

Caracterização da Atenuação Média em Área por Filtragem e por Regressão Multi-Declive

Leonardo L. de A. Maia e Dayan A. Guimarães

Resumo— Neste artigo comparam-se os métodos de filtragem e de regressão segmentada para caracterização da atenuação de potência recebida média em área em um ambiente de propagação multi-declive simulado, a partir de medidas de potência média local para sistemas de comunicação sem fio. O primeiro método usa filtros de mediana simulados na plataforma VisSim/Comm e o segundo usa a ferramenta SLM (*shape language modeling*) na plataforma Matlab. Demonstra-se que a regressão via SLM supera a filtragem, produzindo menores valores de erro quadrático médio entre valores estimados e simulados.

Palavras-Chave— Caracterização de canais de comunicação sem fio, modelo de atenuação multi-declive, SLM, VisSim/Comm.

Abstract— In this paper compares the filtering methods and segmented regression to characterize the attenuation for area-mean received power in a simulated multi-slope propagation environment, from local-mean received power in wireless communication systems. The first one applies median filtering on the local-mean received powers simulated on the VisSim/Comm platform, and the second one applies the Matlab-based SLM (*shape language modeling*) tool for multi-slope segmented regression. It is demonstrated that the regression approach yields mean square errors much smaller than filtering, thus being more adequate for multi-slope area-mean path-loss characterization.

Keywords— Wireless channel characterization, Multi-slope path loss model, SLM, VisSim/Comm.

I. INTRODUÇÃO

A pesquisa e o desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio são sempre acompanhados da caracterização do canal através do qual o sinal será transmitido. Tal caracterização permitirá que sejam extraídos parâmetros que serão utilizados para a sua modelagem estocástica, empírica, determinística ou uma combinação destas, tanto em termos das variações de curto prazo (desvanecimento multipercurso), quanto de longo prazo (sombreamento e perda por distância). Os modelos empíricos são construídos a partir de medidas dos parâmetros do canal por meio de técnicas de sondagem (*channel sounding*). Já os modelos determinísticos fazem uso da caracterização física dos fenômenos de propagação. Os modelos estocásticos ou estatísticos consideram o canal como sendo representado por uma série de fenômenos modelados por variáveis aleatórias.

Há vários métodos que permitem caracterizar as variações de potência recebida a uma certa distância do transmissor, os quais são comumente denominados de métodos de predição

de propagação ou de predição de cobertura. Dentre eles tem-se o *log-distance* [1, pp. 200-206], o qual se destaca por sua simplicidade, grande apelo didático e aplicabilidade prática. Vários modelos de predição de cobertura são derivados desse simples método, como exemplo o SUI (*Stanford University Interim*) [2]. No modelo *log-distance*, admite-se que a potência recebida média em área (*area-mean*) cai com a n -ésima potência da distância entre transmissor e receptor, a partir de uma distância de referência, sendo n um expoente de perdas que depende do ambiente de propagação. Tal queda de potência é uma função linear da distância quando esta é representada em escala logarítmica, com inclinação determinada por n .

Recentemente, como uma generalização do modelo *log-distance*, tem-se dado enfoque ao modelo de queda linear-por-partes da potência média em área, o qual é denominado de modelo multi-declive (*multi-slope path loss model*). Nesse modelo, diferentes declives de queda de potência (diferentes expoentes de perda) são observados à medida que o receptor se distancia do transmissor. Por exemplo, em [3] demonstra-se que a análise de capacidade e de vazão em uma rede sem fio pode ser severamente afetada quando se utiliza um modelo multi-declive em vez do declive único do modelo *log-distance*. A utilização do modelo multi-declive se faz ainda mais necessária com redes densas, como se prevê para a quinta geração (5G) das redes de comunicações sem fio [3].

A caracterização da variação de potência recebida pode ser feita a partir de medidas de potência instantânea realizadas em campo, permitindo parametrizar um modelo de propagação. Tipicamente o que se faz é processar tais medidas por filtragem de forma que sejam delas isoladas as variações devido ao desvanecimento multipercurso, devido ao sombreamento e devido à perda por distância. É relativamente simples isolar o desvanecimento multipercurso e o sombreamento por filtragem, mas grandes erros de parametrização decorrem do uso desse processo quando se trata da perda por distância. Isso se agrava ainda mais no modelo multi-declive, posto que a filtragem suaviza os pontos de transição (*breakpoints*) de um declive para o próximo, prejudicando a estimação dos expoentes de perda e dos próprios pontos de transição. O problema em questão abre alas para o uso de ferramentas de regressão segmentada (*segmented regression*) [4], como é o caso da SLM (*shape language modeling*) [5], a qual opera sob o *software* Matlab.

