

Capítulo V – Validação

5.1

Introdução

Uma forma de avaliar se o modelo pode prever com precisão a propagação em um determinado canal é comparar seus resultados com dados reais obtidos através de campanhas de medição. Para tanto, o modelo deve, inicialmente, representar o ambiente utilizado nas campanhas.

Reproduzir um ambiente urbano, que possui uma grande quantidade de características que o torna único sob o ponto de vista da propagação de ondas, é uma tarefa muito difícil. Esta dificuldade é agravada pela relação de escala entre o comprimento de onda e o tamanho dos espalhadores em canais UWB utilizando ondas milimétricas, pois pequenos objetos podem produzir conexões viáveis. Todavia, esses diminutos objetos, em geral, podem passar despercebidos na modelagem.

5.2

Base de Dados Reais

Para avaliar o modelo proposto, foram selecionadas algumas campanhas de medições. A primeira campanha foi realizada no campus da Universidade de Nova York (NYU) pela equipe chefiada pelo professor T. S. Rappaport [110] entre os anos de 2011 e 2014. Foram utilizadas diversas faixas de frequências (28 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 73 GHz) em canais UWB e antenas diretivas e orientáveis do tipo corneta.

Outra campanha de medições utilizada foi a realizada pela equipe do projeto METIS 2020 [111] em Tóquio, no mesmo período da campanha em NYU. Esta campanha explorou a faixa de frequências de 26 GHz, ao longo de rotas definidas em um distrito no centro desta cidade.

A última campanha de medições selecionada foi executada pela equipe de propagação (SMARAD) da Aalto University School of Science and Technology da Finlândia, utilizando canais UWB nas faixas de 70 GHz e 80 GHz em ambientes externos [112], [113].

Em todas as posições, o Rx foi situado a 1,5 m do chão, considerado plano. As posições foram selecionadas ao longo de caminhos típicos de pedestres, sobre calçadas. Na campanha, foram utilizadas várias posições para o Tx, como indicado na Tabela 5.1. Contudo, apenas a posição grafada como COL1 foi utilizada nesta primeira simulação.

Tabela 5.1 – Localizações do Tx em coordenadas fornecidas pelo GPS.

Identificador do TX	Latitude (°) graus	Longitude (°) graus	Altura (m)
COL1	40.7270944	-73.9974972	7
COL2	40.7268833	-73.9970556	7
KAU	40.7290911	-73.9962500	17

O ambiente geral desta campanha de medições é o de uma microcélula urbana. Na região, existem os prédios de Manhattan em volta do campus, complexos de apartamentos, uma praça arborizada, árvores esparsas nas ruas e postes de iluminação em distâncias regulares (próximas das encontradas em Ipanema e Madri). Existem postes de trânsito nas esquinas, mas em quantidade menor que a observada anteriormente (usualmente, um por esquina). Os prédios em volta do campus têm entre sete e doze andares, o que parece ser regra. Como exceção, observa-se o complexo de apartamentos para alunos (dormitórios), que são os dois prédios paralelos ao centro da Figura 5.1, que possuem dezesseis andares. O Tx nomeado por COL1 (7 m de altura) estava localizado no topo de um centro esportivo, de apenas um andar. Nas fotos atuais do aplicativo Google Maps, este prédio não existe mais, sendo um espaço aberto. No lado esquerdo do Tx em COL1 há árvores com amplas copas bloqueando os raios que seguem em direção Norte.

A campanha utiliza um sinal UWB de 800 MHz de largura de banda, transmitindo uma sequência binária pseudoaleatória. Na recepção, cada medida individual do PDP do canal foi gravada para a obtenção um PDP médio a partir das vinte amostras anteriores. O nível de potência recebido é obtido pela integração da área sob a curva do PDP médio e cada nível de potência obtido é utilizado para a obtenção de uma curva de melhor ajuste, baseada no algoritmo dos mínimos quadrados. Cada canal analisado corresponde a uma localização de Rx, lembrando que apenas a posição grafada como COL1 foi utilizada nesta primeira simulação. Na Tabela 5.2, abaixo, está representada a perda em propagação calculada para cada canal,

com a utilização da curva de melhor ajuste e da distância absoluta (não retificada) entre os transceptores.

Tabela 5.2 – Identificação e localização dos locais do Rx e suas situações em relação ao Tx COL1 (com ou sem visada).

Identificador do TX	Identificador do Rx	Latitude (°) graus	Longitude (°) graus	Situação	Distância não retificada (3D) entre Tx e Rx (m)	Perda em percurso (dB)
COL1	1	40.7273222	-73.9973000	Visada	31	92.3
COL1	2	40.7275417	-73.9970833	Sem visada	61	123.8
COL1	3	40.7279056	-73.9980556	Visada	102	*
COL1	4	40.7280750	-73.9980167	Sem visada	118	136.4
COL1	5	40.7269861	-73.9988417	Sem visada	114	115.6
COL1	6	40.7295000	-73.9978889	Sem visada	270	-
COL1	7	40.7298361	-73.9976167	Sem visada	305	-
COL1	8	40.7297444	-73.9971278	Sem visada	296	-
COL1	9	40.7303444	-73.9983000	Sem visada	368	-
COL1	10	40.7286694	-73.9955139	Sem visada	242	-
COL1	11	40.7287806	-73.9957667	Sem visada	238	-
COL1	12	40.7300500	-73.9957083	Sem visada	362	-
COL1	13	40.7281139	-73.9966750	Sem visada	133	132.9
COL1	14	40.7283472	-73.9964389	Sem visada	165	137.1
COL1	15	40.7285319	-73.9973250	Sem visada	159	-
COL1	16	40.7287500	-73.9973000	Sem visada	185	-
COL1	17	40.7278333	-73.9975000	Sem visada	82	148.1
COL1	18	40.7301222	-73.9945389	Sem visada	419	-
COL1	19	40.7302361	-73.9948806	Sem visada	413	-
COL1	20	40.7302833	-73.9958972	Sem visada	379	-
COL1	21	40.7299306	-73.9954500	Sem visada	360	-
COL1	22	40.7290528	-73.9940278	Sem visada	365	-
COL1	23	40.7295556	-73.9946806	Sem visada	362	-
COL1	24	40.7289722	-73.9948361	Sem visada	306	-
COL1	25	40.7285361	-73.9943917	Sem visada	307	-

(-) Sem sinal significativo; (*) Desconsiderado pela equipe de medições.

O maior desafio nesta comparação do modelo proposto com os dados obtidos na campanha de medições é a modelagem do ambiente do campus da NYU e seus arredores. Para ajudar nesta etapa, foi utilizado o código de edição de cenários incorporado ao modelo e o software Google Earth, que mostra o cenário da Figura 5.2, obtido a partir de fotos de satélite no ano de 2016. Presume-se que poucas modificações nos prédios e vegetação podem ter ocorrido no curto espaço de tempo entre as medições e a foto de satélite. O posicionamento das árvores e postes não

foi feito de forma uniforme, como nos outros mapas. Foram posicionados de forma a se aproximarem das características reais do cenário. As dimensões dos postes e árvores utilizados foram as mesmas do cenário de Ipanema, pois exibem semelhanças encontradas nas fotos de rua. O resultado final da representação do campus da NYU pode ser visto na Figura 5.3.



Figura 5.2 – Imagem do campus da NYU e arredores, que possibilitou a distribuição das árvores e demais elementos espalhadores. Fonte: Google Maps.

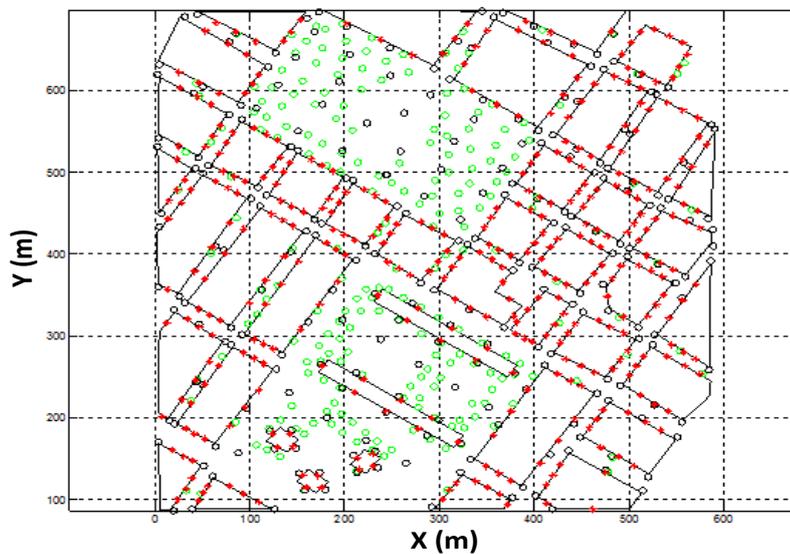


Figura 5.3 – Representação do campus da NYU. Linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas.

Inicialmente foram simulados os canais com o Tx na posição COL1. Nesta posição, o Tx possui um grande elemento bloqueador de raios que partem em direção ao Norte e Leste, que são os dois prédios de dormitórios na região central. Assim, apenas dois canais simulados possuem visada direta. No restante dos canais,

os níveis de perda são bastante elevados e em muitos casos são considerados como sem sinal presente. Inicialmente, o algoritmo traça os raios de todos os mecanismos em cada canal. Em seguida, aplica a modelagem eletromagnética para encontrar a função de transferência do canal, na banda escolhida. Segundo a campanha de medidas, foi detectado sinal apenas em sete canais (1, 2, 4, 5, 13, 14 e 17). Pode-se, após a simulação, verificar que, nos canais em que foi detectado sinal, efetivamente há um número muito maior de raios traçados em comparação aos canais sem sinal. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram casos típicos de canais com e sem sinal detectado na campanha de medições.

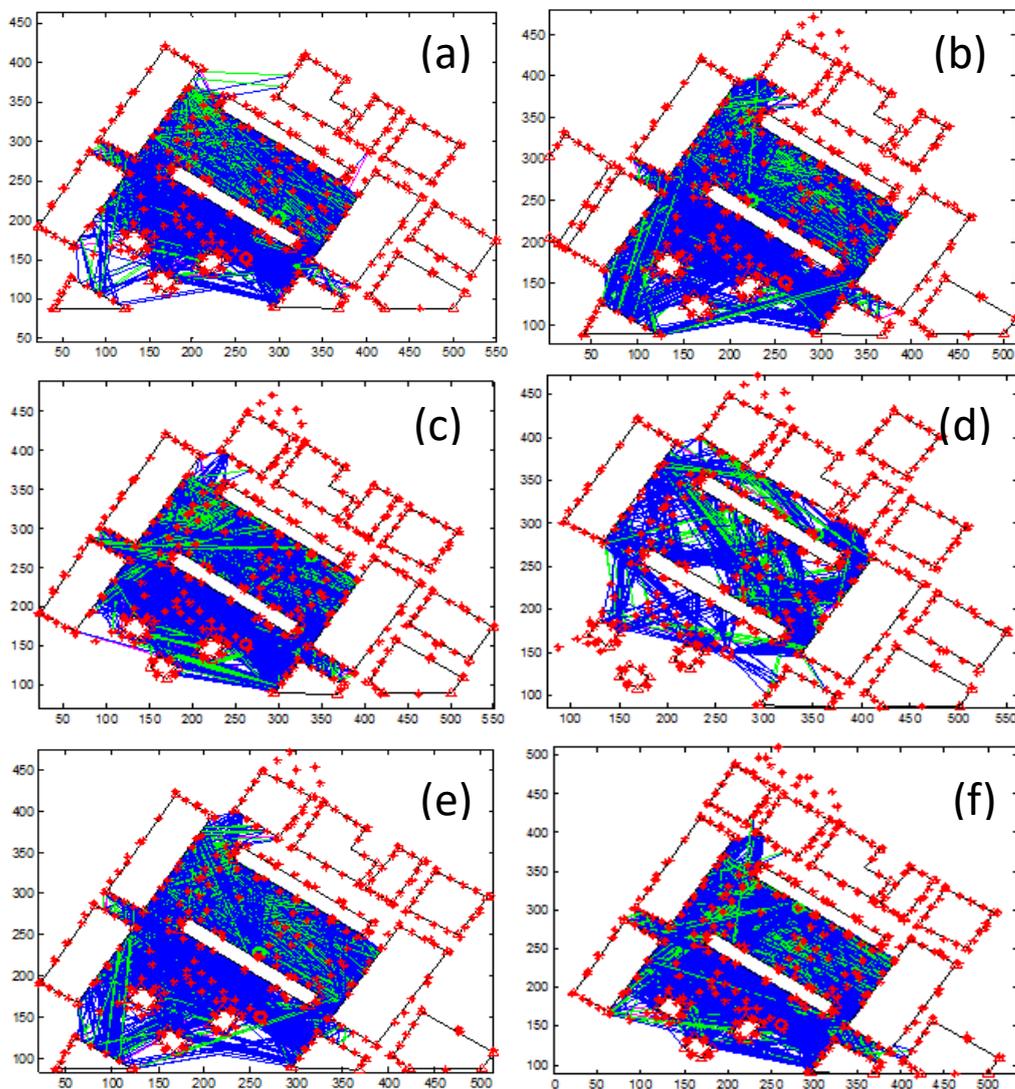


Figura 5.4 – Traçado de raios nos canais (eixos em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam os resultados dos traçados de raios no: (a) canal 2; (b) canal 4; (c) canal 13; (d) canal 14; (e) canal 17; e (f) canal 15, que não apresentou sinal na medição.

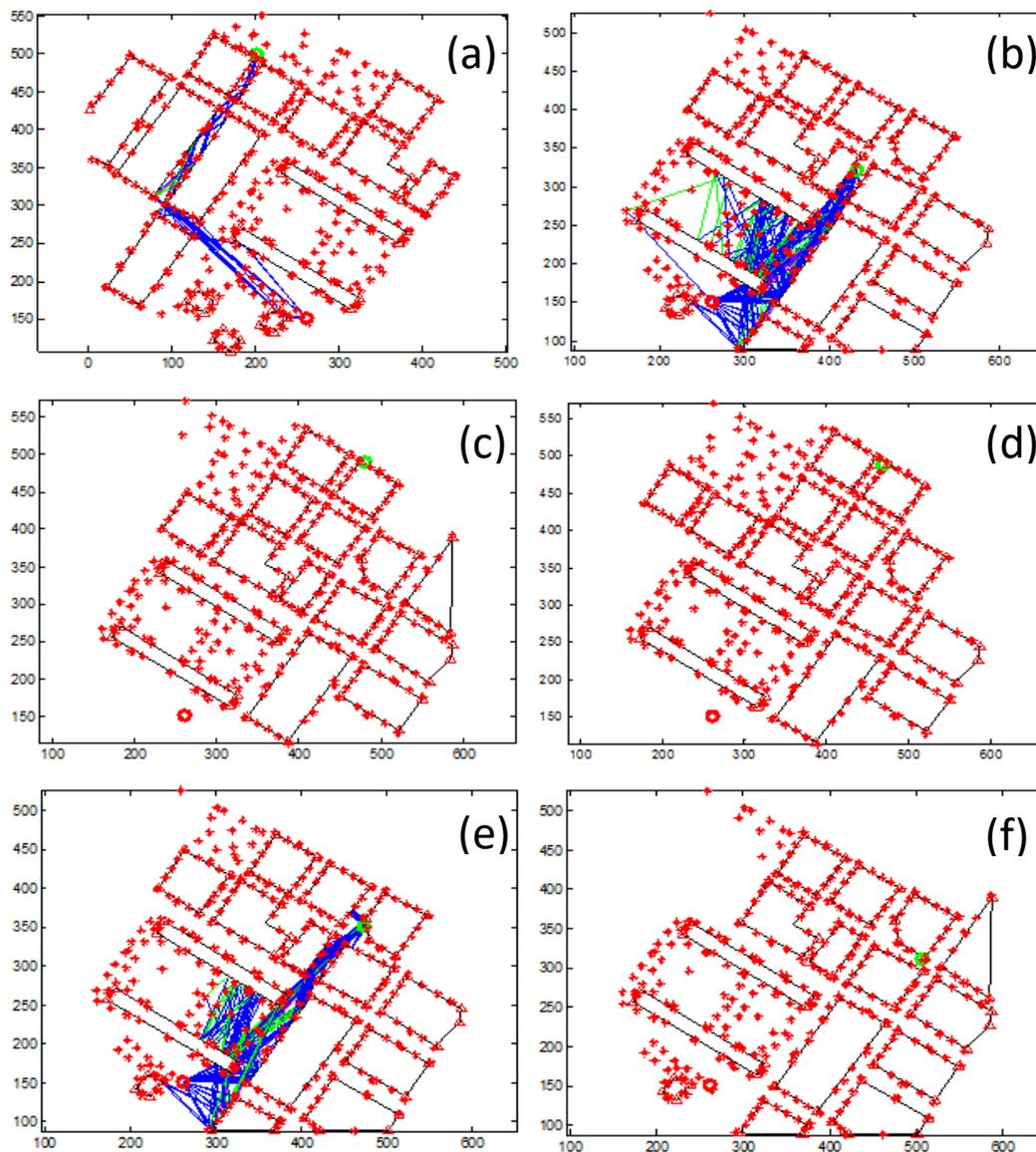


Figura 5.5 – Traçado de Raios nos canais (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 9; (b) canal 10; (c) canal 18; (d) canal 19; (e) canal 24; e (f) canal 25.

