

Il terzo confronto riguarda il calcolo dei coefficienti di riflessione e trasmissione in funzione dell'angolo di incidenza nei seguenti casi riportati in [10]:

- frequenza: 95.9GHz
- parete composta da due strati aventi:
  - primo strato: spessore = 0.2mm;  $\epsilon_r = 4.0$ ;  $\sigma = 0.1S/m$
  - secondo strato: spessore = 8.6mm;  $\epsilon_r = 1.562$ ;  $\sigma = 0.2134S/m$

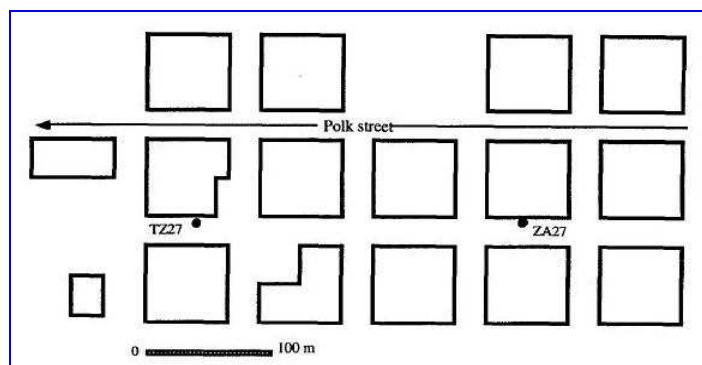
Nelle seguenti Figura 3.3 a) e b) sono mostrati, rispettivamente, i coefficienti di riflessione e di trasmissione riportati in [10] e quelli calcolati dal software EMvironment, dal confronto dei quali, è evidente l'accordo fra i risultati e anche con i dati misurati riportati in Figura 3.3 a).



**Figura 3.3 - Coefficienti di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza: a) riportati in [10] e b) calcolati dal software *EMvironment*.**

### 3.1.2 Calcolo della potenza ricevuta


Il confronto riguarda il calcolo del parametro *Path Loss* (dato dalla differenza, espressa in dB, fra potenza ricevuta e potenza trasmessa), a 810MHz, in uno scenario urbano (città di Tampa, Figura 3.4) in funzione della distanza dall'antenna trasmittente come riportato in [11].



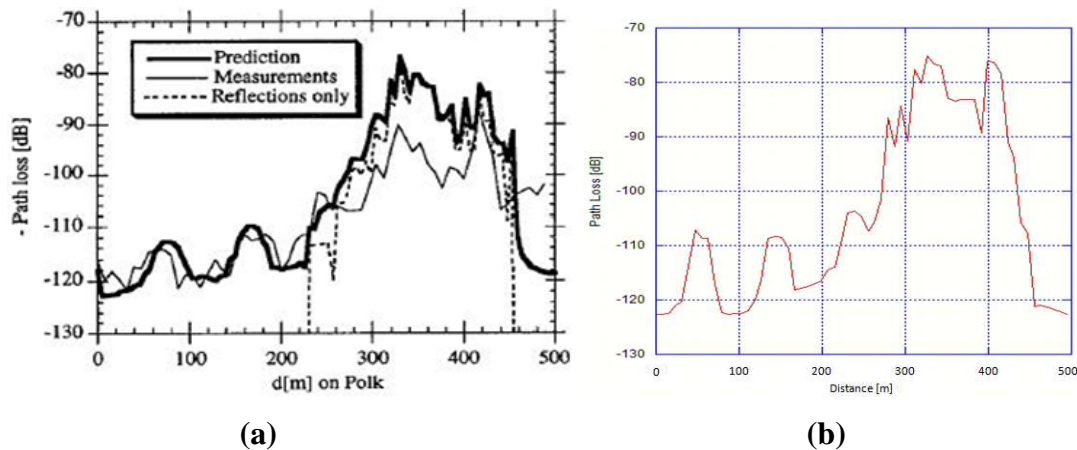
**Figura 3.4 - Zona della città di Tampa considerata per il calcolo del *Path Loss*.**

Nelle seguenti Figura 3.5 a) e b) è mostrato, rispettivamente, il *Path Loss* riportato in [11] e quello calcolato dal software *EMvironment*, dal confronto dei quali, si nota un buon accordo



 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

fra le due previsioni numeriche. Si fa notare che lo scenario all'interno del software *EMvironment* è stato ricostruito manualmente (cioè senza l'ausilio di file dxf digitali) e quindi le differenze fra gli andamenti dei due *Path Loss* simulati sono attribuibili agli inevitabili errori geometrici presenti nello scenario.