Neste contexto, este artigo trata do processo de extração das variações de potência recebida média em área em função da distância e dos expoentes de atenuação a partir dos valores de potência média local simulados por uma plataforma implementada no *software* VisSim/Comm [6]. É realizada uma

Leonardo L. de A. Maia e Dayan A. Guimarães, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí - MG - Brasil (e-mail: {dayan,leomaia}@inatel.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep com recursos do Funtel, contrato 01.14.0231.00 referente ao projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Inatel.

comparação entre o processo de extração realizado através de filtragem, utilizando o próprio *software* VisSim/Comm, com os resultados obtidos a partir de procedimentos de aderência (*fitting*) das variações combinadas de média local e média em área a funções lineares-por-partes (*piecewise linear*), especificamente utilizando a ferramenta SLM, sob o *software* Matlab.

As demais seções do artigo estão assim organizadas: na Seção II é resumidamente descrito o método de predição de propagação *log-distance* e o modelo de perdas multi-declive. A Seção III descreve os processos de extração da potência média em área a partir de medidas simuladas através da plataforma implementada no VisSim/Comm. Na Seção IV apresentam-se resultados numéricos e as correspondentes discussões. A Seção V conclui o trabalho.

II. FUNDAMENTOS

No modelo *log-distance*, a taxa de variação da potência recebida a distâncias menores que a distância crítica d_c e sob visada direta é similar àquela prevista pelo modelo de dois raios [7]. Nesse caso, a atenuação é diretamente proporcional ao quadrado da distância (expoente de atenuação é igual a 2) entre transmissor e receptor e é calculada pela conhecida equação de Friis. A presença de obstáculos entre transmissor e receptor após a distância crítica fará com que o expoente de atenuação passe a ter valor dependente de cada ambiente em particular. O modelo *log-distance* faz uso desse fato e considera que a potência média em área, recebida a uma distância d do transmissor, cai de forma inversamente proporcional à n -ésima potência dessa distância, a partir de uma distância de referência $d_0 > d_c$. Alternativamente, a potência média em área, em dBm, cai linearmente com a distância em escala logarítmica (daí o nome *log-distance*). Matematicamente, a potência recebida em dBm, a uma distância d do transmissor é calculada como

$$\overline{\overline{P}}(d) = \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n \log(d/d_0), \quad (1)$$

onde as duas barras denotam média em área (que é a média das variações de média local, que por sua vez é a média das variações instantâneas [1, p. 200-206]).

Embora permita apenas a estimação da potência média em área, o modelo *log-distance* pode ser melhorado adicionando-se à potência calculada em (1) uma parcela referente às variações de média local em torno da média em área. Tais variações contabilizam a influência dos obstáculos entre transmissor e receptor, os quais fazem com que a média local não seja a mesma em pontos à mesma distância do transmissor. Adicionando essa parcela tem-se

$$\overline{P}(d) = \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n \log(d/d_0) + X_\sigma. \quad (2)$$

sendo X_σ a variável aleatória que representa as variações de média local em torno da média em área [1]. Note que a barra simples diferencia a potência média local $\overline{P}(d)$ da potência média em área $\overline{\overline{P}}(d)$. Medidas mostram que X_σ tipicamente tem densidade de probabilidade log-normal de média nula e desvio padrão σ , em dB, este com valor praticamente independente de d . À variável X_σ dá-se comumente o nome de sombreamento log-normal (*log-normal shadowing*). As

variações devidas ao sombreamento não podem ser calculadas, posto que X_σ é uma variável aleatória, mas podem ser alvo de análises probabilísticas. Como exemplo, pode-se calcular a probabilidade da potência média local estar acima da sensibilidade do receptor em uma área em análise, definindo assim a área de cobertura do sistema.

Tipicamente parametriza-se o modelo *log-distance* por meio de medidas de potência média local, fazendo-se uso de simples regressão linear para se estimar o expoente de perdas n . A potência à distância d_0 pode ser medida ou calculada por meio da fórmula de Friis até d_0 se tem propagação desobstruída.