É importante salientar que as Figuras 5.4 e 5.5, podem não mostrar necessariamente a totalidade de construções do ambiente, de modo a melhorar a experiência visual. De fato, a representação gráfica do ambiente completo usaria uma escala muito pequena, dificultando a visualização. Os transeptores não estão nas bordas externas do cenário completo, como indicado pelas Figuras, em alguns casos.

Os canais próximos aos dois prédios de dormitórios possuem grande quantidade de raios traçados em comparação aos demais. As construções ao redor permitem que a energia se propague através de múltiplas reflexões e espalhamento. Na

modelagem destes canais, foram traçados dezenas de milhares de raios. Os demais canais, que são mais afastados do Tx, possuem um número expressivamente menor, com algumas centenas e em alguns casos nenhum raio traçado, o que concorda com os dados coletados pela equipe do Prof. Rappaport [114], que não detectou o sinal em vários canais. Alguns poucos canais possuem milhares de raios traçados, embora os dados da medição apontem que não foi detectado sinal, é o caso do canal 15, representado na Figura 5.4. Na seção 5.7 são apontados alguns possíveis motivos para essa discrepância entre a grande quantidade de raios traçados no canal 15 e a ausência de sinal na medição deste canal.

O próximo passo é aplicar os modelos de propagação descritos no Capítulo IV de forma apropriada a cada raio e obter a função de transferência. Em seguida, aplica-se a transformada inversa de Fourier para se obter o perfil de potência e retardos (PDP). Posteriormente, os PDPs assim obtidos são integrados numericamente para determinar o nível de potência associado. Na campanha de medições, foi utilizada apenas a componente vertical do campo. Os principais parâmetros utilizados pelo algoritmo durante a simulação estão descritos na Tabela 5.3 abaixo.

Tabela 5.3 – Parâmetros de configuração da simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade
Largura do feixe de meia potência do Tx	11	Graus
Largura do feixe de meia potência do Rx	11	Graus
Velocidade da luz no vácuo	3,00E+08	m/s
Permissividade do ar	8,85E-12	F/m
Permissividade do relativa do solo	3	
Permissividade relativa das faces dos prédios	3	
Condutividade do solo	0,015	S/m
Condutividade das faces dos prédios	0,015	S/m
Pressão atmosférica total	1033	hPa
Temperatura	20	°C
Densidade de vapor de água	7,3	g/m ³
Desvio padrão das rugosidades das paredes	0,075	mm
Número de interações (máxima ordem dos raios)	8	
Frequência inicial	28	GHz
Largura da faixa de frequências	800	MHz
Potência do Tx (VV e HH)	30	dBm
Ganho Tx e Rx	24,5	Db

Inicialmente, a simulação calcula a resposta em frequência de cada canal, o PDP e executa a integração numérica. O cálculo é feito para as componentes vertical e horizontal do campo. Os resultados da simulação dos canais 2 e 3 podem ser visualizados nas Figura 5.6 e 5.7, que mostram as funções de transferência e seus respectivos PDPs. A comparação dos resultados medidos com os simulados pode ser vista na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Comparações entre dados medidos e simulados para cada posição do Rx.

Posição do TX	Posição do Rx	Situação	Perda de percurso medida (dB)	Perda de percurso simulada (dB)
COL1	1	Visada	92.3	98.1
COL1	2	Sem visada	123.8	127.6
COL1	3	Visada	descartado	105.9
COL1	4	Sem visada	136.4	144.8
COL1	5	Sem visada	115.6	107.2
COL1	6	Sem visada	-	164.0
COL1	7	Sem visada	-	172.5
COL1	8	Sem visada	-	182.8
COL1	9	Sem visada	-	191.7
COL1	10	Sem visada	-	170.4
COL1	11	Sem visada	-	163.2
COL1	12	Sem visada	-	0.0
COL1	13	Sem visada	132.9	124.4
COL1	14	Sem visada	137.1	146.7
COL1	15	Sem visada	-	118.3
COL1	16	Sem visada	-	183.4
COL1	17	Sem visada	148.1	139.5
COL1	18	Sem visada	-	0.0
COL1	19	Sem visada	-	0,0
COL1	20	Sem visada	-	176.6
COL1	21	Sem visada	-	0.0
COL1	22	Sem visada	-	0.0
COL1	23	Sem visada	-	0.0
COL1	24	Sem visada	-	162.2
COL1	25	Sem visada	-	0.0

Os resultados da simulação apresentam uma boa concordância geral com os medidos. No canal 1, em visada, há uma diferença significativa (de 5,8 dB) entre

os resultados. Este valor está um pouco acima do desvio padrão encontrado na campanha de medições, que foi de 3,6 dB [114]. Outro canal, de número 3, também está em visada e apresentou valores apreciáveis de potência, embora na campanha de medições não tenha sido considerado. O canal 15 apresentou o pior resultado comparativo: 118,3 dB na simulação e não sendo detectada potência na medição. Um dos possíveis motivos pode ser o posicionamento ligeiramente diferente do Rx na representação ou ainda um possível bloqueio causado por um espalhador não modelado na simulação.

A Figura 5.8 compara os valores de perdas de propagação medidos e simulados. O erro RMSE calculado foi de 7,58 dB.

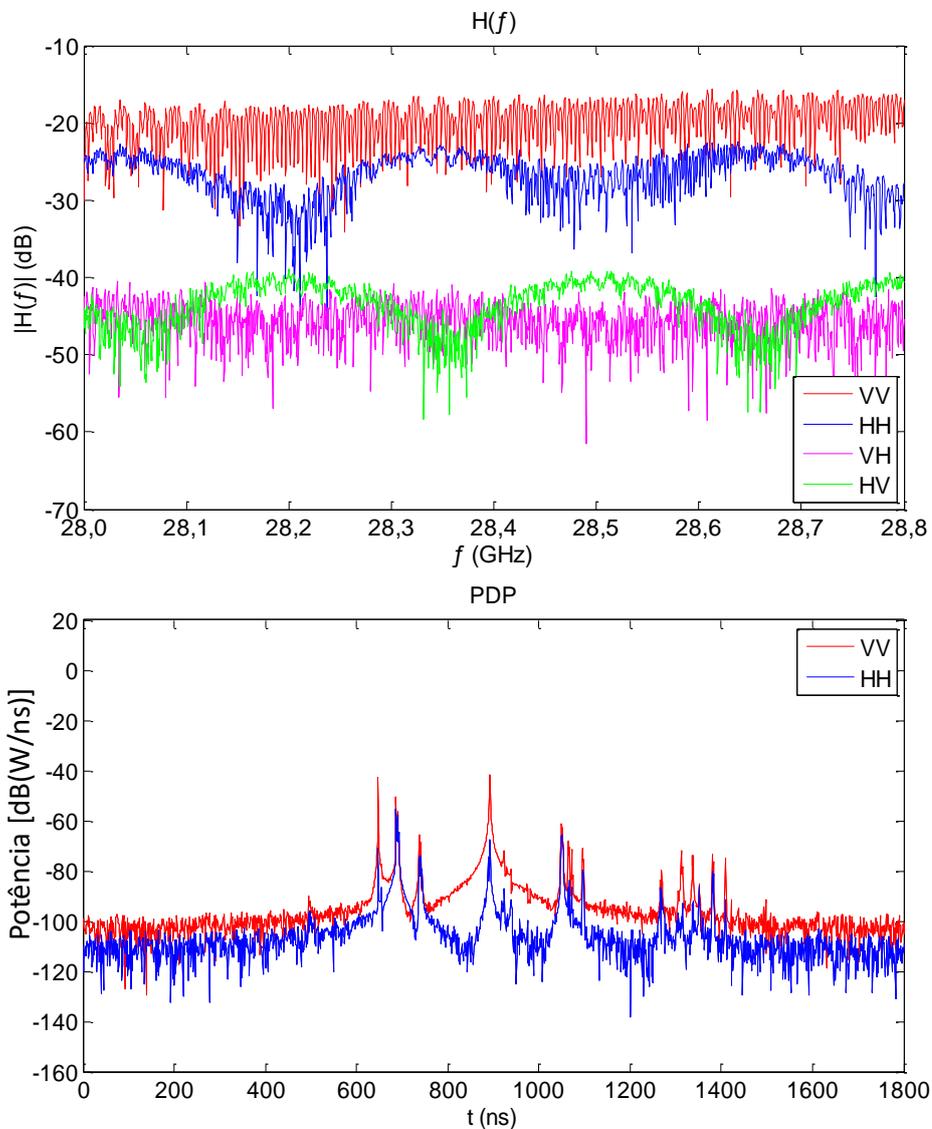


Figura 5.6 – Função de transferência e perfil de potência e retardos para o canal 2.

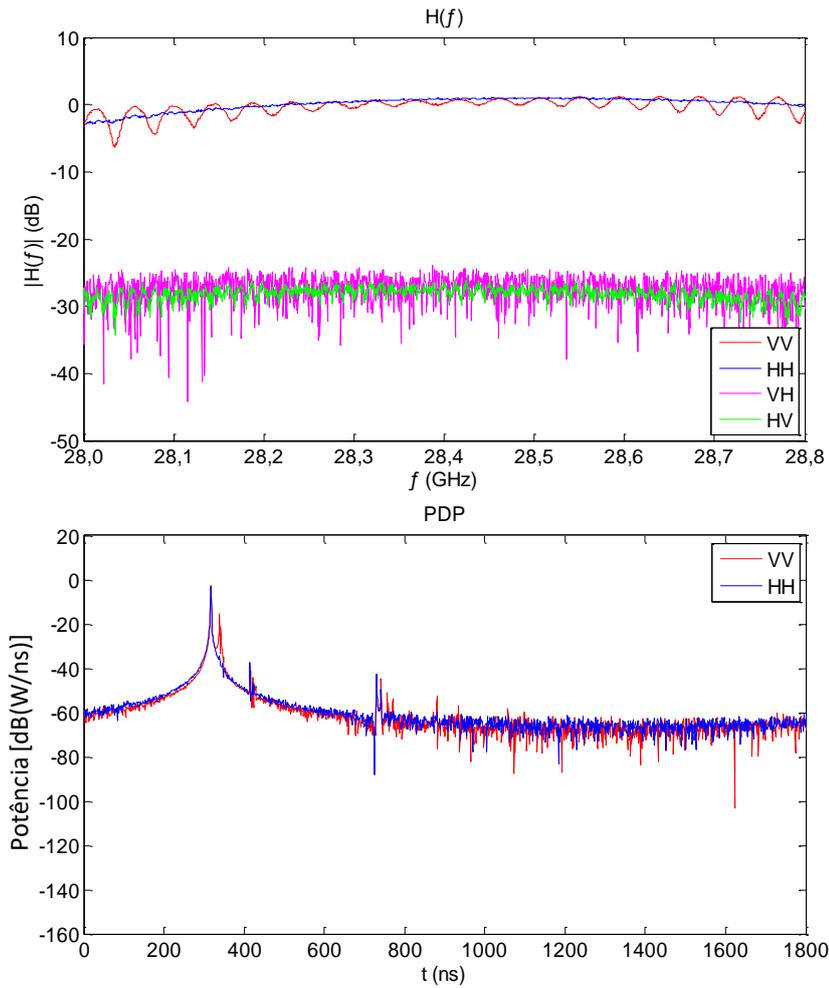


Figura 5.7 – Função de transferência e perfil de potência e retardos para o canal 3.

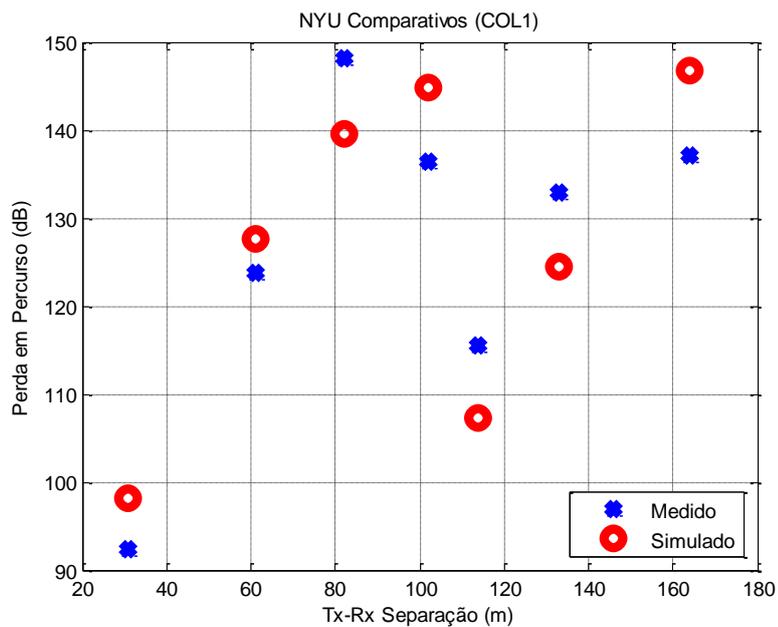


Figura 5.8 – Comparação entre os valores simulados pelo presente modelo e medidos (apresentados na referência [114]).

5.4

Campanha de medições II

Posteriormente, foram simulados os canais em que o Tx está na posição identificada como KAU com o Tx a 17m do solo, situada na sacada de um prédio que obstrui o sinal transmitido para as regiões Sul e Oeste, sendo rodeado por prédios próximos (Figura 5.1). Apenas três canais possuem visada (11, 30 e 31). Entretanto, esta campanha possui dez canais com sinais recebidos (4, 10, 11, 12, 14, 16, 19, 21, 30 e 31), número superior ao da simulação COL1 (anterior). O traçado de raios em alguns canais pode ser visto nas Figuras 5.9 e 5.10.

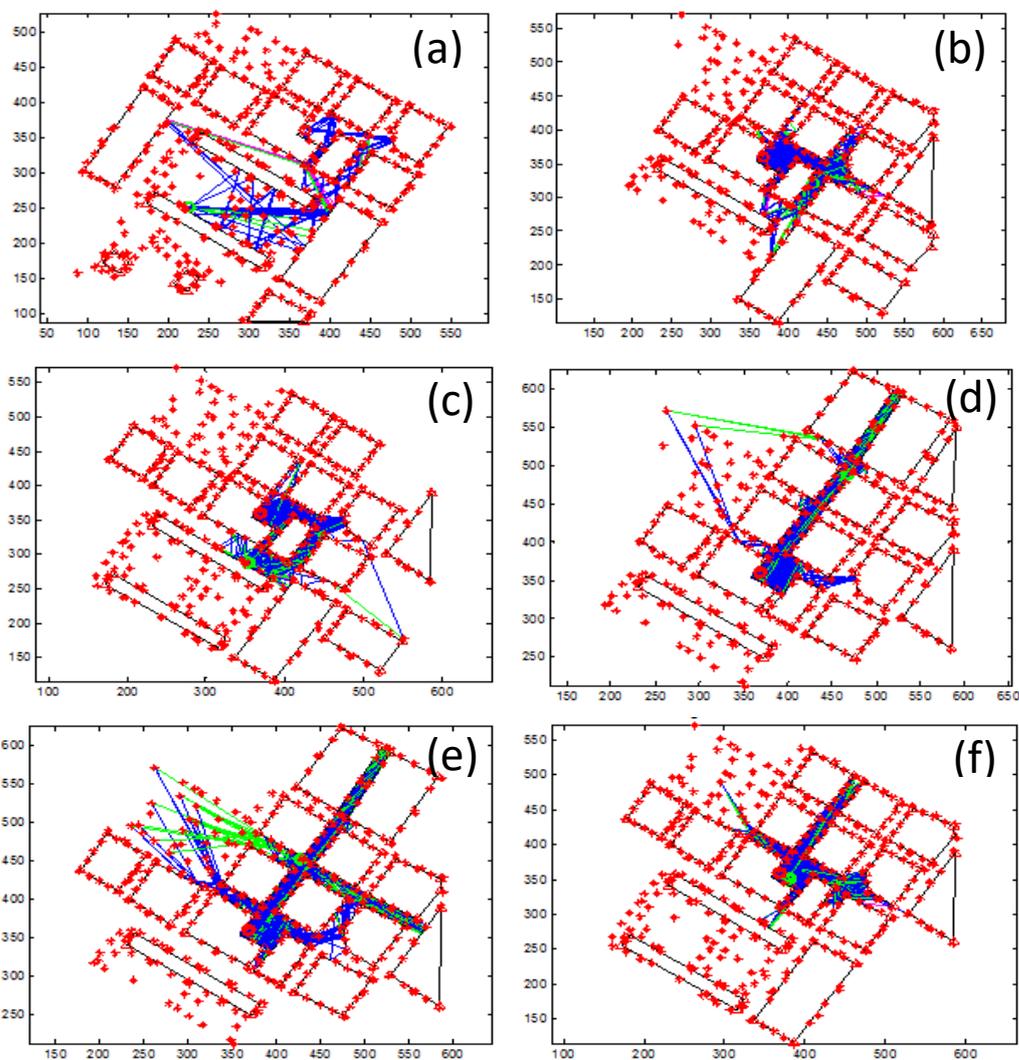


Figura 5.9 – Traçado de Raios nos canais (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 4, (b) canal 10, (c) canal 14, (d) canal 19, (e) canal 21 e (f) canal 31.