**Figura 3.5 - Andamento del *Path Loss* in funzione della distanza dall'antenna: a) riportato in [11] e b) calcolato dal software *EMvironment*.**

### 3.1.3 Calcolo del campo in zona di campo vicino

Il presente confronto riguarda il calcolo del campo elettrico nella regione di campo vicino attorno all'antenna come riportato in [6]. L'antenna che è stata considerata nell'articolo è una tipica antenna per SRB operante alla frequenza di 900MHz con una potenza irradiata di 1W. Nelle seguenti Figura 3.6 a) e b) sono mostrati, rispettivamente, l'andamento del campo elettrico riportato in [6] e quello calcolato dal software *EMvironment*. Si può osservare come il software *EMvironment* fornisca lo stesso andamento del campo elettrico di quello calcolato con il modello adottato nell'articolo e che risulta in ottimo accordo anche con quello fornito dal software commerciale usato nello stesso articolo.

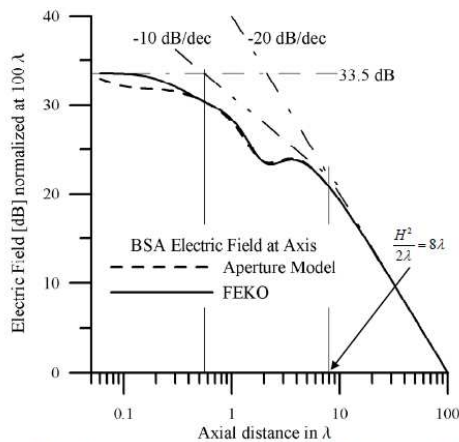
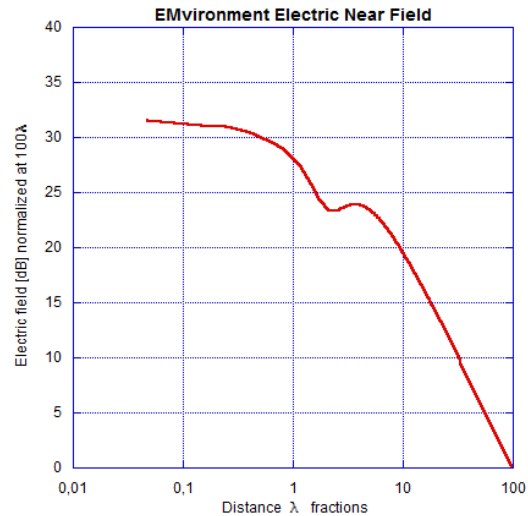


Fig. 3 Normalized Electric field along main axis in dB for the VPOL BSA for reference value on axis at 100 wavelengths. (Dashed line) equivalent aperture model, (continuous line) FEKO/MoM simulation.

(a)



(b)

**Figura 3.6 - Andamento del campo elettrico in zona di campo vicino in funzione della distanza dall'antenna normalizzata alla lunghezza d'onda: a) riportato in [6] e b) calcolato dal software EMvironment.**


### 3.2 Confronti con misure

In questo paragrafo i risultati forniti dal software *EMvironment* vengono confrontati con i dati acquisiti tramite misure. In particolare le misure sono state svolte nelle:

- camera schermata presso il CISAM (*Centro Interforze Studi e Applicazioni Militari*) di San Piero a Grado, Pisa, nel 2001;
- camera semi-anecoica presso la ditta Polab srl di Navacchio, Pisa, nel 2005.

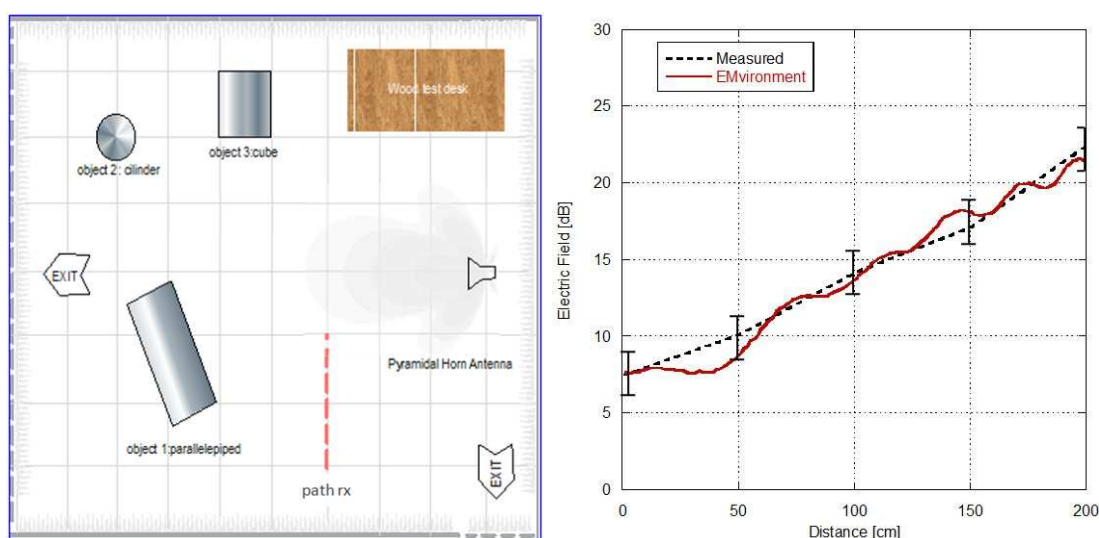
In entrambi i casi gli scenari di test sono stati costruiti disponendo degli oggetti metallici all'interno delle camere in modo da simulare gli edifici. Gli scenari sono stati successivamente implementati nel software *EMvironment* in maniera tale da eseguire i confronti fra i risultati simulati e misurati.