No modelo de propagação multi-declive, a queda de potência média em área obedece uma função linear-por-partes. Em outras palavras, em vez de um único expoente de atenuação n , admite-se que haja diferentes expoentes n_1, n_2 , etc., cada um associado a um trecho de distâncias entre transmissor e receptor. A Figura 1 ilustra o modelo multi-declive, mostrando as variações de potência média em área combinadas com as variações de média local e instantâneas, sendo destacada a função linear-por-partes com três declives distintos que governa a variação de potência média em área dependente da distância. Para esse modelo com três declives, a potência

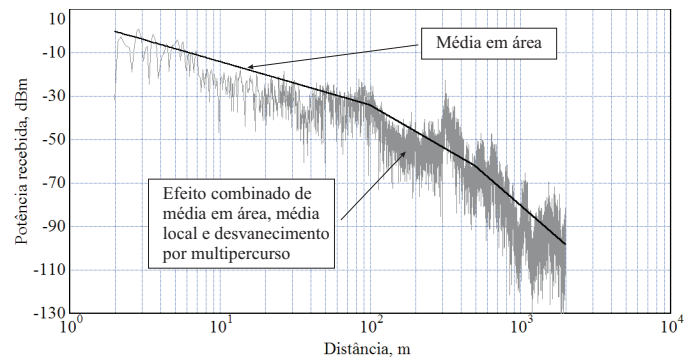


Fig. 1. Potência recebida de acordo com o modelo multi-declive, com expoentes de atenuação $n_1 = 2$, $n_2 = 4$ e $n_3 = 6$, e com pontos de quebra (*breakpoints*) $BP_1 = 100$ m e $BP_2 = 500$ m.

recebida média em área, em dBm, a uma distância d do transmissor é dada por

$$\overline{\overline{P}}(d) = \begin{cases} \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right), & d \leq BP_1 \\ \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta_1, & BP_1 < d < BP_2 \\ \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_3 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta_1 + \Delta_2, & d \geq BP_2 \end{cases}, \quad (3)$$

em que Δ_1 e Δ_2 são fatores que garantem que não haja descontinuidade na função que representa a potência de recepção.

III. EXTRAÇÃO DA POTÊNCIA MÉDIA EM ÁREA

Por meio de uma plataforma de simulação desenvolvida pelos autores com o *software* VisSim/Comm é possível simular vários ambientes de propagação, configurando-se parâmetros de entrada. Tal plataforma pode ser acessada em <https://www.researchgate.net/project/Sounding-sliding-correlator-channel-sounding-and-related-topics>. Para esta Seção foram utilizados os seguintes parâmetros, reproduzindo um ambiente de propagação escolhido arbitrariamente: $\sigma = 4$

dB; $d_0 = 10$ m; $P(d_0) = 0$ dBm; $n_1 = 2$; $n_2 = 4$; BP = 400 m (distância onde ocorre a mudança do expoente de atenuação); $N = 40$ e $d_d = 20$ m, sendo d_d a distância de decorrelação, a qual corresponde à distância entre duas medidas de média local para as quais a correlação espacial é de $1/e \approx 0,368$, e N a quantidade de amostras de potência média local igualmente espaçadas no eixo de distâncias. Nesse caso, a plataforma implementada no VisSim/Comm simula um ambiente de propagação onde medidas de potência de recepção seriam realizadas em distâncias igualmente espaçadas do transmissor, conforme ilustra a Figura 2. Nela um veículo de prova passaria pelos percursos correspondentes às linhas espessas e um valor de potência média local seria obtido cada vez que veículo cruzasse os arcos tracejados, os quais são pontos equidistantes do transmissor. O número de execuções da simulação no VisSim/Comm equivale ao número de medidas de potência que seriam tomadas a uma mesma distância do transmissor, medidas essas ilustradas pelos pontos em preto na Figura 2. Neste caso, duas execuções da simulação equivalem a duas medidas de potência tomadas a uma mesma distância (dois pontos pretos em cada arco).