Foram utilizados os mesmos parâmetros da simulação I. Basicamente, os canais são os mesmos, com a adição dos canais 30 e 31, conforme observado na Figura 5.1. Estes dois canais apresentam visada e estão próximos do Tx.

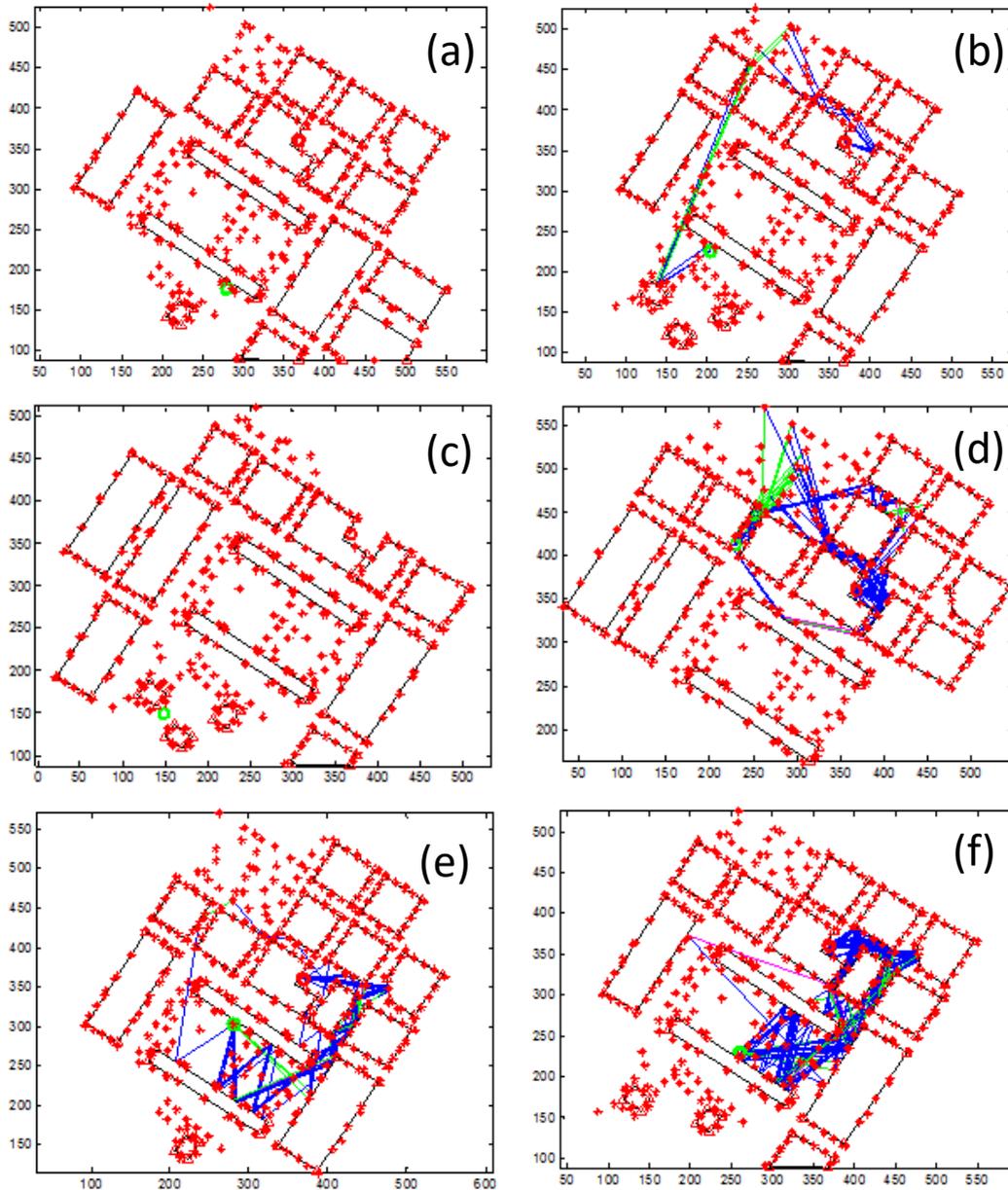


Figura 5.10 – Traçado de Raios nos canais onde não foi detectado sinal na campanha de medições (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 1, (b) canal 3, (c) canal 5, (d) canal 6, (e) canal 15 e (f) canal 17.

Outra diferença é a altura do Tx, agora a 17 m do nível do solo. O Rx é mantido na mesma altura de 1,5 m em relação ao solo utilizada na primeira simulação.

Foram obtidos resultados gerais parecidos com os da primeira simulação, observando-se boas concordâncias com os valores experimentais. A Tabela 5.5 compara os resultados.

Tabela 5.5 – Comparações entre dados medidos e simulados para KAU.

Posição do TX	Posição do Rx	Situação	Perda de percurso medida (dB)	Perda de percurso simulada (dB)
KAU	1	Sem visada	-	0.0
KAU	2	Sem visada	-	183.1
KAU	3	Sem visada	-	187.9
KAU	4	Sem visada	149.2	139.1
KAU	5	Sem visada	-	0.0
KAU	6	Sem visada	-	169.0
KAU	7	Sem visada	-	175.4
KAU	8	Sem visada	-	162.5
KAU	9	Sem visada	-	165.3
KAU	10	Sem visada	124.2	133.9
KAU	11	Visada	102.1	107.1
KAU	12	Sem visada	140.0	151.4
KAU	13	Sem visada	-	176.6
KAU	14	Sem visada	127.0	136.6
KAU	15	Sem visada	-	168.2
KAU	16	Sem visada	140.0	149.6
KAU	17	Sem visada	-	172.6
KAU	18	Sem visada	-	178.2
KAU	19	Sem visada	137.0	139,8
KAU	20	Sem visada	-	169.5
KAU	21	Sem visada	118.0	122.4
KAU	22	Sem visada	-	168.0
KAU	30	Visada	94.6	97.0
KAU	31	Visada	88.4	93.5

Os canais 4 e 12 apresentaram os piores resultados comparativos, com erros superiores ao desvio padrão de 10 dB, calculado em [114] para os canais sem visada nesta faixa de frequências. A dificuldade de estabelecer precisamente a causa das diferenças entre os valores medidos e simulados pode ser compreendida de forma qualitativa, pela grande descorrelação apresentada pelas amostras nos canais medidos, conforme indica a Figura 5.11, reproduzida de [114]. De uma forma geral, as

diferenças observadas podem ser creditadas à modelagem geométrica do ambiente e ao desconhecimento dos reais parâmetros eletromagnéticos dos seus elementos.

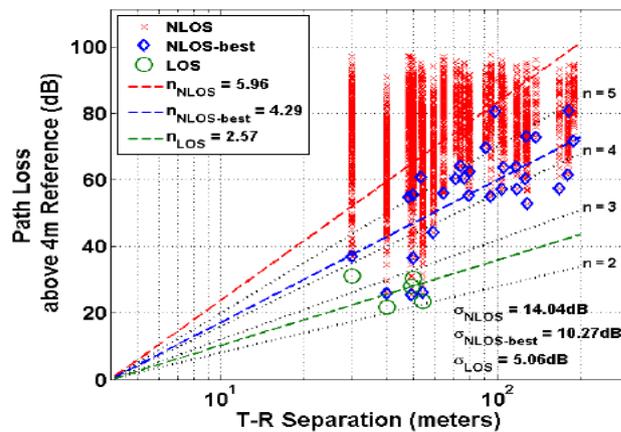


Figura 5.11 – Gráfico da perda em propagação, baseado nas medições nos canais da simulação KAU. Reproduzida de [119].

Em apenas dois canais simulados não foram traçados raios. Em todos os outros, a simulação encontrou valores de potência, ainda que pequenos. As Figuras 5.12 e 5.13 mostram funções de transferência e PDPs para alguns canais e a Figura 5.14 apresenta um gráfico comparativo entre os valores medidos e simulados para a perda de percurso, onde o erro RMSE foi de 7,01 dB.

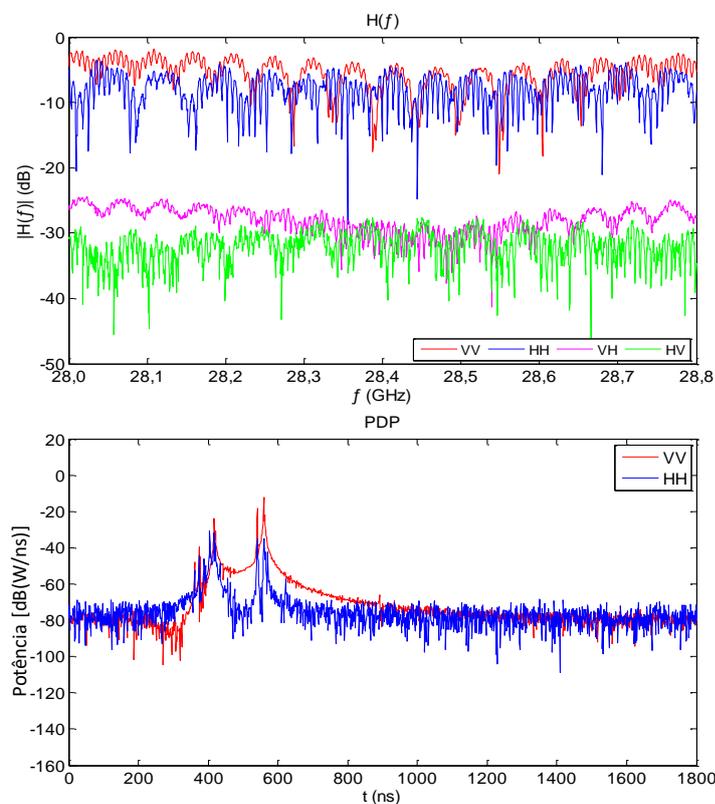


Figura 5.12 – Função de transferência e perfil de potência e retardos do canal 10.

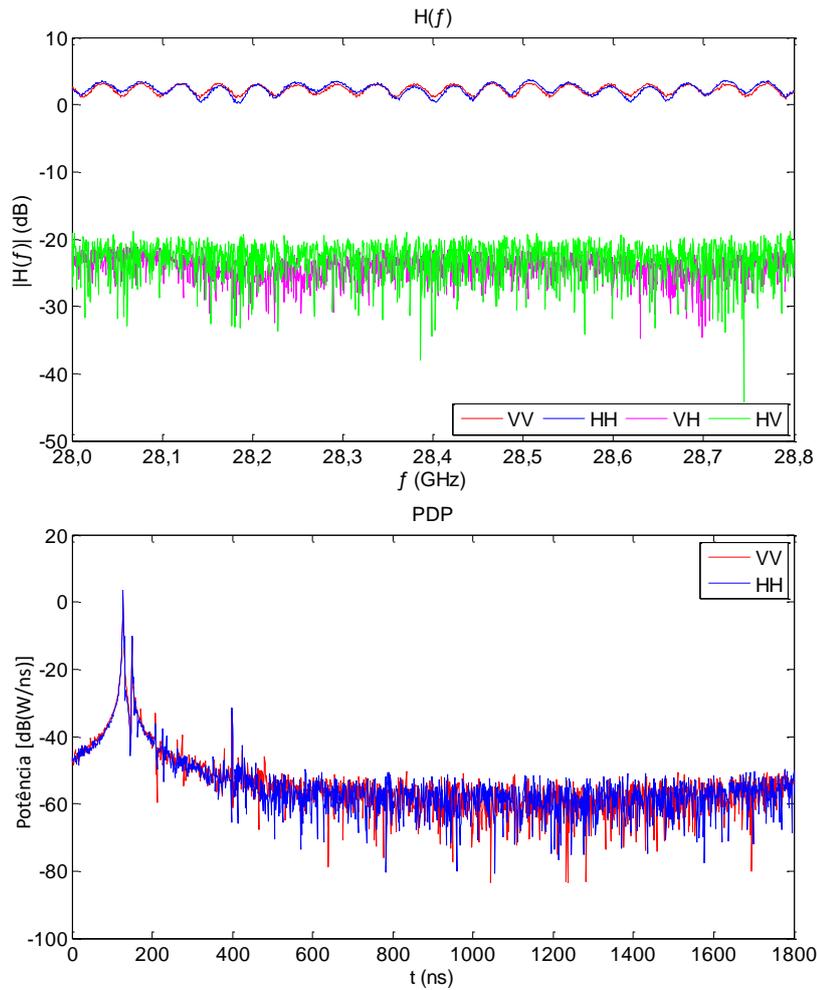


Figura 5.13 – Função de transferência e perfil de potência e retardos do canal 11.

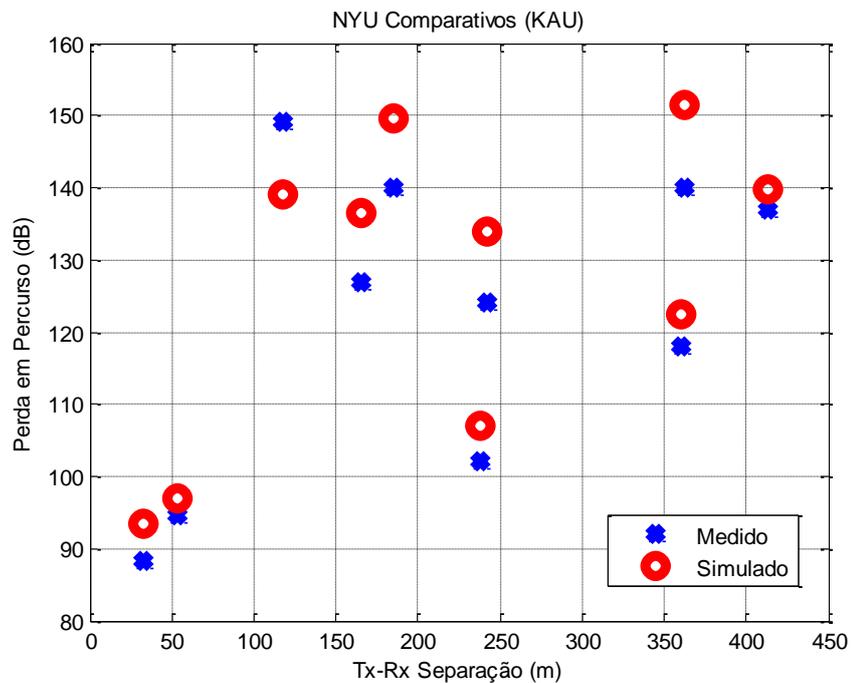


Figura 5.14 – Gráfico Comparativo entre valores medidos e simulados para a perda de percurso nos canais associados ao Tx em KAU.

5.5

Campanha de medições III

Esta campanha corresponde às medições de perda de percurso realizadas no centro da cidade de Tóquio (no distrito de Nihonbashi) pelo grupo de pesquisadores do METIS 2020 [111], utilizando a frequência de 26,4 GHz em um tom contínuo (CW). O ambiente é densamente povoado, com muitos prédios de dez ou mais andares. Pode ser classificado como típico de uma Microcélula Urbana (UMi). As medições da campanha foram efetuadas em rotas predefinidas com o Tx nas alturas de 10,0 m, 6,0 m e 1,5 m acima do solo e o Rx nas alturas de 2,5 m e 1,5 m acima do solo. Informações sobre o local e rotas podem ser vistas na Figura 5.15.