Per confrontare l'accuratezza dei risultati simulati con quelli misurati è stato calcolato l'errore medio e la deviazione standard. Il criterio di accuratezza considerato è basato su valori di deviazione standard minori o uguali a 6dB. Questo criterio è stato scelto in quanto è generalmente utilizzato nella letteratura scientifica [12][13].

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

### 3.2.1 Camera schermata

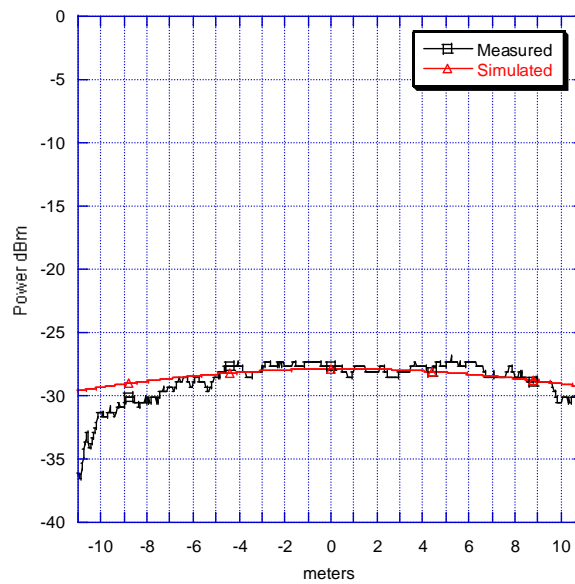
Le misure e le simulazioni sono state effettuate alla frequenza di 1.8GHz. Nelle seguenti Figura 3.7 a) e b) sono mostrati, rispettivamente, la vista in pianta dello scenario di test all'interno della camera schermata e gli andamenti del campo elettrico misurato e simulato. Sulla curva della misura sono anche riportati gli intervalli relativi alla fascia di incertezza a  $\pm 1.5\text{dB}$  che fu assunta come criterio di accuratezza. Dalla figura si può osservare un buon accordo fra l'andamento del campo misurato e quello simulato, il quale rientra nella fascia di incertezza considerata.



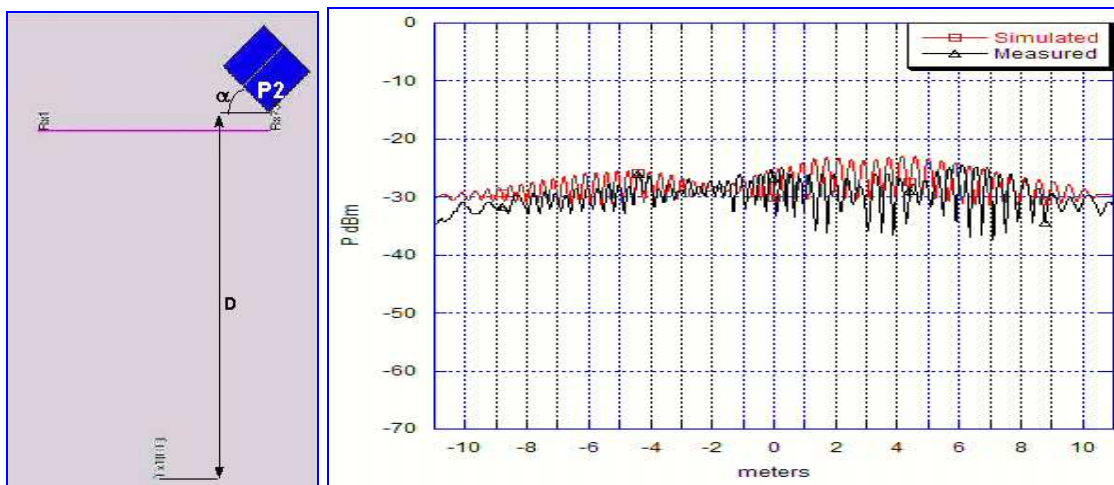
**Figura 3.7 - Scenario di test nella camera schermata e andamenti del campo elettrico misurato e simulato.**