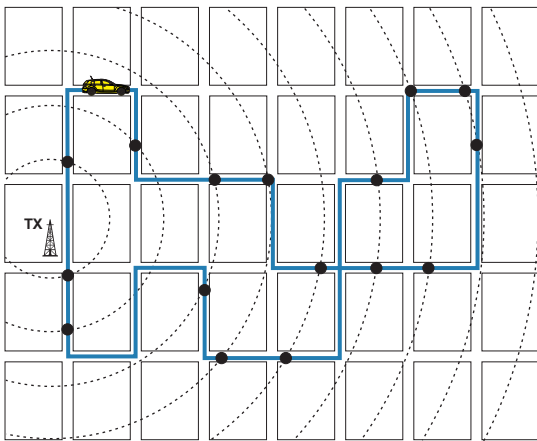


Fig. 2. Vista aérea de uma área urbana hipotética, com medidas de potência média local tomadas em distâncias igualmente espaçadas do transmissor.

A. Separação da Potência Média em Área por Filtragem Utilizando VisSim/Comm

Nesse método, que foi implementado com o *software* VisSim/Comm, a potência média em área é extraída das variações de potência média local por meio de um filtro de mediana com janela deslizante de 14.000 amostras. Tal filtro foi escolhido devido ao fato de possuir o atributo de preservação de borda (*edge-preserving*), na tentativa de recuperar a variação de potência média em área sem que se perca a quebra no ponto de mudança de declive. Para a presente análise os valores de potência gerados pela plataforma de simulação não consideraram as variações de curto prazo, como aquelas provocadas pela propagação multipercurso. Caso o fizessem, os valores de potência média local seriam obtidos por filtragem dos valores instantâneos por um filtro de janela menor.

Na Figura 3 é possível comparar a variação de potência média em área gerada pela plataforma de simulação com

aquela obtida na saída do filtro de mediana. Observa-se que a componente simulada possui um ponto de quebra, BP = 400 m, mas a componente recuperada apresenta um efeito de arredondamento no ponto de quebra, o que é provocado pelo filtro de mediana (contrariando a expectativa de preservação de borda). Além disso, a realização de outras execuções da simulação (não apresentadas aqui por falta de espaço) permitem concluir que a diferença entre as variações de potência média em área recuperadas em relação às simuladas não é sempre pequena. Isso pode ser observado através do cálculo do erro quadrático médio (MSE, *mean square error*) em cada execução da simulação. Para 50 execuções obteve-se o MSE médio com valor de 2,9956. Como mostrado mais adiante, trata-se de um valor bastante alto para o problema em questão.

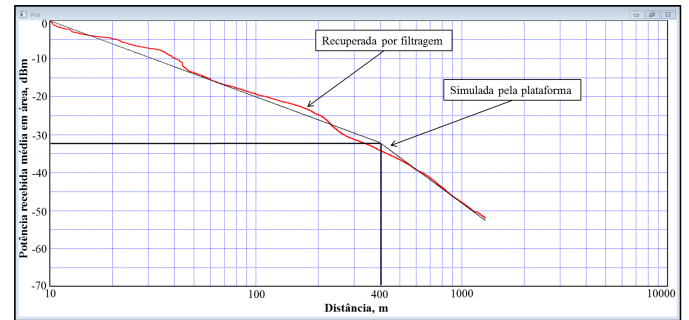


Fig. 3. Comparação entre a variação de potência recebida média em área simulada pela plataforma e recuperada por filtragem implementada no VisSim/Comm.

Os altos valores de MSE produzidos pela filtragem implementada no *software* VisSim/Comm motivam a adoção de procedimentos de aderência (*curve fitting*) das variações de média local combinada com média em área a funções lineares-por-partes, o que é apresentado na subseção a seguir.

B. Separação da Potência Média em Área por Regressão Segmentada Utilizando o SLM

A partir de um conjunto com valores de potência média local recebida, não é trivial determinar quantos expoentes de atenuação melhor representam o cenário de propagação sob análise, nem quais são os valores desses expoentes e em que locais ocorrem os pontos de quebra. Exemplos de abordagens e ferramentas específicas para resolver este problema são descritos em [5], [8]. Neste artigo utilizou-se o SLM [5], que é uma ferramenta versátil de ajuste de curva implementada no Matlab e baseada em *splines*, podendo ser configurada para gerar uma regressão linear-por-partes para um conjunto de valores de potência média local (neste caso gerados pela plataforma de simulação através do VisSim/Comm). Para gerar uma regressão linear-por-partes, o SLM deve ser configurado com *spline* de primeira ordem e outras restrições simples (para maiores detalhes, veja o tutorial em [5]).