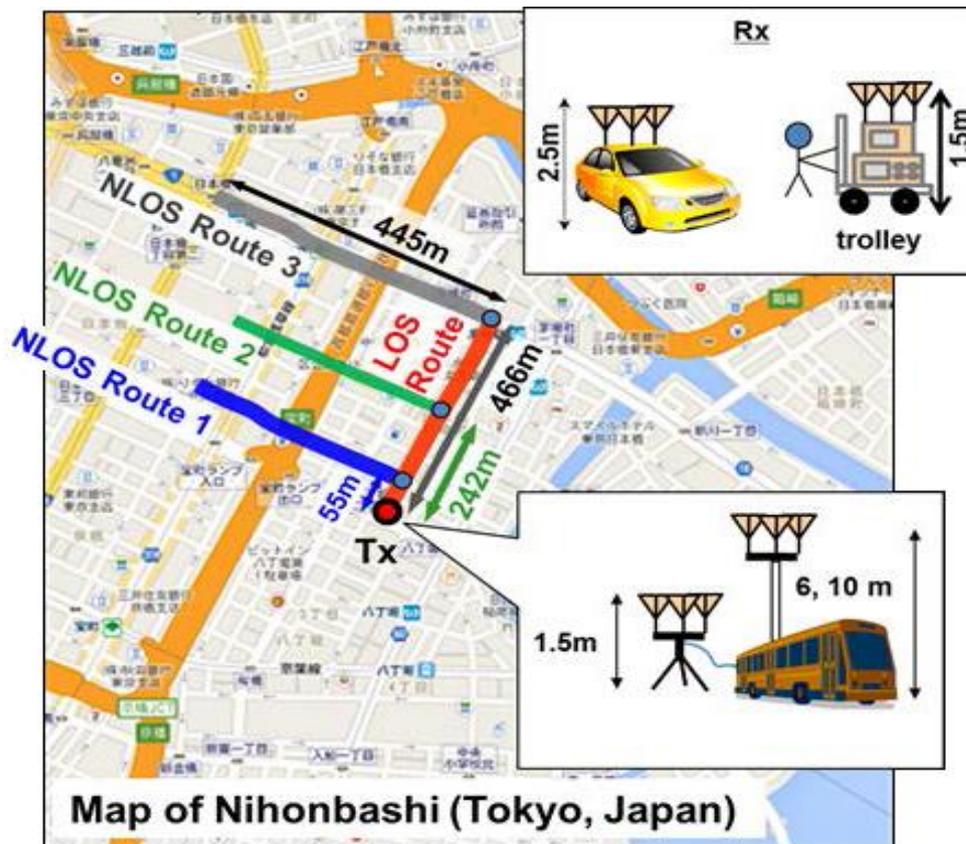


Figura 5.15 – Mapa do distrito de Nihonbashi, no centro de Tóquio e as rotas utilizadas na campanha de medições, com escalas em metros. O painel superior mostra que, para a altura do Rx igual a 2,5 m, foi utilizada uma antena posicionada em cima de um automóvel e, para a altura de 1,5 m, foi utilizado um pequeno carro movido por um técnico. O painel inferior mostra o posicionamento do Tx em um tripé em cima de um caminhão, para as alturas de 1,5 m e superiores, respectivamente. Reproduzida de [111].

O Tx ficou fixo na posição $35^{\circ}40'36.8''\text{N}$ e $139^{\circ}46'35.0''\text{E}$, marcada em vermelho no mapa da Figura 5.15. O Rx foi deslocado ao longo de rotas previamente estabelecidas. Uma visão geral da área real pode ser vista na Figura 5.16.



Figura 5.16 – Panorama geral da região de Nihonbashi, densamente urbanizada. Fonte: Google Maps.

Para a validação, foi escolhida a rota NLOS 1, marcada em azul na Figura 5.15. A rota segue por uma avenida larga, sem visada em nenhum ponto. A avenida é arborizada. Os postes estão localizados nos canteiros centrais e nas esquinas. Em algumas transversais, existem postes de distribuição de energia, do tipo parecido ao utilizado em Ipanema. As árvores são frondosas, lembrando as de NYU, e estão localizadas principalmente nas avenidas. São raras nas ruas transversais, como se pode ver na Figura 5.17.

A representação do ambiente seguiu os mesmos critérios adotados para os outros ambientes. Na Figura 5.18, pode-se ver a representação do ambiente utilizado nas simulações. Os parâmetros utilizados na simulação podem ser vistos na Tabela 5.6.



Figura 5.17 – Panorama aproximado da região de Nihonbashi, com árvores localizadas principalmente nas avenidas. Fonte: Google Maps.

Durante o traçado de raios, os canais iniciais apresentaram muitos raios oriundos de reflexões nas paredes. Estes raios, oriundos de reflexões especulares, apresentaram maior quantidade de energia. À medida que o Rx se afasta do Tx, pode-se notar o gradativo aumento da quantidade de raios provenientes de outros mecanismos. Em especial, devidos ao espalhamento não especular ao longo das paredes dos prédios que estão voltadas para a avenida e aos raios oriundos do espalhamento por árvores e postes, presentes nas calçadas e no canteiro central, respectivamente. A Figura 5.19 apresenta o traçado de raios em vários canais da rota NLOS 1.

As mesmas considerações da seção 5.3 podem ser aplicadas à Figura 5.19. Ou seja: (1) podem não mostrar necessariamente a totalidade de construções no ambiente pelos mesmos motivos; e (2) os transceptores não estão nas bordas externas dos cenários, embora a figura possa transmitir esta impressão, em alguns casos.

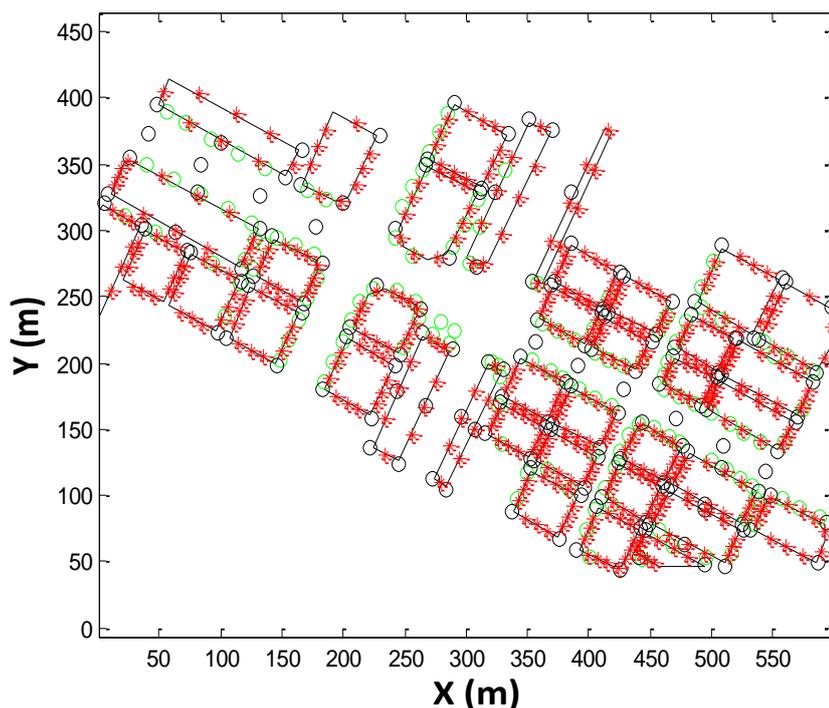


Figura 5.18 – Representação do ambiente utilizado na simulação III, com prédios no entorno da avenida utilizada na rota NLOS 1. As linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas que representam as paredes dos prédios.

Tabela 5.6 – Parâmetros de configuração da simulação em Nihonbashi.

Parâmetro	Valor	Unidade
Largura do feixe de meia potência do Tx	20	graus
Largura do feixe de meia potência do Rx	20	graus
Velocidade da luz no vácuo	3,00E+08	m/s
Permissividade do ar	8,85E-12	F/m
Permissividade relativa do solo	3	
Permissividade relativa das faces dos prédios	3	
Condutividade do solo	0,015	S/m
Condutividade das faces dos prédios	0,015	S/m
Pressão atmosférica total	1033	hPa
Temperatura	20	°C
Densidade de vapor de água	7,3	g/m ³
Desvio padrão das rugosidades das paredes	0,075	mm
Número de iterações (máxima ordem dos raios)	8	
Frequência inicial	26,4	GHz
Largura da faixa de frequências	100	kHz
Potência Tx (VV e HH)	1	W
Ganho Tx e Rx	18,0	dB

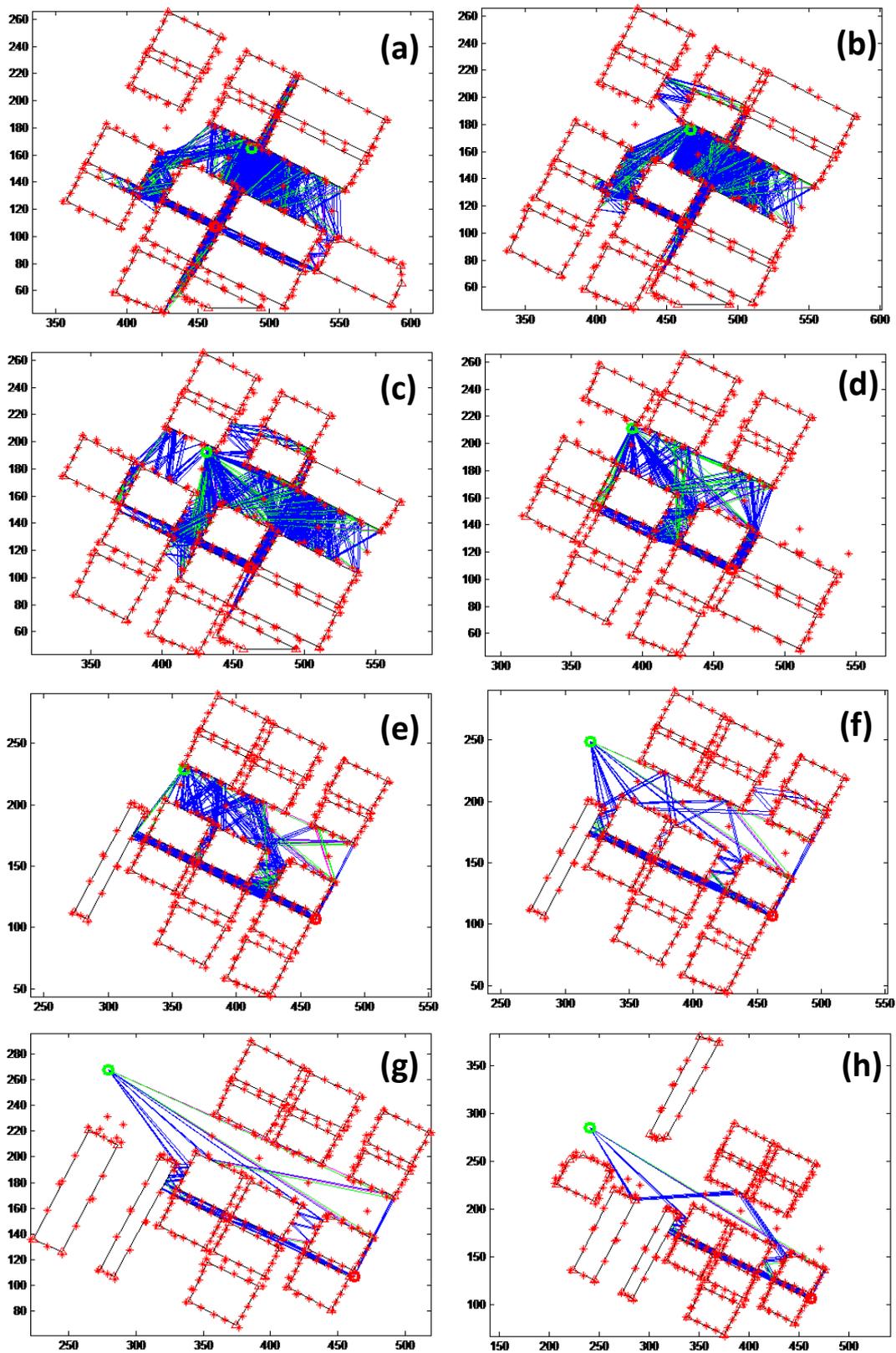


Figura 5.19 – Traçado de raios em alguns canais (escalas em metros). As linhas pretas são as faces dos prismas, as linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 5; (b) canal 7; (c) canal 9; (d) canal 13; (e) canal 15; (f) canal 20; (g) canal 21; e (h) canal 22.

Em seguida calculou-se a função de transferência nos canais e foi possível notar alguns efeitos que correspondem às observações sobre propagação na faixa milimétrica. O primeiro efeito diz respeito ao isolamento (XPD) entre as componentes lineares do campo copolarizado (VV, HH) e cruzado (VH, HV), que é tipicamente alta, podendo alcançar dezenas de decibéis [115]. Em todos os canais simulados o valor do XPD ficou sempre acima de 35 dB. Outro efeito, o intenso espalhamento [116], [117], pode ser observado nas componentes do campo cruzado, pois a modelagem do espalhamento, tal como observado no Capítulo IV, produz grande despolarização, ao considerar que um campo incidente produz componentes lineares ortogonais de mesmo módulo. A Figura 5.20 compara os valores simulados e medidos para a potência recebida. A estatística RMSE entre valores medido e simulado mostrou um erro de 8,2 dB.

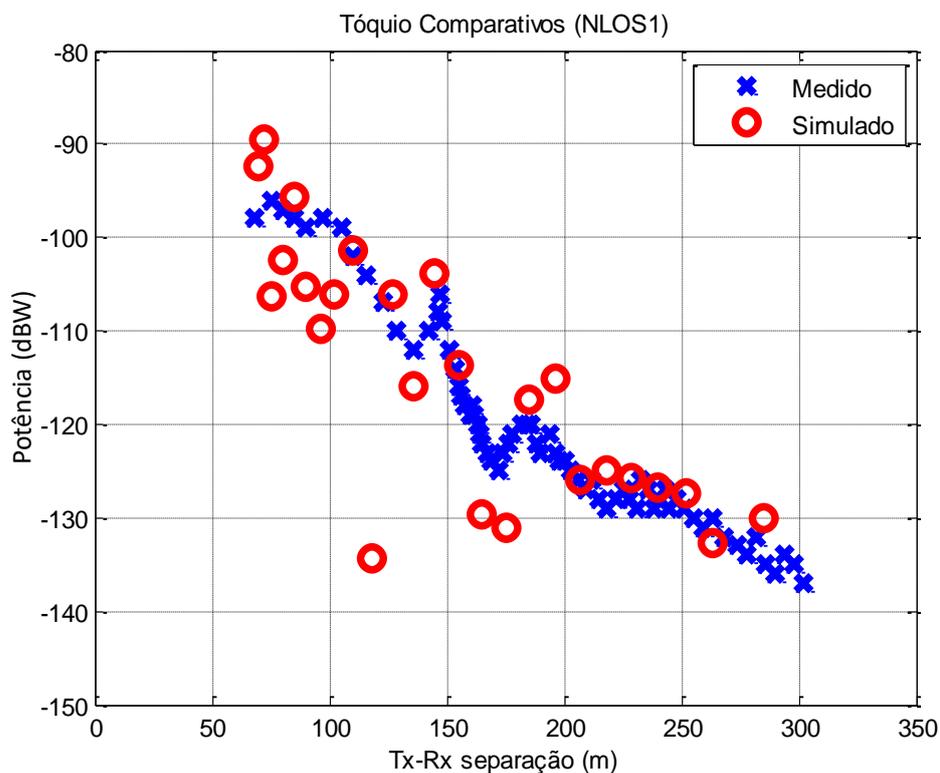


Figura 5.20 – Comparação entre valores da potência recebida entre percursos medido e simulado para a rota NLOS 1 em Tóquio, adaptada da referência [111].

5.6

Campanha de medições IV

Esta campanha foi conduzida no verão de 2013, no mesmo local da campanha I, nas proximidades do campus da NYU e descrita em detalhes nos trabalhos [110] e [118]. Foi utilizado um *setup* semelhante ao da medição anterior, mas na frequência de 73 GHz. As principais diferenças referem-se à mudança de frequência de operação e aos transceptores usados, que agora possuem uma largura de meia potência de 7° e ganho máximo de 27 dBi. O Rx foi colocado em locais diferentes dos anteriores. A Figura 5.21 mostra as novas posições utilizadas para o Rx.

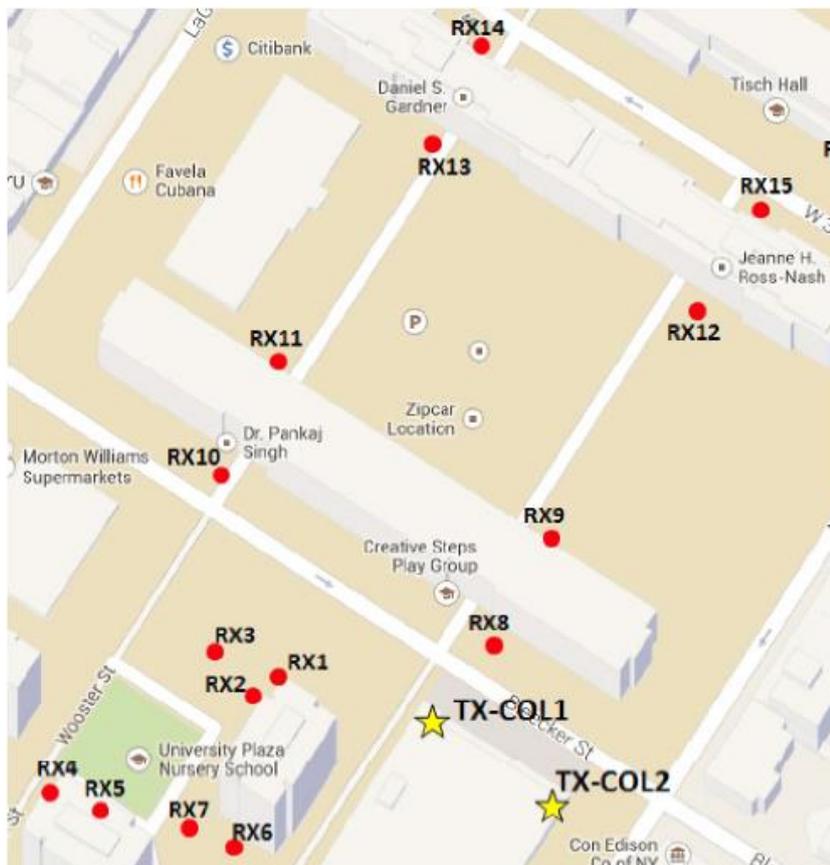


Figura 5.21 – Mapa das posições do Tx e Rx no campus da NYU. Estrelas amarelas indicam as posições do Tx e pontos vermelhos as posições do Rx. Reproduzida de [118].