### 3.2.2 Camera semi-anecoica

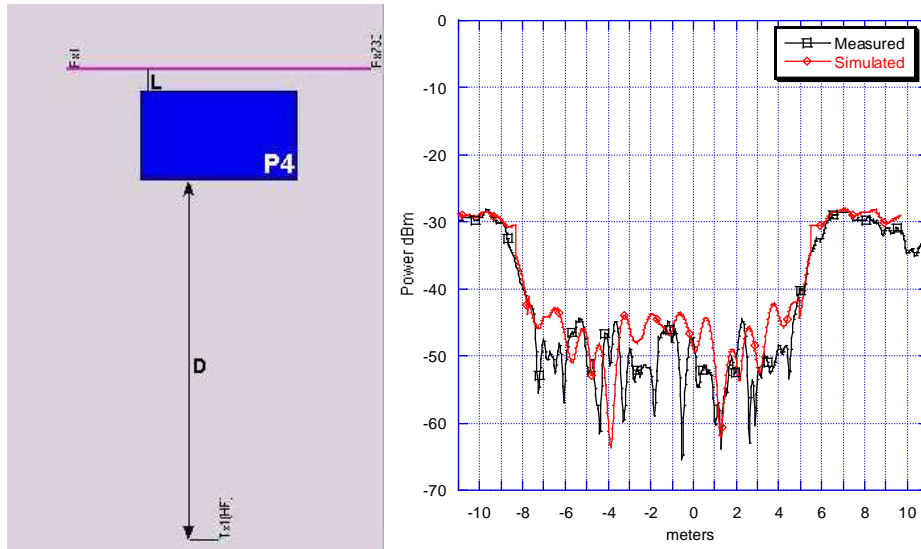
Le misure e le simulazioni sono state effettuate alla frequenza di 900MHz. Nella camera semi-anecoica sono stati costruiti degli scenari in cui la potenza ricevuta è stata misurata sia in condizioni di *Line of Sight* che in condizioni di *Non Line of Sight*. Gli scenari sono stati successivamente implementati nel software *EMvironment* in modo tale da effettuare i confronti fra risultati misurati e simulati. Le seguenti Figura 3.9 ÷ Figura 3.11 mostrano gli scenari e i relativi andamenti della potenza misurata e simulata.



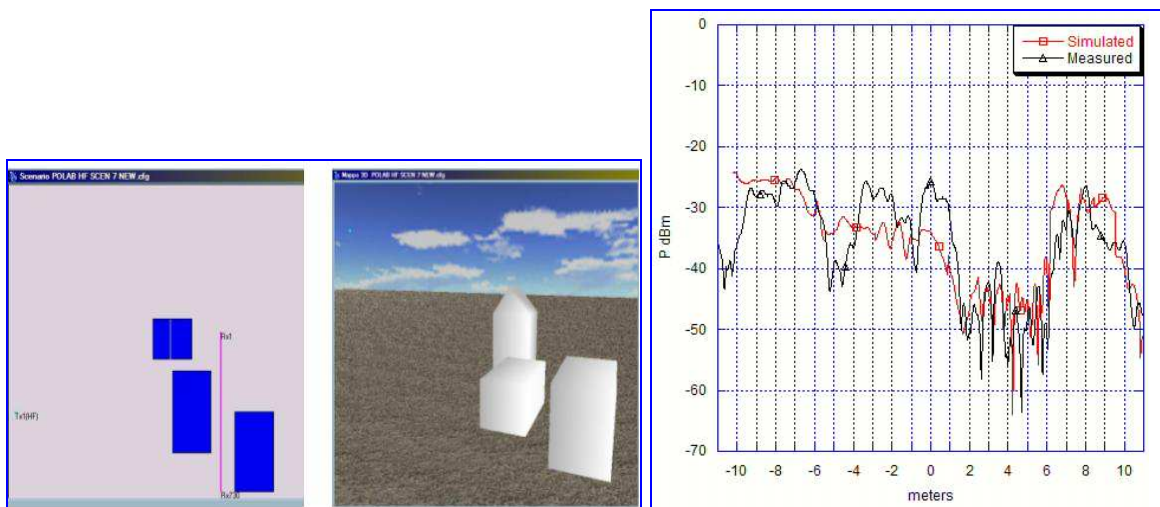
**Figura 3.8 - Andamenti della potenza misurata e simulata nello scenario tipo "Free Space" (solo raggio diretto e riflesso dal suolo).**



**Figura 3.9 - Schematizzazione dello scenario di test #1 e andamenti della potenza misurata e simulata.**




**Figura 3.10 - Schematizzazione dello scenario di test #2 e andamenti della potenza misurata e simulata.**



**Figura 3.11 - Schematizzazione dello scenario di test #3 e andamenti della potenza misurata e simulata.**

Nella seguente Tabella 3.1 sono riportati, per ogni scenario, i relativi valori di errore medio e deviazione standard dai quali si osserva come il criterio di accuratezza considerato sia sempre soddisfatto.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

Scenario	Errore medio [dB]	Deviazione standard [dB]
Tipo "Free Space"	0.77	1.04
#1	2.95	2.22
#2	5.15	4.74
#3	6.93	5.42