Como primeiro exemplo, os valores de potência de recepção média em área combinados com as variações de média local simulados pela plataforma implementada através do *software* VisSim/Comm, em uma execução da simulação (um valor de potência por distância de análise), foram exportados para arquivos *.dat* e lidos pelo SLM, sob o *software* Matlab. O resultado da regressão linear é mostrado na Figura 4.

Como foram mantidos os mesmos parâmetros configurados na plataforma VisSim/Comm em relação ao processo de filtragem descrito na subseção anterior, pode-se comparar os dois processos de extração da potência média em área. Observa-se que a potência média em área simulada nas Figuras 3 e 4 é a mesma, mas a componente recuperada pela ferramenta SLM é visivelmente mais fiel à simulada quando comparamos com o resultado obtido por meio de filtragem, mesmo encontrando o ponto de quebra na distância de 319,66 metros (o BP simulado foi em 400 metros). Observa-se que não ocorre o efeito de arredondamento visto na Figura 3, pois o SLM executa uma regressão segmentada que é multi-declive por definição. A fim de estabelecer equivalência com o método de extração da potência média em área por filtragem, obteve-se para 50 execuções o MSE médio de 0,8325, quase quatro vezes menor que o valor de 2,9956 encontrado no caso da filtragem.

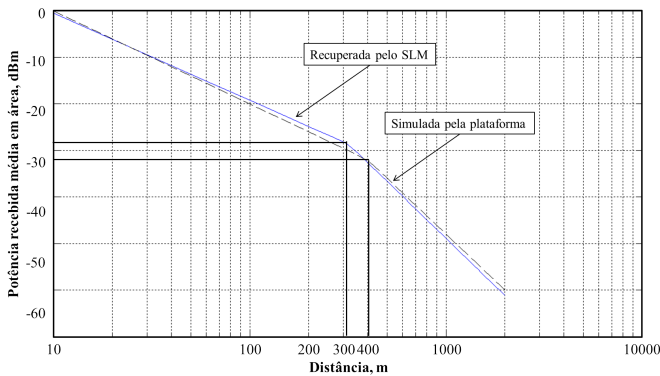


Fig. 4. Comparação entre a variação de potência recebida média em área simulada pela plataforma e recuperada por regressão linear-por-partes através da ferramenta SLM.

C. Avaliação da Precisão dos Resultados do SLM

É possível avaliar a qualidade (precisão) da regressão através do cálculo do coeficiente de determinação, R^2 , que é uma medida de ajustamento de um modelo (resultado da regressão) em relação aos valores observados, neste caso aos valores de potência recebida média local importados da plataforma de simulação implementada no VisSim/Comm. O coeficiente de determinação de uma regressão pode ser calculado por

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

em que \bar{y} é a média dos valores observados, $\{y_i\}_{i=1}^N$ são os dados e $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^N$ são os resultados da regressão. O R^2 varia entre 0 e 1; quanto mais próximo de 1 significa que o modelo consegue melhor representar os dados observados, ou seja, o modelo melhor se ajusta aos dados observados.

Infelizmente, somente o R^2 não é suficiente para se avaliar a qualidade da regressão, pois resultados com alto R^2 podem estar associados a modelos de regressão errôneos [9]. De forma a melhorar tal avaliação, complementa-se a medida do R^2 com a média dos quadrados dos resíduos (*mean residual sum of squares*, MRSS), dada por

$$\text{MRSS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (5)$$

a qual, tendo baixo valor acompanhado de alto R^2 , diminui a chance de aceitação de modelos de regressão errôneos.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

As Tabelas apresentadas nesta Seção comparam os MSEs por filtragem com os resultados obtidos por regressão segmentada através do SLM, variando um parâmetro específico por vez, por exemplo, σ (desvio padrão do sombreamento), d_d (distância de decorrelação do sombreamento), BP (ponto de quebra) e N (número de amostras de potência média local, igualmente espaçadas em distância, em cada execução da simulação). De forma a estabelecer uma condição de igualdade entre os dois procedimentos, foi sempre considerado o mesmo número de valores de potência média local combinada com a média em área para ambos os casos, filtragem e regressão.