Na medição, o Rx foi colocado a 2 m e 4 m do solo. Nesta tese, foi utilizada apenas a altura de 2 m. Em relação aos transmissores, as mesmas posições e considerações feitas na seção 5.3 se aplicam aqui. Foi utilizada a posição COL1, a mesma da campanha I.

Basicamente, o Rx está agora em posições mais próximas ao Tx do que na primeira campanha. Foi utilizada a potência de 14,6 dBm para o Tx, mais baixa que o valor de 30 dBm utilizado nas outras campanhas em NYU. Com base nas mesmas ferramentas e procedimentos de modelagem de ambientes das seções anteriores, foram traçados raios nos 15 canais e calculadas suas funções de transferência, perfis de potência e retardos e perdas de propagação, utilizando os parâmetros de simulação apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Parâmetros de configuração da simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade
Largura do feixe de meia potência do Tx	7	graus
Largura do feixe de meia potência do Rx	7	graus
Velocidade da Luz no Vácuo	3,00E+08	m/s
Permissividade do ar	8,85E-12	F/m
Permissividade do relativa do solo	3	
Permissividade relativa das faces dos prédios	3	
Condutividade do solo	0,015	S/m
Condutividade das faces dos prédios	0,015	S/m
Pressão atmosférica total	1033	hPa
Temperatura	20	°C
Densidade de vapor de água	7,3	g/m3
Desvio padrão das rugosidades das paredes	0,075	mm
Número de iterações (máxima ordem dos raios)	8	
Frequência inicial	73	GHz
Largura da faixa de frequências	800	MHz
Potência Tx (VV e HH)	14,6	dBm
Ganho Tx e Rx	27,0	dBi

Foram utilizados transeptores com larguras de feixe de meia potência de 7°, o que causa uma grande filtragem espacial dos multipercursos. Pode-se notar os efeitos correspondentes nos resultados das simulações, que contrastam com as outras campanhas em NYU, que apresentam funções de transferência e um perfis de potência e retardo com grande quantidade de pequenas contribuições de vários mecanismos. Na presente campanha, as funções de transferência apresentam-se mais suaves e com uma quantidade menor de raios de maior potência (picos no PDP). O traçado de raios e a função de transferência e PDP calculados para vários canais podem ser vistos nas Figuras 5.22 e 5.23.

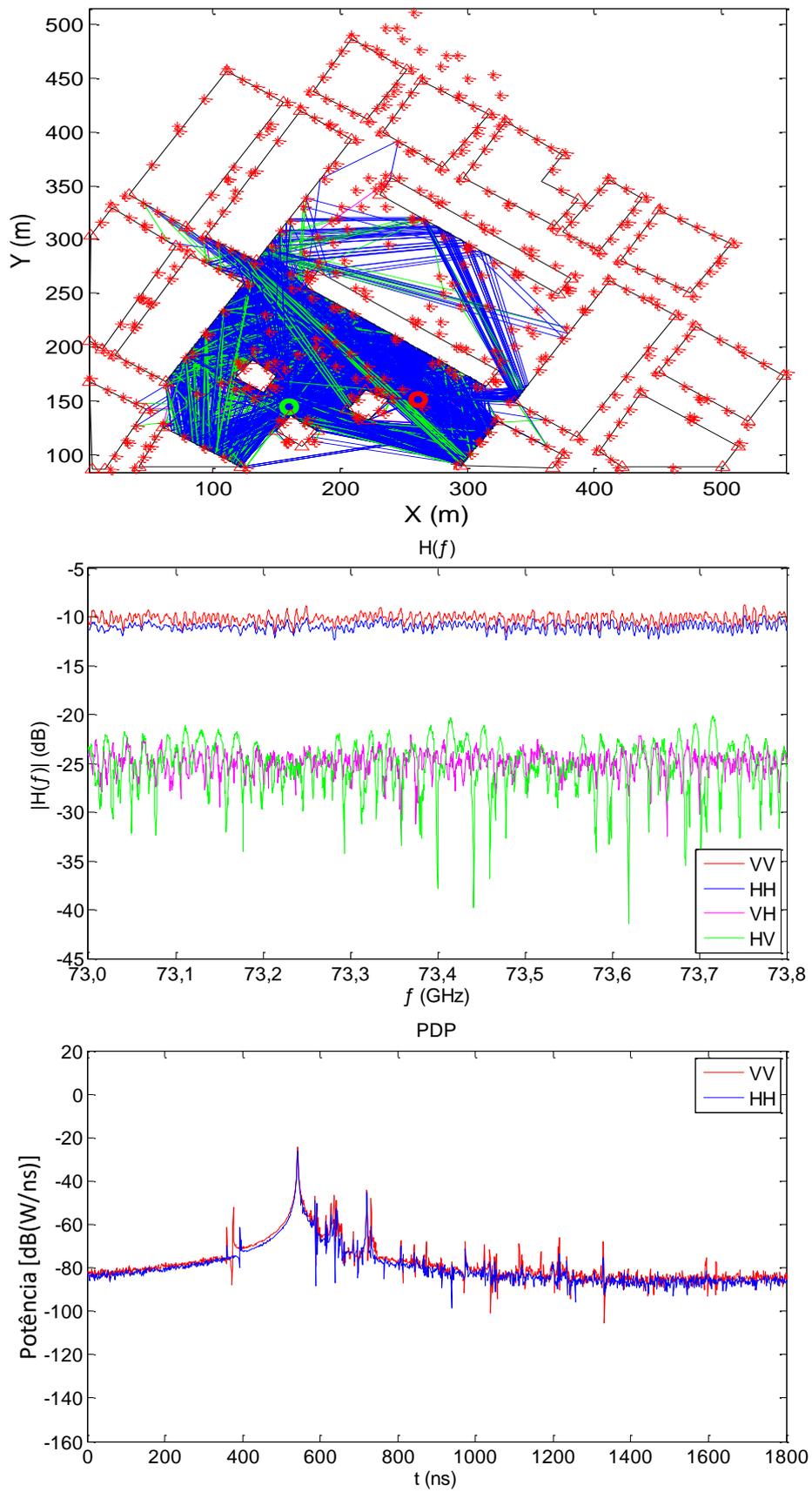


Figura 5.22 – Traçado de raios, função de transferência e PDP para o canal 4.

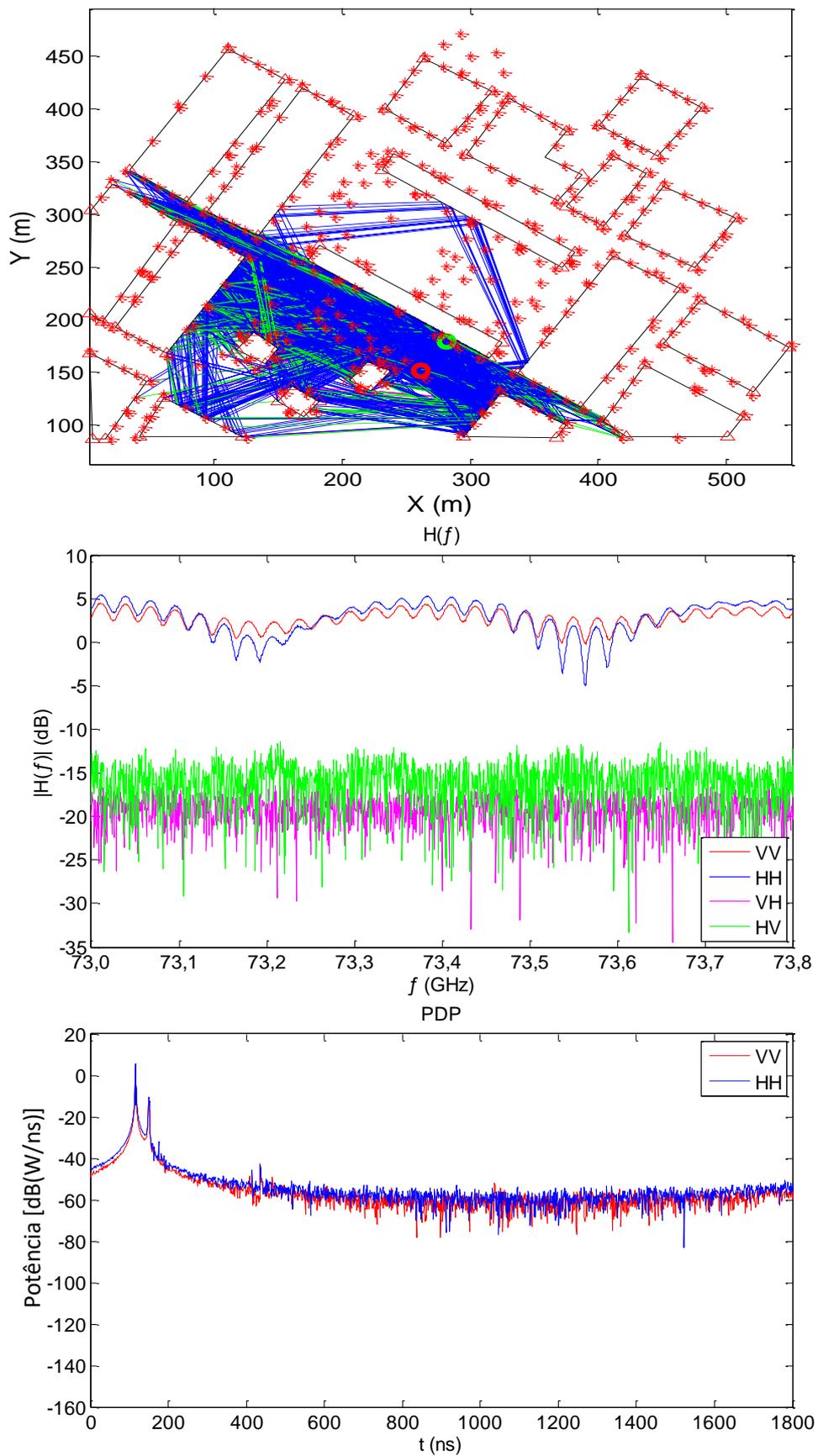


Figura 5.23 – Traçado de raios, função de transferência e PDP no canal 8.

Nos canais próximos ao Tx, é possível verificar uma grande quantidade de raios (na ordem de 70.000 raios). Esse alto valor na quantidade de raios é devido ao intenso espalhamento provocado pelas construções ao redor dos transceptores, que estão em uma região totalmente cercada por prédios. Apenas o canal 8 possui visada. É possível notar efeitos parecidos aos encontrados nas outras simulações em NYU; ou seja, uma boa concordância geral. Entretanto alguns canais apresentam grande diferença entre valores simulados e medidos, devido a imperfeições na modelagem geométrica e nos parâmetros eletromagnéticos dos elementos constituintes do ambiente. Na próxima seção, possíveis imperfeições serão avaliadas em maior profundidade.

As mesmas técnicas das simulações anteriores foram usadas na presente. A comparação entre resultados medidos e simulados pode ser vista na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Comparações entre dados medidos e simulados para cada posição do Rx.

Posição do TX	Posição do Rx	Situação	Perda de percurso medida (dB)	Perda de percurso simulada (dB)
COL1	1	Sem visada	123,7	127.4
COL1	2	Sem visada	136,5	133.0
COL1	3	Sem visada	128,2	122,7
COL1	4	Sem visada	131,8	132,2
COL1	5	Sem visada	132,3	117,9
COL1	6	Sem visada	136,2	134.5
COL1	7	Sem visada	136,7	129.6
COL1	8	Visada	108,4	111.3
COL1	9	Sem visada	137,4	144.0
COL1	10	Sem visada	137,3	141.6
COL1	11	Sem visada	150,9	155.8
COL1	12	Sem visada	138,2	134.9
COL1	13	Sem visada	132.9	131.1
COL1	14	Sem visada	-	174.8
COL1	15	Sem visada	-	188.0

O canal 5 (NLOS), apresentou uma diferença de mais de 15 dB entre os valores medido e simulado. Um estudo detalhado sobre este canal é feito na próxima seção. Um gráfico comparativo entre os resultados associados a todos os canais simulados pode ser visto na Figura 5.24. O erro RMSE foi de 4,85 dB.

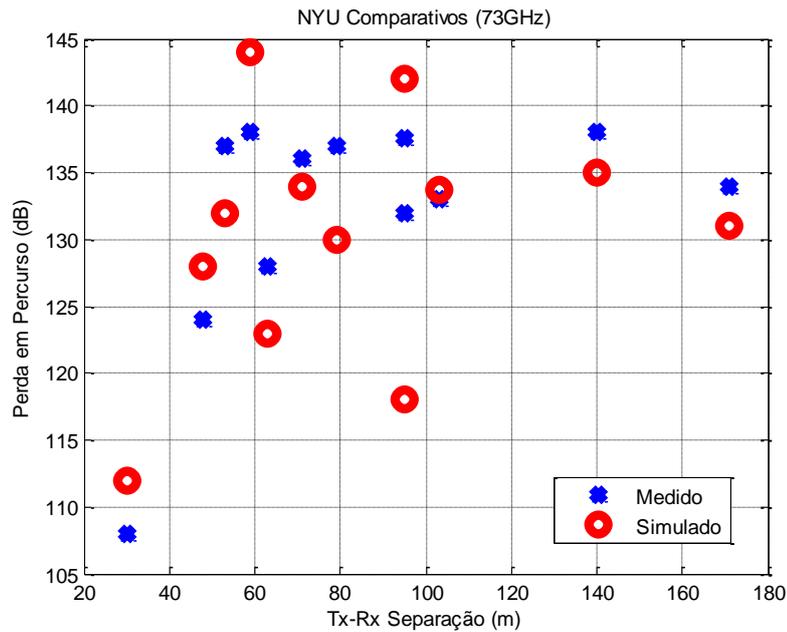


Figura 5.24 – Comparação entre os valores simulados e medidos da perda de percurso em diversos canais do campus da NYU na frequência de 73 GHz, adaptada da referência [110]

5.7

Considerações sobre discrepâncias entre os resultados medidos e simulados

Nesta seção será realizada uma avaliação detalhada dos resultados correspondentes ao canal que apresentou o pior resultado entre valores medidos e simulados (o canal 5 da simulação IV). Neste canal, foi observada uma diferença superior a 15 dB entre resultados medidos e simulados. Tal fato pode ser explicado por imprecisões na modelagem, tais como: posicionamento dos transceptores ou espalhadores ou falha no modelo eletromagnético. O canal avaliado está sem visada: o raio direto é obstruído por um prédio, como ilustra a Figura 5.25.

No canal 5, o Tx está situado a 7 m do solo. Na época das medições, existia no local um prédio baixo que, de acordo com as fotografias atuais, foi demolido. Ao norte do Tx, há um prédio de dormitório e, a leste, um prédio e uma área arborizada. O Rx está situado a 2 m do solo, em frente a um espaço aberto cercado de prédios altos, com a área arborizada ao norte. A região onde se encontram os transceptores é rodeada de prédios em todas as direções.