**Tabella 3.1 - Valori dell'errore medio e della deviazione standard relativi agli scenari di test.**

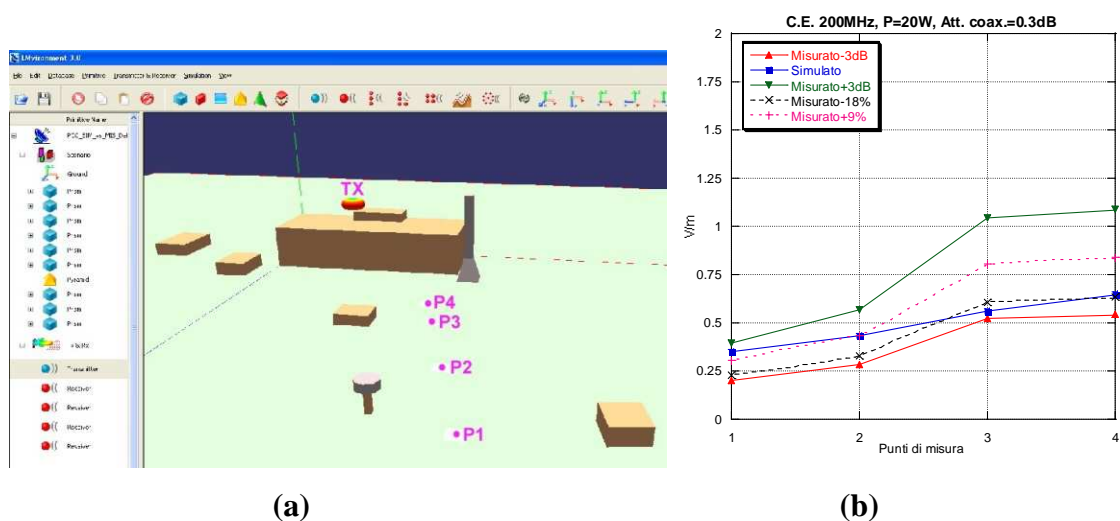
### **3.3 Confronti con misure outdoor**

Nell'ambito del progetto MEMPIS, svolto nel 2009 dal gruppo di lavoro dell'MRL, sono state effettuate delle campagne di misura che sono state utilizzate anche per la validazione delle previsioni dei livelli di campo elettromagnetico fornite dal software *EMvironment*. Tutte le misure svolte ed i relativi confronti con i risultati simulati sono descritti in [D4] di cui si riassumono le conclusioni: nei 23 punti di misura considerati (di cui 8 relativi a misure a banda larga e 15 a banda stretta) si è riscontrato che il software previsionale ha fornito valori di campo elettrico rientranti nella fascia a  $\pm 3$ dB relativa ai valori misurati nella quasi totalità dei casi presi in esame, tranne due casi relativi ai confronti fra simulazioni e misure a banda stretta. Si sottolinea che la fascia a  $\pm 3$ dB era il criterio di accuratezza richiesto dalla specifica tecnica del progetto. Di seguito si riportano, a titolo di esempio, due confronti fra simulazioni e misure a banda larga e a banda stretta.

#### **3.3.1 Confronto con misure a banda larga**

Nelle seguenti Figura 3.12 (a) e (b) sono mostrati, rispettivamente, lo scenario di misura ricostruito nel software *EMvironment* e il confronto fra i valori di campo misurati, con strumentazione a banda larga, e quelli simulati. Risulta evidente il buon accordo fra i valori misurati e quelli simulati che rientrano, peraltro, ampiamente all'interno della fascia  $\pm 3$ dB (e anche all'interno della fascia di incertezza di misura stimata in [D4]).





**Figura 3.12 - Scenario di misura a banda larga ricostruito in *EMvironment* (a) e confronto del campo elettrico misurato e simulato (b).**

### 3.3.2 Confronto con misure a banda stretta

La seguente Figura 3.13 mostra lo scenario, ricostruito nel software *EMvironment*, in cui è stata eseguita la misura a banda stretta. Nella seguente Tabella 3.2 sono riportati:

- il valore di campo elettrico misurato;
- i valori di campo elettrico misurato ottenuti dall'applicazione dell'incertezza di misura (stimata in [D4]);
- i valori di campo elettrico misurato ottenuti dall'applicazione della fascia  $\pm 3\text{dB}$ ;
- il valore di campo elettrico simulato.

Dalla tabella si osserva il buon accordo fra il campo elettrico misurato e simulato, il quale rientra sia all'interno della fascia a  $\pm 3\text{dB}$  che all'interno della fascia di incertezza di misura.