Para realizar a recuperação da potência média em área através do SLM, com objetivo de simular um ambiente de testes em campo, semelhante ao observado na Figura 2, a plataforma VisSim/Comm foi configurada para gerar valores de potência média local para 5 execuções da simulação (simulando 5 medidas de potência média local a cada distância, resultando em 5 pontos em cada arco na Figura 2) até a distância máxima de análise de 2000 metros. Em outras palavras, $N = 40$ e 5 execuções da plataforma equivalem a 200 valores de potência de recepção gerados (ou coletados numa campanha de medição em campo, por exemplo), onde a cada 50 metros (2000 metros / 40 amostras por execução) são tomadas 5 medidas de potência. A Figura 5 ilustra o resultado da regressão a partir dessas 200 amostras, com BP = 400 metros. Note que o uso de múltiplas medidas por distância melhora em muito a precisão da regressão segmentada em comparação com o uso de apenas uma medida por distância.

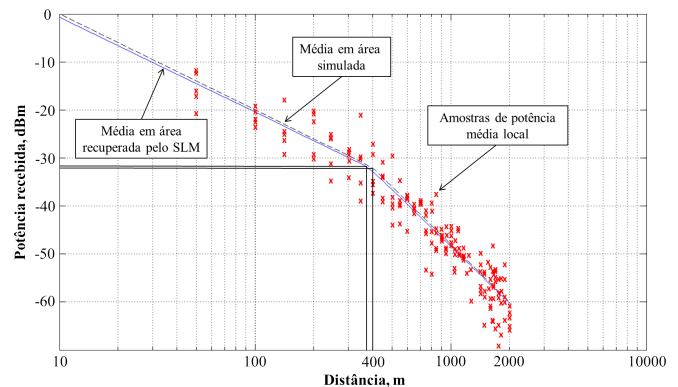


Fig. 5. Exemplo de regressão linear calculada por SLM a partir de 200 amostras de potência importadas da plataforma em 5 execuções.

Objetivando estabelecer justiça na comparação entre o método de recuperação através de filtragem e o SLM, fez-se necessário aumentar o número de amostras de potência geradas pela plataforma VisSim/Comm em apenas uma execução para $N = 200$, pois não é possível realizar a filtragem quando há mais de um valor de potência por distância, o que dá ao SLM mais uma vantagem em relação à filtragem, além da precisão. Ademais, usando como referência a Fig. 2 é imediato perceber que a obtenção de k medidas por distância em N distâncias é

mais factível que a obtenção de 1 medida por distância em kN distâncias. Para ambos os métodos foram gerados 50 valores de MSE e realizado o cômputo final do valor médio dos MSEs e seus respectivos desvios padrão.

A Tabela I apresenta os resultados de MSE variando-se o desvio padrão do sombreamento, σ , com a plataforma de simulação configurada para $d_d = 10$ m, $d_0 = 10$ m, $P(d_0) = 0$ dBm, $n_1 = 2$, $n_2 = 4$, e BP = 400 m.

TABELA I
MSE VERSUS DESVIO PADRÃO DO SOMBREAMENTO.

Desvio padrão (sombreamento)	FILTRAGEM Média de 50 MSEs Plataforma: 1 execução e $N = 200$ amostras		SLM Média de 50 MSEs Plataforma: 5 execuções e $N = 40$ amostras	
	MSE médio	σ do MSE	MSE médio	σ do MSE
σ em dB				
$\sigma = 2$ dB	0,53723	0,25160	0,27270	0,10610
$\sigma = 4$ dB	1,19623	0,63148	0,58321	0,22310
$\sigma = 6$ dB	2,35009	1,70103	0,84629	0,31945

Na Tabela II apresentam-se os resultados de MSE referentes à variação da distância de descorrelação do sombreamento, d_d em metros. Neste caso adotou-se $\sigma = 4$ dB e os mesmos parâmetros fixos utilizados na composição da Tabela I.

TABELA II
MSE VERSUS DISTÂNCIA DE DESCORRELAÇÃO DO SOMBREAMENTO.

Distância de descorrelação	FILTRAGEM Média de 50 MSEs Plataforma: 1 execução e $N = 200$ amostras		SLM Média de 50 MSEs Plataforma: 5 execuções e $N = 40$ amostras	
	MSE médio	σ do MSE	MSE médio	σ do MSE
d_d em metros				
$d_d = 10$ m	0,75554	0,41164	0,53625	0,23991
$d_d = 20$ m	1,09690	0,65719	0,58105	0,22955
$d_d = 40$ m	2,04291	1,10578	0,63436	0,26568

A Tabela III apresenta os resultados de MSE referentes à variação do ponto de quebra do modelo multi-declive. Neste caso adotou-se $d_d = 20$ m e os mesmos parâmetros fixos utilizados na composição das Tabelas I e II.