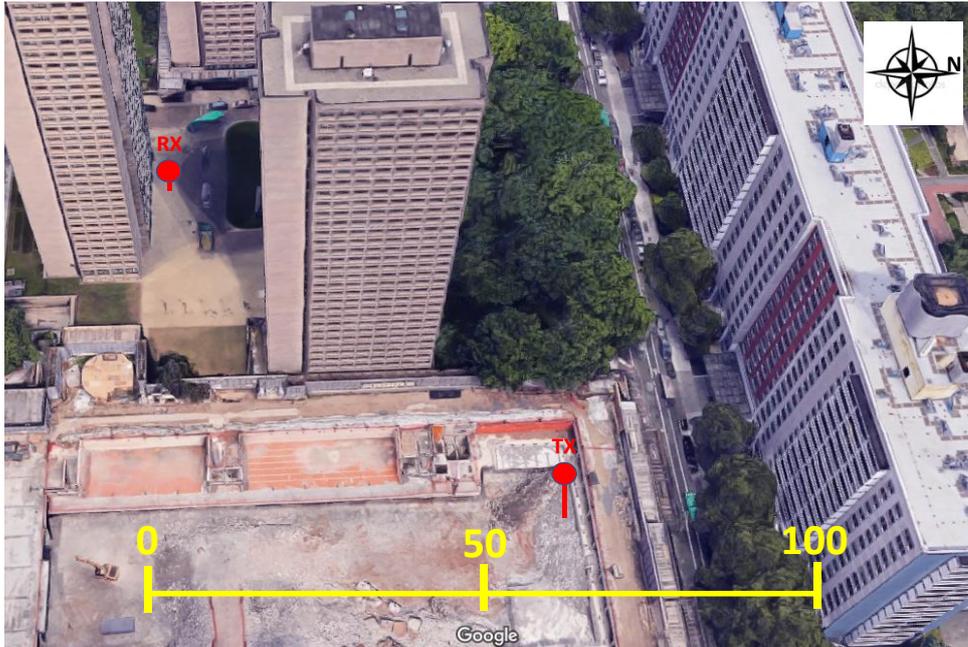


Figura 5.25 – Geometria geral do canal 5, com escalas em metros. As posições do Rx e Tx estão marcadas em vermelho. Adaptado de imagens do Google Earth.

O modelo traçou 54.234 raios para este canal, sendo a maioria do tipo espalhamento, ocorrido nas faces dos prédios, árvores e postes presentes na área. O PDP simulado pode ser visto na Figura 5.26.

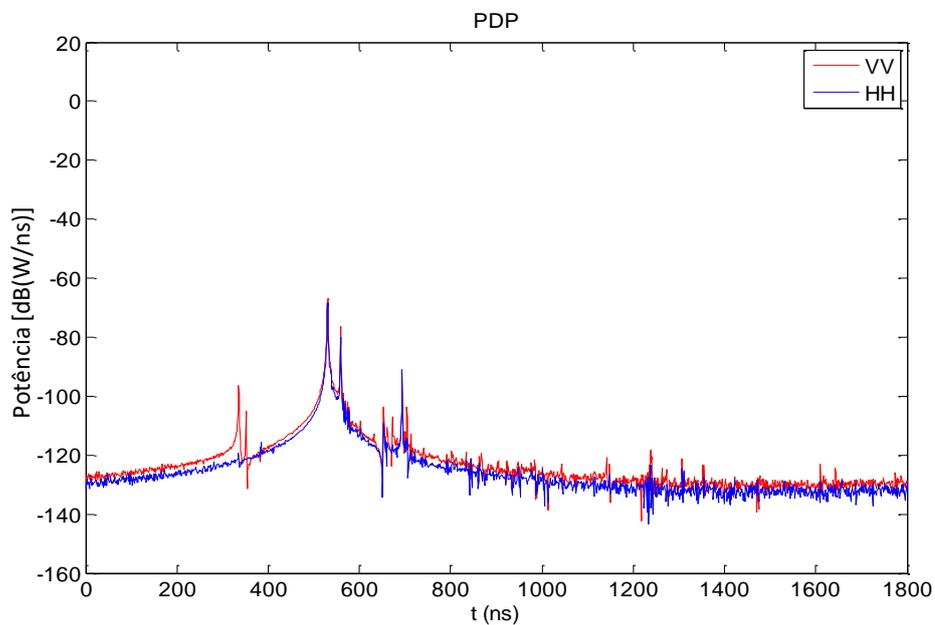


Figura 5.26 – PDP simulado para o canal 5.

O raio mais intenso deste canal apresenta uma reflexão no prédio de dormitórios ao norte do Tx e atinge o Rx. O percurso do raio é de aproximadamente 161

m, e ele reflete no prédio a uma altura aproximada de 5,5 m do solo. A Figura 5.27 representa este raio utilizando segmentos de reta amarelos pontilhados. O PDP medido para este canal [118] pode ser visto na Figura 5.28. Os autores referenciaram os retardos àquele do raio mais intenso, descartando os raios com potência muito baixa em relação a ele.

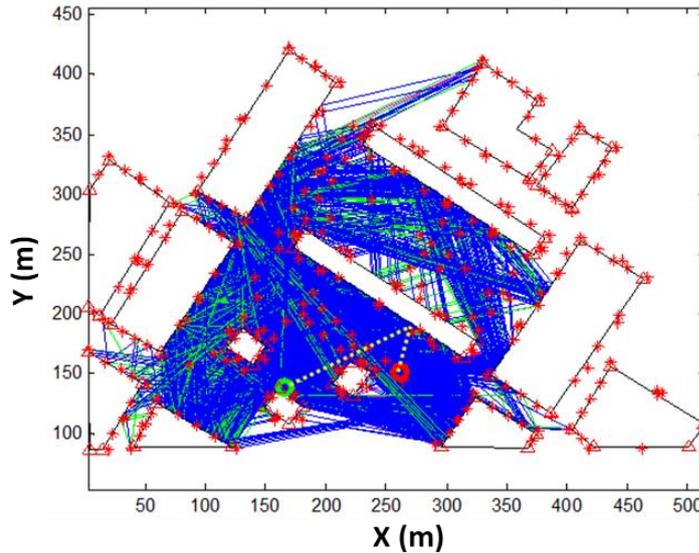


Figura 5.27 – Raio mais forte na simulação do canal 5.

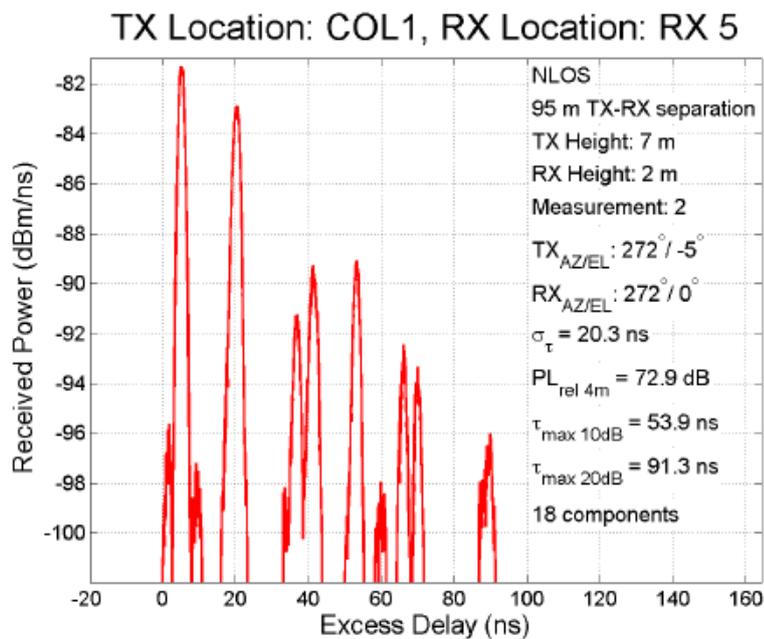


Figura 5.28 – PDP do canal 5, reproduzido da referência [118].

Pode-se ver claramente que os PDPs medido e simulado não possuem semelhanças, tanto nos níveis de potência quanto nos retardos, o que pode explicar a grande diferença entre a potência medida e simulada. O raio mais intenso no PDP simulado não está presente nas medições. O raio refletido no prédio, que foi traçado na simulação, pode não existir de fato, em função da grande quantidade de janelas nas laterais do prédio. Estas janelas podem permitir que o suposto raio mais intenso na simulação penetre no ambiente interno do prédio em vez de apresentar reflexão elevada. Realizando uma nova simulação e retirando as contribuições dos raios refletidos nos prédios a norte e oeste, foi obtido um novo PDP, que pode ser visto na Figura 5.29.

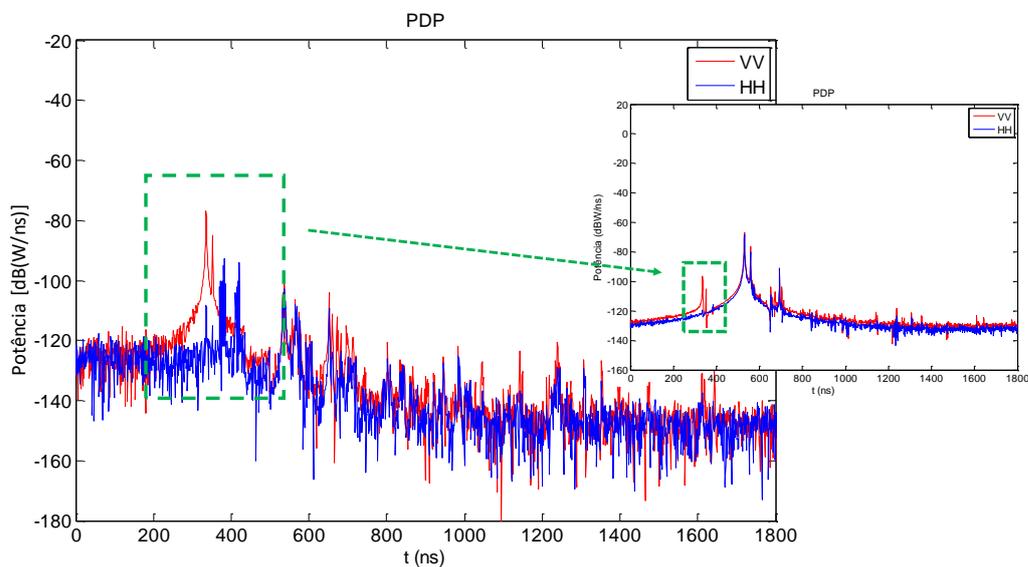


Figura 5.29 – PDP do canal 5 sem os raios refletidos no prédio do dormitório e no prédio a oeste do Tx. A área marcada em verde representa o mesmo conjunto de raios.

O novo PDP simulado mostra que o algoritmo escolheu o raio mais intenso entre aqueles de um pequeno conjunto visível no PDP simulado anteriormente (área verde na Figura 5.29). Este novo raio tem agora maior potência, pois está na região de alto ganho proporcionada pelas técnicas de *Beam Steering* e *Combining* implementadas pelo modelo. De acordo com a base de dados, os raios deste conjunto são oriundos da difração nas arestas do prédio a oeste do Tx e do espalhamento nas árvores próximas, conforme mostram as Figuras 5.30 e 5.31.

Em seguida, foi utilizada uma nova escala para o PDP resultante da nova simulação, referenciando a escala de retardos ao do raio mais intenso e comparando

com o obtido na medição NYU do canal 5. A Figura 5.32 mostra a comparação, utilizando apenas a componente vertical, utilizada na campanha. Pode-se notar que são muito mais compatíveis, tanto em potência quanto nos retardos dos raios.

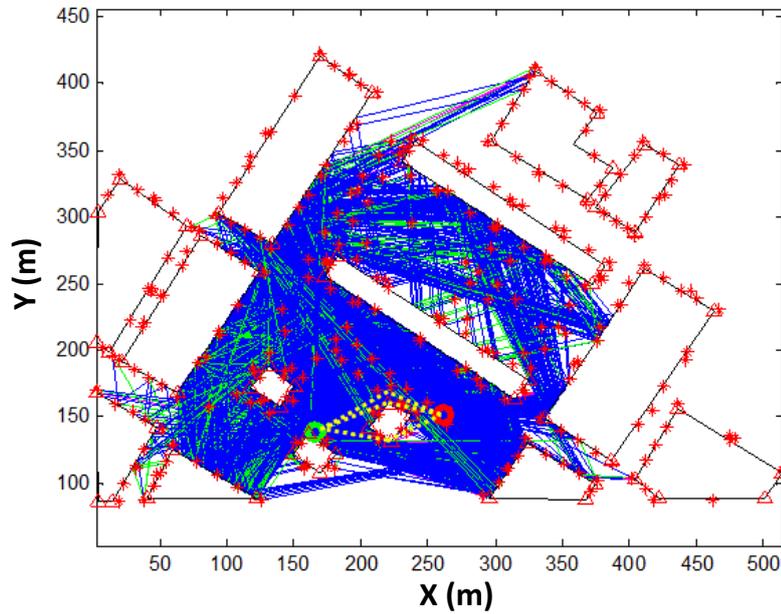


Figura 5.30 – Traçado de raios associado ao conjunto da Figura 5.29 (em amarelo). Estes raios são oriundos da difração nas arestas do prédio a oeste do Tx e do espalhamento nas árvores próximas.

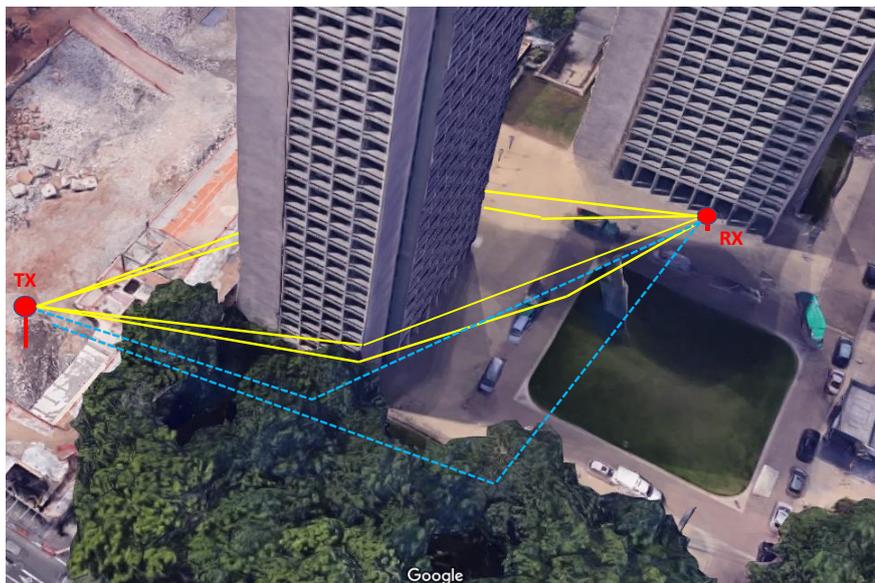


Figura 5.31 – Raios associados ao conjunto da Figura 5.29. Em amarelo, raios difratados nas arestas da edificação. Em azul, raios resultantes do espalhamento nas árvores a oeste do Tx. Adaptado do Google Earth.

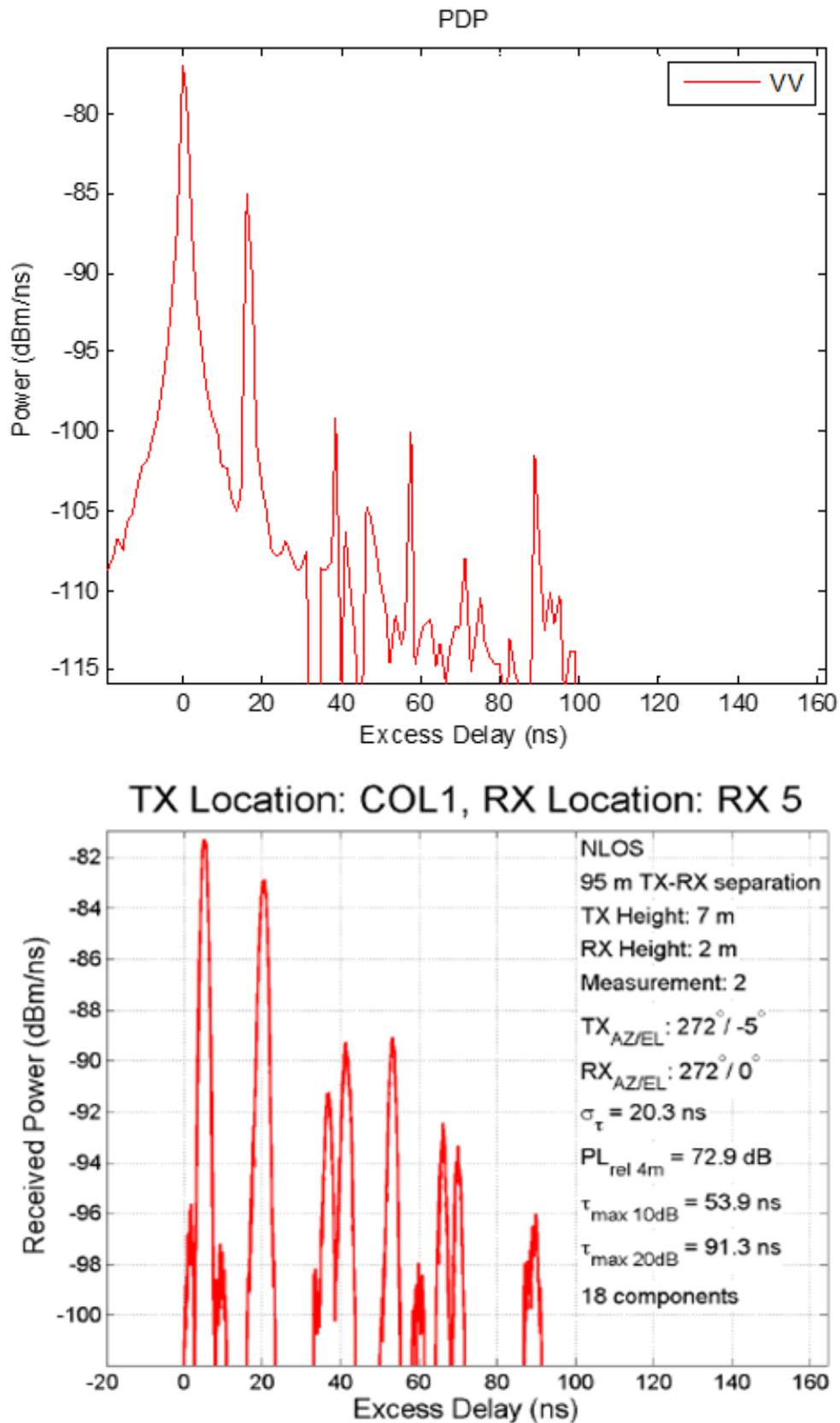


Figura 5.32 – Comparação entre PDP's simulado e medido para o canal 5. Adaptado de [118].