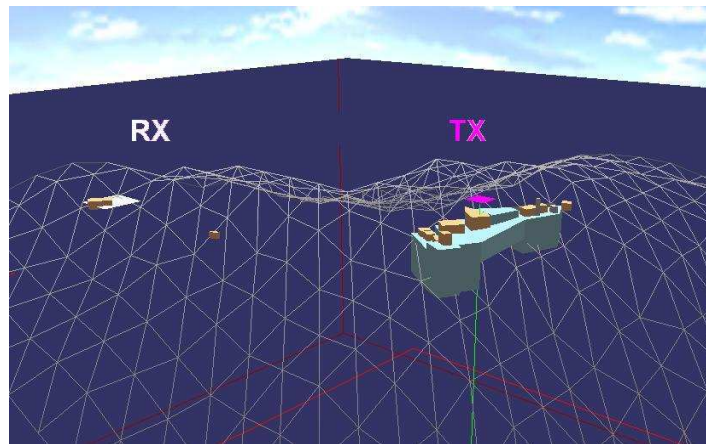


Figura 3.13 - Scenario di misura a banda stretta ricostruito nel software *EMvironment*.

Misura			Simulazione
$E_{MIS}$ 108.6 V/m	$E_{MIS} + 1.67dB$ 131.6 V/m	$E_{MIS} + 3dB$ 153.5 V/m	$E_{SIM}$ 123.9 V/m
	$E_{MIS} - 1.56dB$ 90.7 V/m	$E_{MIS} - 3dB$ 76.8 V/m	

Tabella 3.2 - Confronto fra il valore di campo elettrico misurato con strumentazione a banda stretta e simulato.

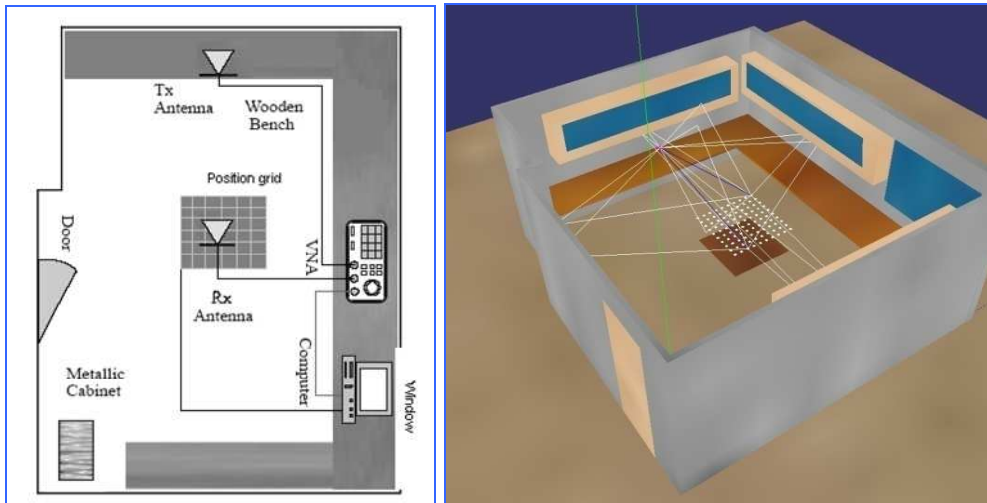
### 3.4 Confronti con misure di parametri derivati dal campo em

Il software *EMvironment* può essere utilizzato anche per ricavare alcuni parametri utilizzati per la caratterizzazione del canale di comunicazione radiomobile. I parametri considerati sono il PDP (*Power Delay Profile*) e la SF (*Spreading Function*). Tali parametri si ricavano elaborando i valori di campo elettrico simulato su più frequenze [14][15]. Pertanto, in questo paragrafo, si riporta il confronto dei suddetti parametri con quelli ottenuti da misure effettuate in ambienti realistici.

#### 3.4.1 Power Delay Profile

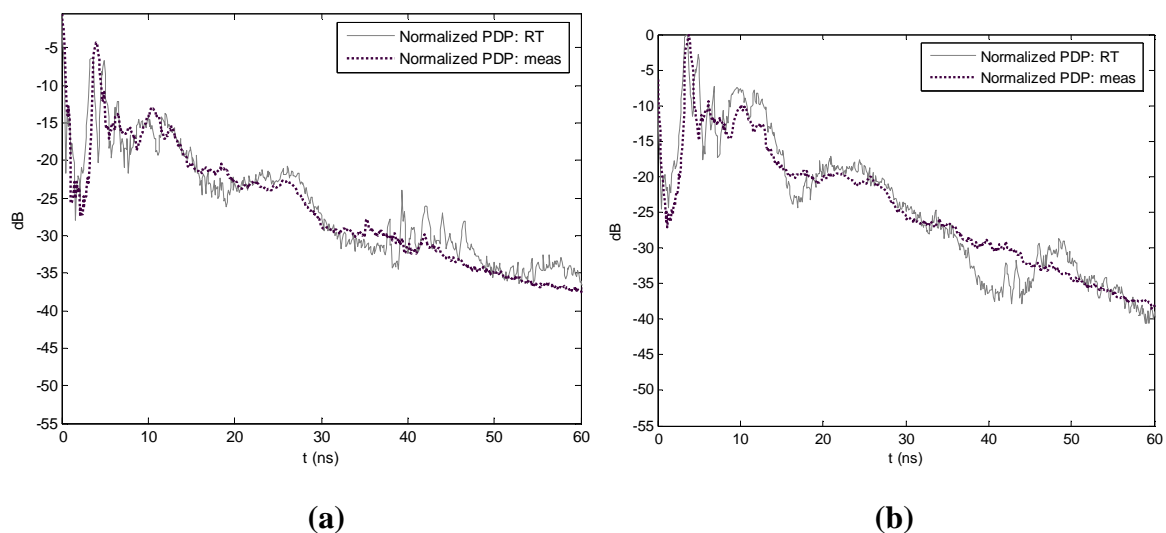
La misura del PDP è stata effettuata in uno ufficio del *Department of Engineering Science*, della *Oxford University* [14]. La piantina dell'ufficio e la sua implementazione nel software *EMvironment* sono visibili in Figura 3.14.