Em resumo, observou-se que os resultados associados ao canal 5 apresentaram, inicialmente, grande divergência entre valores medidos e simulados, devido à consideração de raios que podem existir. Após a retirada destes raios da base de dados, os resultados da simulação para os PDPs e a potência no canal 5 apresentam melhor concordância com os experimentais. A diferença entre valores medidos e simulados para a perda de propagação, inicialmente elevada, diminuiu para 3,4 dB.

A literatura sobre traçado de raios [119] mostra que, usualmente, os modelos têm dificuldade em encontrar os raios nos ambientes, o que em geral produz previsões pessimistas. Nos resultados do presente modelo, foi observado que, em alguns casos, a simulação previu a existência de raios que, aparentemente, não existem. Como foi demonstrado nesta seção, quaisquer obstáculos de pequenas dimensões (janelas, troncos, galhos, etc.) podem alterar as características do conjunto de raios que atingem o Rx. Esta possível característica do método de traçado de raios em canais UWB em ondas milimétricas pode ser fortemente influenciada pela frequência utilizada, escala dos espalhadores e parâmetros eletromagnéticos considerados na modelagem do ambiente. Parte da literatura recente sobre canais UWB em ondas milimétricas [120, 121] denota pouca importância aos mecanismos de difração e espalhamento, contudo, no canal 5, raios importantes devem ser oriundos destes mecanismos e não de raios refletidos specularmente, dada a geometria do canal. Isto pode significar que estes mecanismos talvez possam garantir a comunicação em canais sem visada, ou sem raios refletidos specularmente.

5.8

Campanha de medições V

Esta campanha foi realizada no ano de 2016 em Helsinkí [112, 113], Finlândia, pelo grupo do Departamento de Rádio Ciência e Engenharia (SMARAD) da Universidade Escola de Ciência e Tecnologia, sediada em Aalto, Finlândia. A campanha efetuou medições na faixa de 81 GHz a 86 GHz com a largura de banda de 5 GHz (UWB) em uma rua do centro da cidade.

Foi escolhida a rua Eerikinkatu, mostrada na Figura 5.33. Esta rua possui a característica de propagação do tipo “*street canyon*”. Os prédios na rua possuem até cinco andares, em grande parte sem espaços entre si, formando grandes blocos de prédios nos quarteirões.

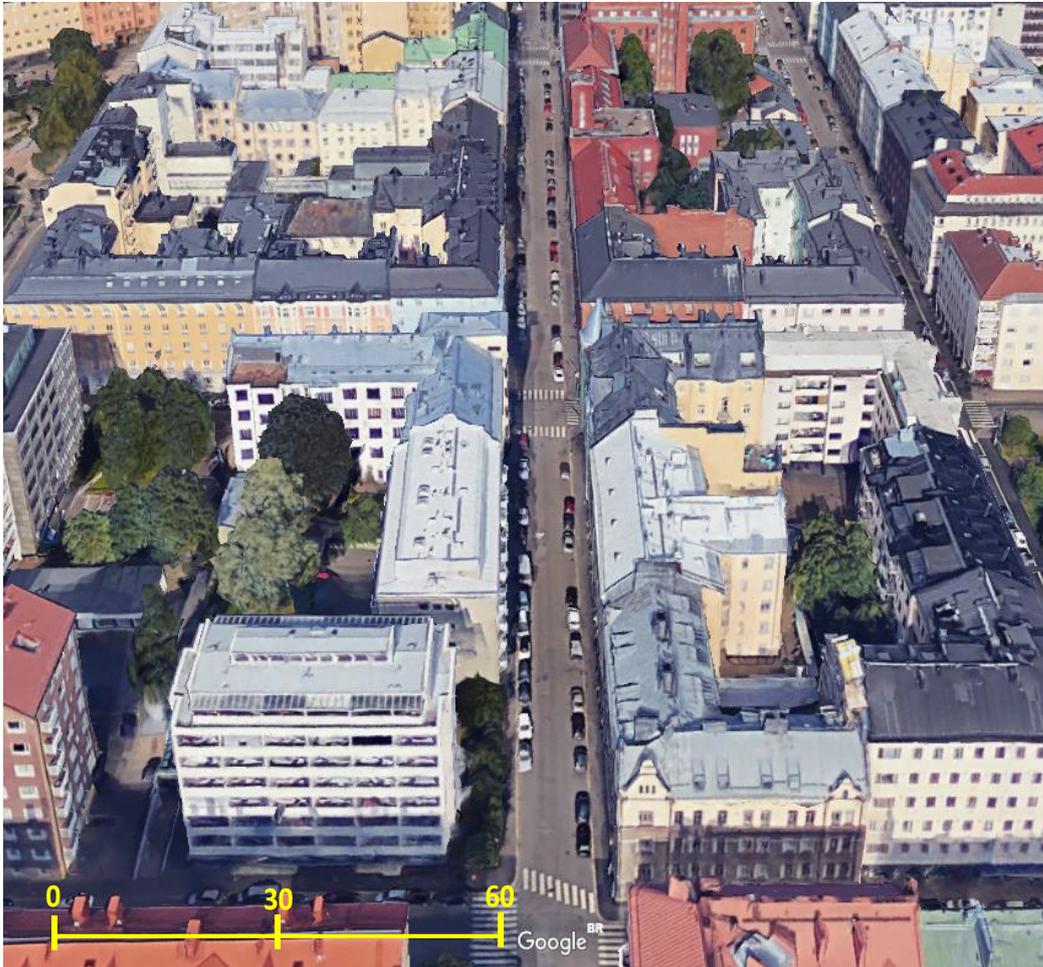


Figura 5.33 – Vista da rua Eerikinkatu, Finlândia. Adaptado do Google Maps.

Existem poucas árvores nas calçadas e não existem postes de iluminação, pois as luminárias são fixadas diretamente nas paredes externas dos prédios. Não foram encontrados postes de distribuição de energia e só existem postes de trânsito nas avenidas principais.

As medições foram feitas com os transceptores em pontos fixos e distantes de 685 m, posicionados em mastros de 4 m de altura em relação ao solo. Foram utilizadas em ambos os transceptores as antenas linearmente polarizadas do tipo: parabólica (ganho de 45 dBi e largura do feixe de meia potência de 0,8°) e corneta

(ganho de 24 dBi e largura do feixe de meia potência de 10°). A potência do transmissor foi sempre de 0 dBm. Inicialmente, a equipe da campanha realizou medições com antenas polarizadas verticalmente. Posteriormente, realizou a mesma medição de forma a transmitir com a polarização horizontal, mantendo a da antena receptora. Este foi um dos principais motivos para a escolha deste trabalho com base de estudo, pois será possível analisar o comportamento do modelo em relação a componentes copolarizada e com polarização cruzada por intermédio de comparações com dados reais obtidos com dois tipos de antenas diferentes. A Figura 5.34 ilustra os detalhes geométricos do canal utilizado nas medições.

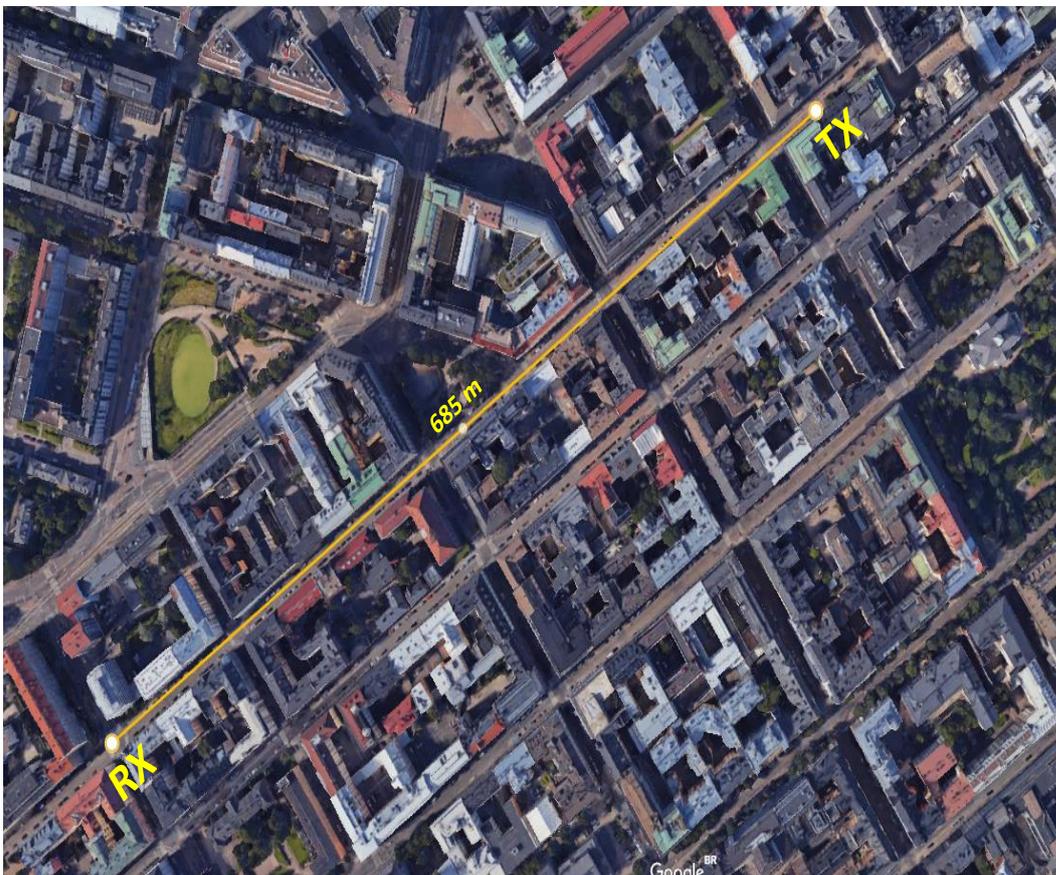


Figura 5.34 – Local das medições, com as posições do Tx e Rx. Adaptado do Google Maps.

Inicialmente, o ambiente foi descrito computacionalmente, utilizando as mesmas técnicas descritas nas seções anteriores. O resultado está ilustrado na Figura 5.35.

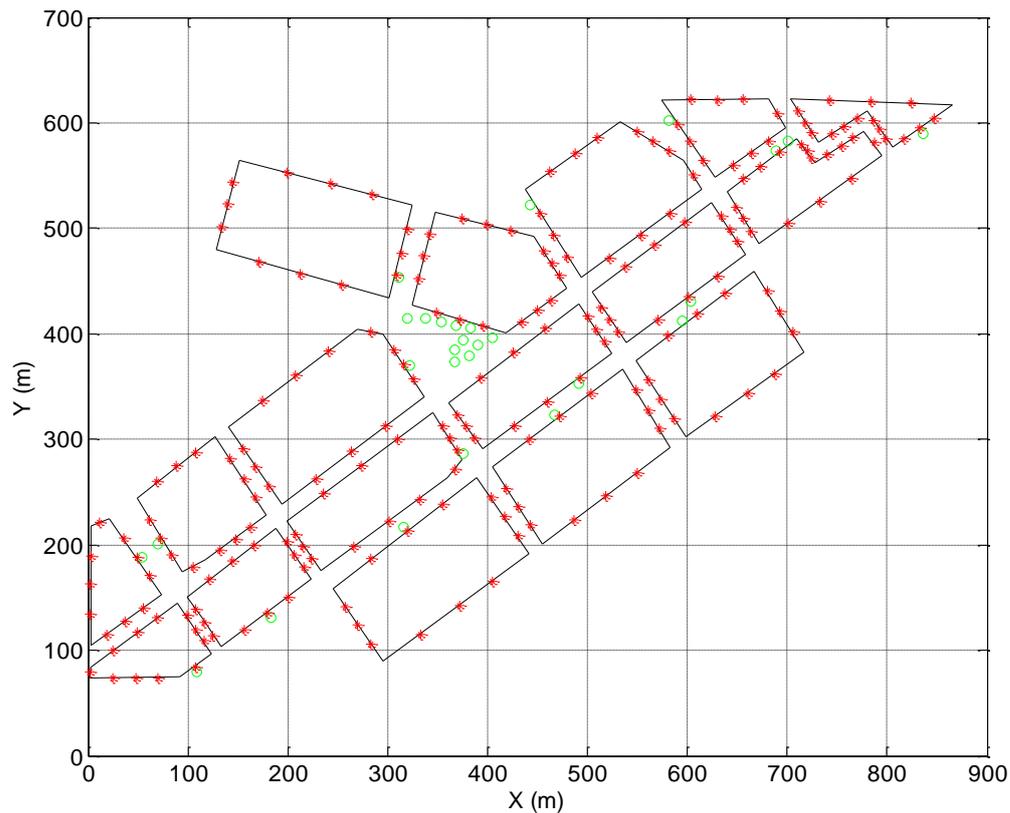


Figura 5.35 – Representação do local das medições da campanha V. As linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas que representam as paredes dos prédios.

Os transceptores no canal estavam em visada e foram alinhados previamente na direção do raio direto. Inicialmente, foi feita a simulação utilizando os mesmos parâmetros da campanha anterior. Apenas o ganho, a largura do feixe de meia potência e a potência foram ajustados para simularem a medição feita com a antena parabólica. Na fase de traçado, foram encontrados 31644 raios, em sua grande maioria pertencentes ao mecanismo de espalhamento difuso nas paredes dos prismas. A Figura 5.36 ilustra o resultado desta fase. Pode-se notar que os raios ficam confinados à rua, pois os prédios a cercam, dificultando o traçado de raios em outras direções.

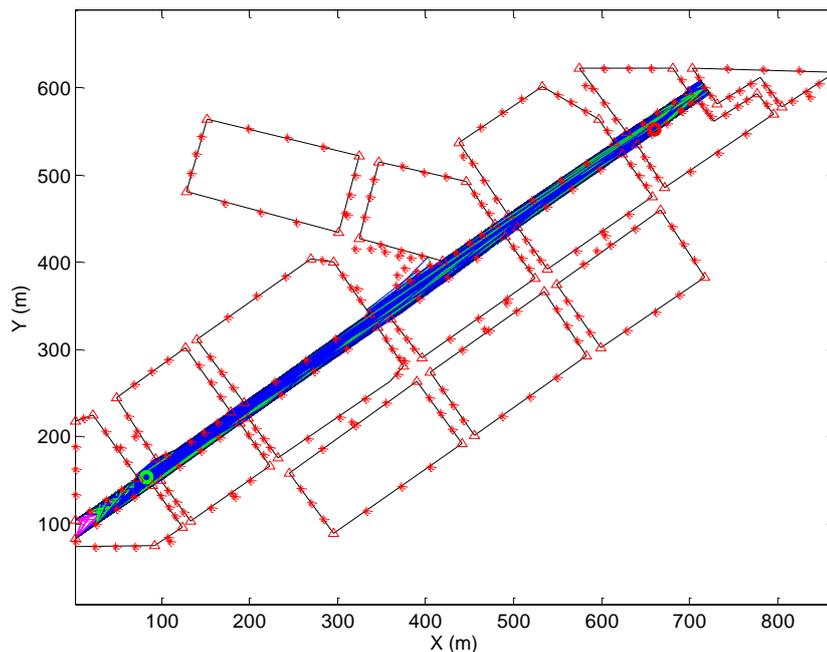


Figura 5.36 – Resultado do traçado de raios no canal. Os asteriscos vermelhos são pontos de reflexão difusa, triângulos vermelhos são pontos de difração, polígonos pretos são a projeção dos prismas, os círculos vermelho e verde são o Tx e Rx, respectivamente. Os raios oriundos de reflexão especular são linhas azuis, os raios oriundos de difração são de cor magenta e os raios oriundos de espalhamento são verdes.