**Figura 3.14 - Piantina e ricostruzione dell'ufficio di misura nel software *EMvironment*.**

Nelle seguenti Figura 3.15 (a) e (b) sono mostrati i confronti degli andamenti del PDP misurato (riportato in [14]) e simulato, nel caso *Line of Sight* e *Non Line of Sight* rispettivamente. Dalle figure si riscontra un ottimo accordo fra le grandezze misurate e simulate in entrambi i casi.

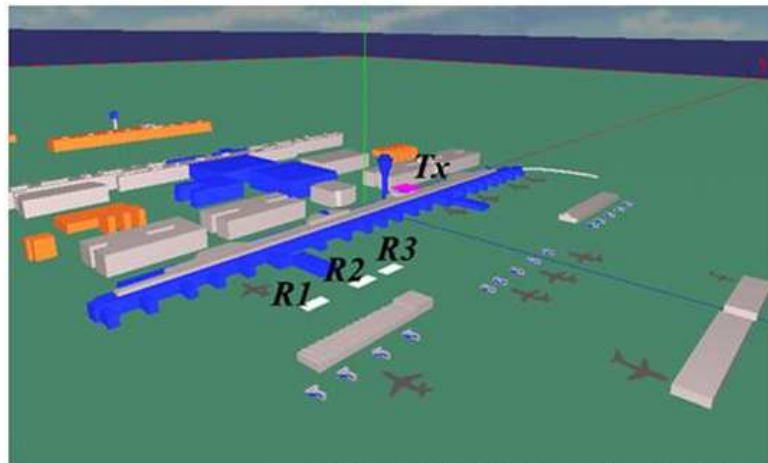


**Figura 3.15 - Andamento del PDP misurato e simulato nel caso di *Line Of Sight* (a) e *Non Line Of Sight* (b).**

	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

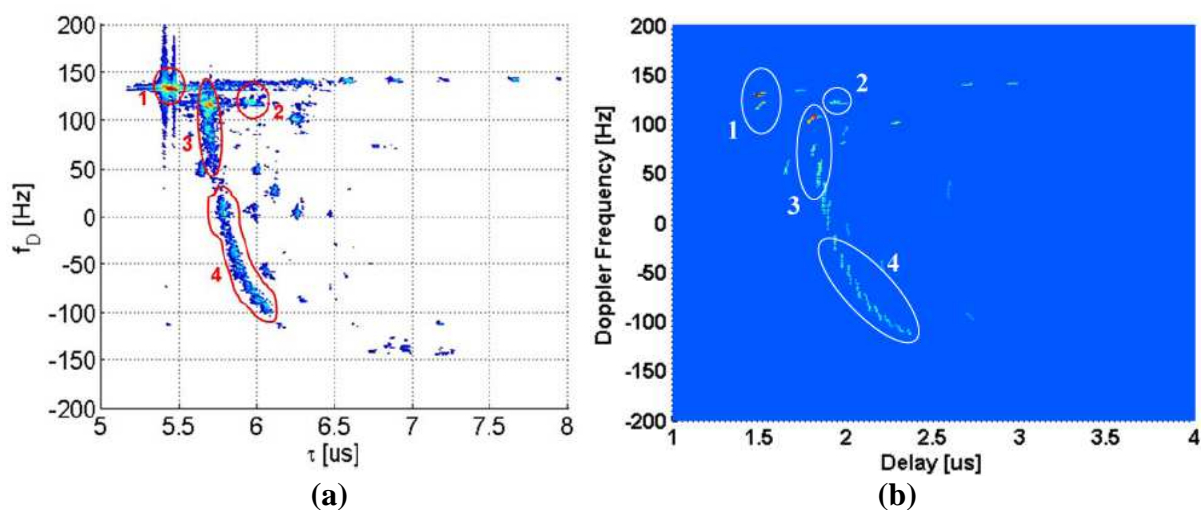
### 3.4.2 Spreading Function

La misura della SF è stata effettuata presso l'aeroporto di Monaco di Baviera [15]. La seguente Figura 3.16 mostra la ricostruzione dell'aeroporto nel software *EMvironment*.




**Figura 3.16 - Modellizzazione dell'aeroporto di Monaco di Baviera nel software *EMvironment*.**

Nelle seguenti Figura 3.17 (a) e (b) sono riportate la SF misurata, riportata in [15], e la SF simulata, confrontando le quali, risulta evidente come i risultati simulati siano in buon accordo con quelli misurati.




**Figura 3.17 - SF misurata (a) e simulata (b) dove non è stato considerato l'offset di 4μs introdotto dalla catena di misura.**

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIPL_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## CONCLUSIONI


Nel presente documento è stato dimostrato che il software previsionale *EMvironment* è conforme con la norma CEI 211-10 e risulta, pertanto, uno strumento idoneo al calcolo dei livelli di campo elettromagnetico in ambienti complessi. Infatti nella norma CEI 211-10 [D1] e nella sua Appendice G [D2] vengono descritti, rispettivamente, i metodi di calcolo da adottare per eseguire le previsioni dei valori del campo elettromagnetico e le prestazioni minime, che devono essere possedute dai software previsionali, per poter essere dichiarati idonei ad eseguire il calcolo dei valori di campo elettromagnetico. Dal confronto delle suddette indicazioni normative con gli algoritmi di calcolo del campo implementati nel software *EMvironment* e con le caratteristiche che questo possiede in termini di trattamento dei dati di ingresso e di rappresentazione grafica dei risultati, è risultata evidente la conformità dello stesso software con la norma.

Inoltre, è stata presentata una serie di confronti fra i risultati forniti dal software *EMvironment* e risultati presenti nella letteratura scientifica e acquisiti mediante misure, che ha dimostrato come *EMvironment* risulti uno strumento affidabile e accurato nell'effettuare la previsione dei livelli di campo elettromagnetico.

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons 1989.
- [2] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in Perfectly Conducting Surface", Proc. IEEE, Vol. 62, No 11, Nov. 1974, pp. 1448-1461.
- [3] A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio, G. Manara, Cap. 16 "Wireless Propagation Modeling by Using Ray-Tracing" del libro *Computational Electromagnetics*, curato dal Prof. R. Mittra, casa editrice Springer, 2013.
- [4] M. F. Catedra, J. Perez-Arriaga, *Cell Planning For Wireless Communication*, Artech House Publisher, 1999.
- [5] M. F. Catedra, J. Perez, F. Saez de Adana, O. Gutierrez, "Efficient Ray-Tracing Techniques for Three-Dimensional Analyses of Propagation in Mobile Communications: Application to Picocell and Microcell Scenarios", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 40, No. 2, April 1998.
- [6] A. A. Nanos, S. K. Goudos, K. Siakavara, T. Samaras, J. N. Sahalos, "Aperture array model for rapid assessment of Base Station Antennas near field based on half power beam width equivalence", Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE 2010.
- [7] A. Monorchio, S. Genovesi, S. Bertini, A. Brizzi, "An Efficient Interpolation Scheme for the Synthesis of Linear Arrays Based on Schelkunoff Polynomial Method", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 6, 2007.
- [8] D. Wójcik, "Evaluation of Near Field of the GSM Base Station Antennas in Urban Environment", 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2002.
- [9] M.C. Lawton, J.P. McGeehan, "The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small- Cell

 <b>MRL</b> Microwave Radiation Laboratory Progetto EMvironment	A. Corucci, P. Usai, A. Monorchio - <b>Autocertificazione Software EMvironment</b>		
	<b>Doc. Nr.</b> UNIFI_MRL/CEI/13_03_002	<b>Versione</b> 00	<b>Classifica</b> Non Classificato

*Environments*", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 43, N. 4, November 1994.

- [10] K. Sato, H. Kozima, H. Masuzawa, "*Measurements of Reflection Characteristics and Refractive Indices of Interior Construction Materials in Millimete-Wave Bands*", IEEE 45th Conference on Vehicular Technology, Vol.1, 1995.
- [11] K. Rizk, J.F. Wagen, F. Gardiol, "*Ray Tracing Based Path Loss Prediction In Two Microcellular Environments*", IEEE PIMRC, 1994.
- [12] C. Takahashi, Z. Yun, M. F. Iskander, G. Poilasne, "*Propagation-Prediction and Site-Planning Software for Wireless Communication Systems*", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 2, April 2007.
- [13] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "*Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design*", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 43, No. 4, November 1994.
- [14] G. Tiberi, S. Bertini, W. Q. Malik, A. Monorchio, D. J. Edwards, and G. Manara, "*Analysis of Realistic Ultrawideband Indoor Communication Channels by Using an Efficient Ray-Tracing Based Method*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 3, March 2009.
- [15] P. Usai, A. Corucci, A. Monorchio, S. Gligorevic, "*Estimation of Airport Surface Propagation Channel: Ray Tracing Model and Measurements*", European Conference of Antennas and Propagation, EUCAP2011, pp 1634-1638, Rome, 2011.