Após o traçado de raios, foi calculada a função de transferência do canal, ilustrada na Figura 5.37, que possui bastante similaridade com a função de transferência obtida através das medições na Finlândia, conforme mostra a Figura 5.38. Ambas as funções de transferência (FT) do canal refletem a grande filtragem espacial esperada pelo uso de uma antena diretiva. A FT simulada apresenta um maior nível de potência que a obtida pelas medições. O tipo de perfil de interferência presente na FT simulada pode indicar a presença de mais raios de alta potência atingindo o Rx em comparação com a FT obtida pelas medições, já que existe uma quantidade maior de franjas de interferência visíveis na FT simulada. Este comportamento pode ser causado pelo modelo, ao traçar raios refletidos especularmente que poderiam não existir no canal. Observando as paredes dos prédios na Figura 5.33, é possível notar a presença de janelas e sacadas em baixas alturas. Conjuntamente ao fato dos transceptores utilizados nas medições estarem montados em pequenas torres de 4 m de altura. Esta combinação pode ocasionar o traçado de raios que não existem. De fato, a base de dados contém dezenas de raios que atingem o

Rx apenas por reflexões especulares. A remoção destes raios produz uma função de transferência com um perfil de interferência semelhante ao apresentado na Figura 5.38.

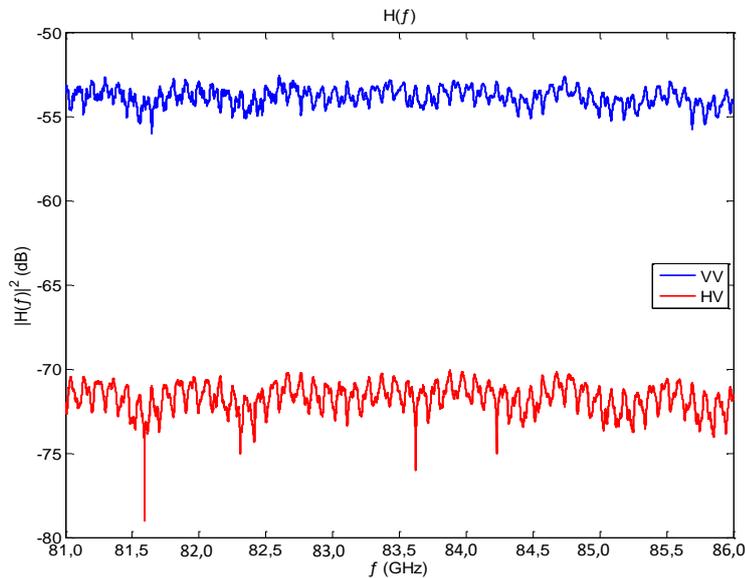


Figura 5.37 – Função de transferência simulada. Observe que as cores usuais de representação das componentes do campo foram alteradas para facilitar a comparação com a Figura 5.38.

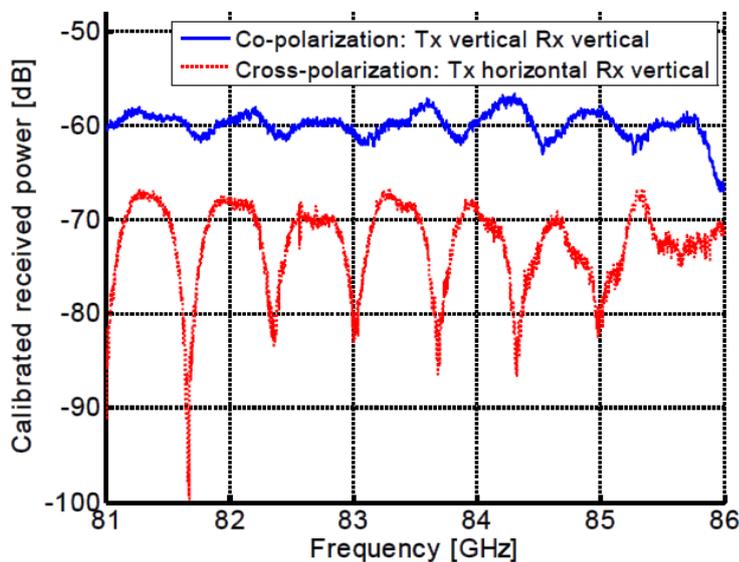


Figura 5.38 – Função de transferência obtida com os resultados da companhia de medições. Reproduzida da referência [112].

A FT simulada produz o PDP ilustrado na Figura 5.39. Em seguida, foi normalizado o PDP em relação ao raio mais intenso e a escala de retardos foi redefinida

como explicado anteriormente. O resultado está apresentado na Figura 5.40, que pode ser facilmente comparada qualitativamente com o PDP obtido pelo processamento das medições da campanha, ilustrado na Figura 5.41.

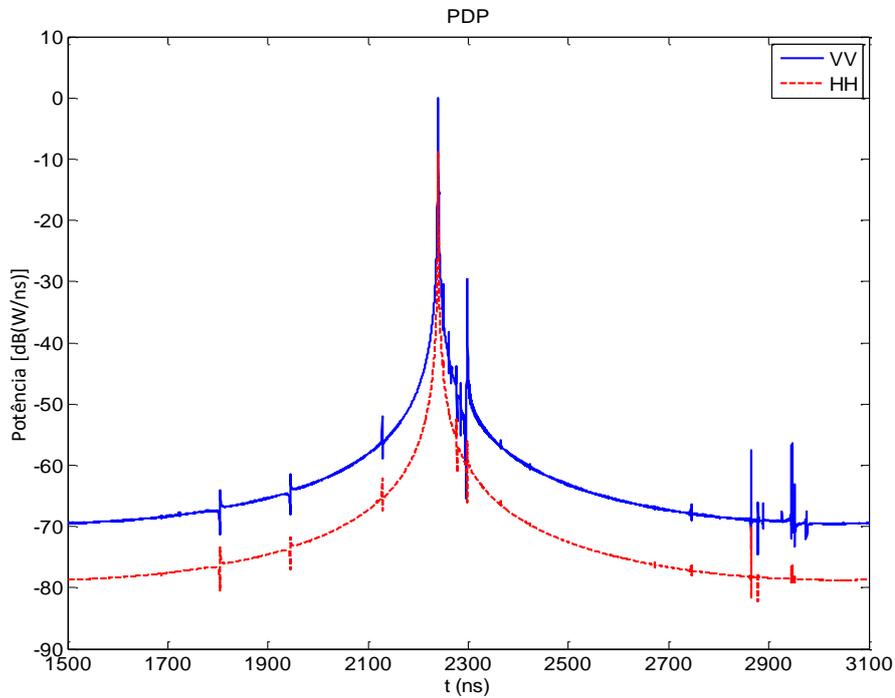


Figura 5.39 – Perfil de potência e retardos simulado.

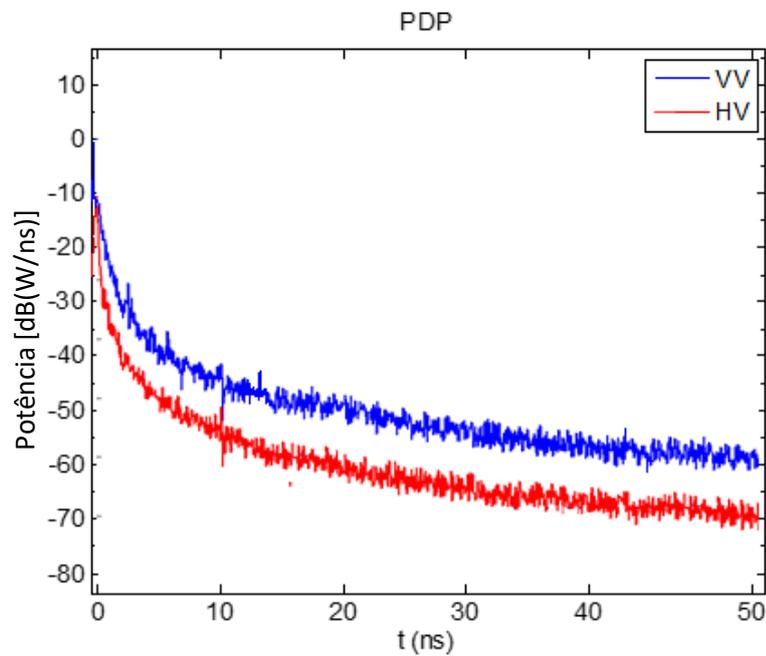


Figura 5.40 – Perfil de potência e retardos simulado e normalizado pelo tempo de chegada do raio mais intenso.

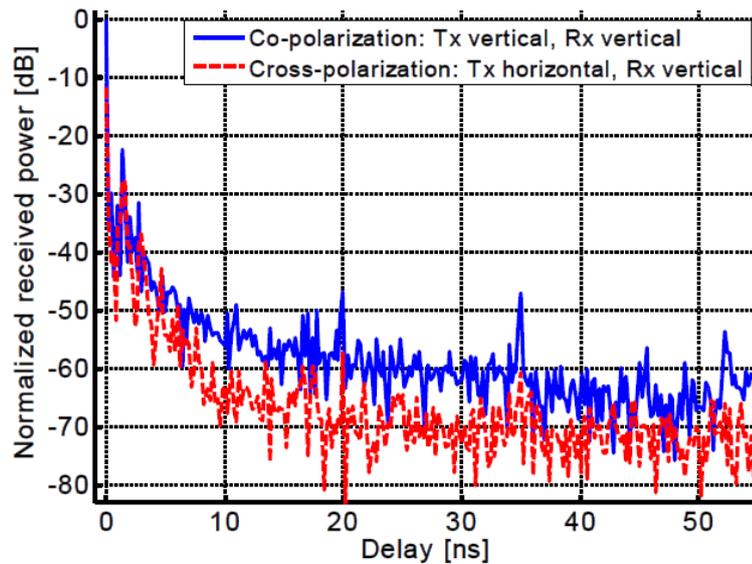


Figura 5.41 – Perfil de potência e retardos obtido dos dados da campanha. Normalizado pelo raio mais intenso (direto). Reproduzido de [112].

É possível notar uma boa concordância geral entre os PDPs simulado e obtido da campanha. Há um nível maior de potência para ambas as polarizações no PDP simulado, da ordem de 5 dB. O isolamento entre as componentes cruzadas do sinal recebido é da ordem de 5 dB maior no PDP simulado.

Em seguida, o mesmo canal foi simulado com um ganho de 24 dBi na direção de radiação máxima e largura do feixe de meia potência de 10° , utilizando os parâmetros de uma antena do tipo corneta. Durante a campanha de medições, o uso da antena corneta, que possui um ganho menor que a antena parabólica, mostrou-se pouco adequado ao canal medido. De fato, a grande distância entre os transceptores não permitiu a medição da componente cruzada do campo, em função da baixa relação sinal-ruído apresentada. Assim, a campanha possui dados apenas para a componente VV do campo recebido.

A simulação do canal resulta no PDP apresentado na Figura 5.42. Para facilitar a comparação com o PDP obtido pelas medições, a mesma normalização pelo raio mais forte e alteração na escala de retardos foi realizada, como ilustrado na Figura 5.43. O correspondente PDP obtido pelos resultados da campanha está mostrado na Figura 5.44. A comparação mostra que o PDP simulado tem um nível maior de potência (da ordem de 8 dB) que o medido. Esta diferença pode ser creditada a perdas no equipamento de transmissão. Os níveis elevados de potência no PDP da

componente copolarizada, poderiam ser ajustados por intermédio de seleção mais adequada de parâmetros eletromagnéticos do ambiente. De grande relevância é o alinhamento entre os transceptores, que pode contribuir para as diferenças encontradas.

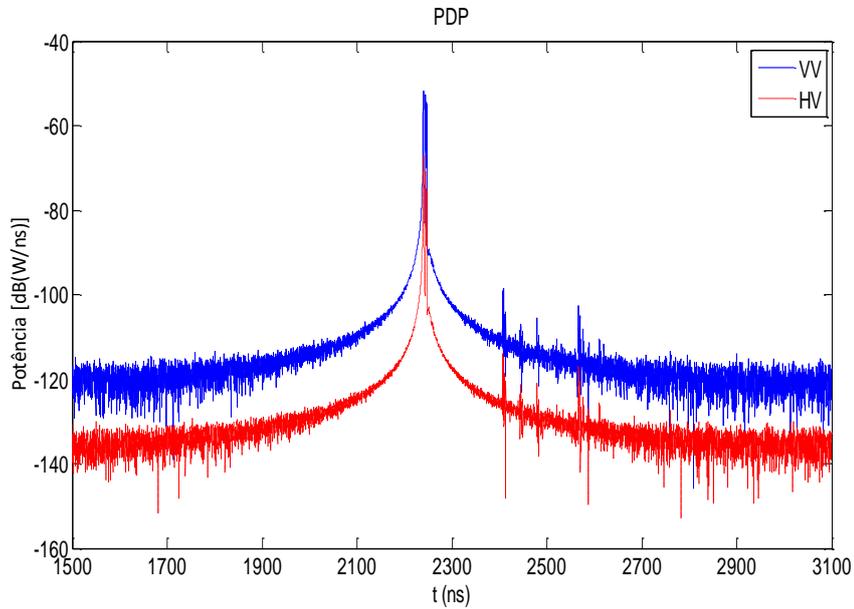


Figura 5.42 – Perfil de potência e retardo obtido pela simulação.

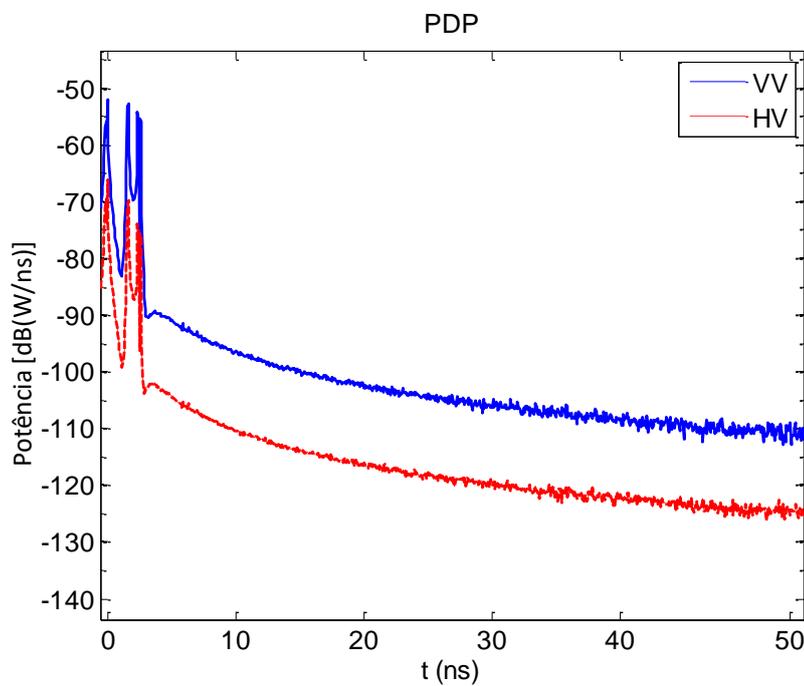


Figura 5.43 – Perfil de potência e retardo obtido pela simulação, com a mudança na escala de retardos e normalização pelo raio mais intenso (direto).

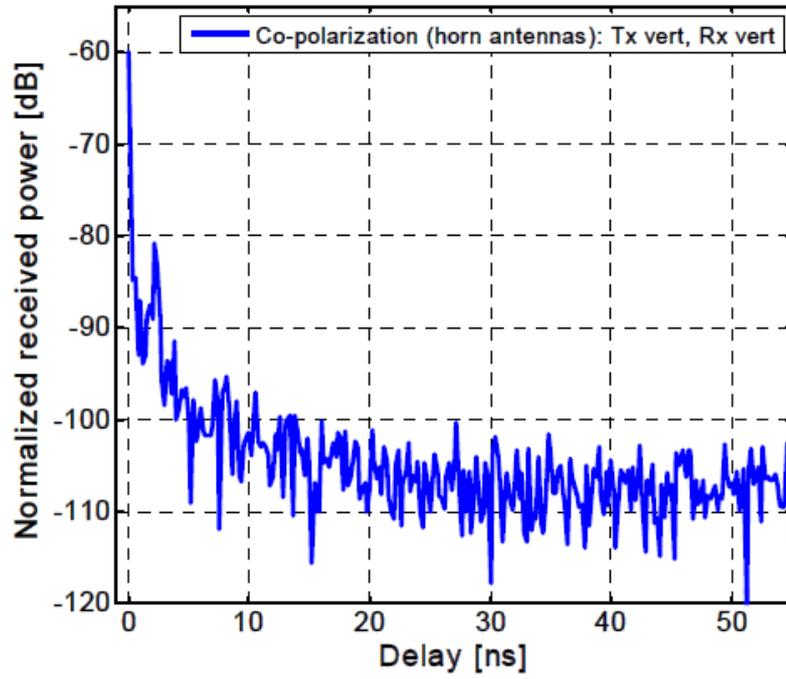


Figura 5.44 – Perfil de potência e retardos obtido pela campanha de medições e normalizado pelo raio mais intenso. Reproduzido de [112].