TABELA III
MSE VERSUS PONTO DE QUEBRA DO MODELO MULTI-DECLIVE.

Distância do breakpoint	FILTRAGEM Média de 50 MSEs Plataforma: 1 execução e $N = 200$ amostras		SLM Média de 50 MSEs Plataforma: 5 execuções e $N = 40$ amostras	
	MSE médio	σ do MSE	MSE médio	σ do MSE
BP em metros				
BP = 200 m	1,51379	0,74746	0,55922	0,23655
BP = 400 m	1,38968	0,79549	0,55261	0,20546
BP = 800 m	1,34456	0,66366	0,65649	0,32349

Pelas Tabelas I, II e III nota-se a nítida vantagem da ferramenta SLM frente ao método de filtragem na obtenção da potência média em área a partir de medidas de potência média local, tanto em termos do MSE médio quanto de seu desvio padrão.

Quanto a avaliação da precisão dos resultados da regressão executada pelo SLM, a Tabela IV apresenta os valores para os coeficientes de determinação, R^2 , e para a média dos quadrados dos resíduos, MRSS, variando-se o desvio padrão e a distância de descorrelação do sombreamento e o ponto de

quebra do modelo multi-declive. Observam-se resultados que mostram excelente qualidade de regressão em todos os casos.

TABELA IV
RESULTADOS DE QUALIDADE DA REGRESSÃO SEGMENTADA VIA SLM.

Parâmetro na plataforma	SLM Média de 50 R^2 e MRSS Plataforma: 5 execuções e $N = 40$ amostras			
	R^2 médio	σ do R^2	MRSS	σ do MRSS
$\sigma = 2$ dB	0,97539	0,00275	3,81830	0,42327
$\sigma = 4$ dB	0,90822	0,01118	15,42540	1,66807
$\sigma = 6$ dB	0,81477	0,02082	34,52653	3,78764
$d_d = 10$ m	0,90582	0,01085	15,59191	1,61549
$d_d = 20$ m	0,90774	0,01123	15,47632	1,69742
$d_d = 40$ m	0,90575	0,01112	15,75128	1,51843
BP = 200 m	0,92606	0,00888	15,24749	1,76549
BP = 400 m	0,90428	0,01568	16,16802	1,53656
BP = 800 m	0,87237	0,01277	15,11184	1,54258

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foram comparados os métodos de filtragem e de regressão segmentada para caracterização da atenuação de potência recebida média em área em um ambiente de propagação multi-declive simulado, a partir de medidas de potência média local. O primeiro método faz uso de filtros de mediana e o segundo aplica a ferramenta SLM na plataforma Matlab. Demonstrou-se que a regressão segmentada via SLM supera a filtragem, produzindo menores valores de erro quadrático médio entre valores estimados e simulados, bem como menores desvios padrão desses erros. Conclui-se então que, apesar da filtragem ser adequada à separação das variações de potência média local das variações instantâneas, o mesmo não se aplica à separação da potência média em área, a qual se recomenda fazer com o uso de regressão segmentada via SLM ou via outra ferramenta que o valha, usando múltiplos valores de potência média local em cada valor de distância.

REFERÊNCIAS

- [1] D. A. Guimarães, *Digital transmission: a simulation-aided introduction with VisSim/Comm*. <http://link.springer.com/book/10.1007& Business Media, 2009>.
- [2] A. Sulyman, A. Nassar, M. Samimi, G. MacCartney, T. Rappaport, and A. Alsanie, "Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 9, pp. 78–86, September 2014.
- [3] X. Zhang and J. Andrews, "Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 5, pp. 1881–1894, May 2015.
- [4] P. M. Lerman, "Fitting segmented regression models by grid search," *j-APPL-STAT*, vol. 29, no. 1, pp. 77–84, 1980.
- [5] J. D'Errico, "SLM: Shape language modeling," Apr. 2016. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-modeling>
- [6] Altair Engineering, Inc. (former Visual Solutions, Inc.), "VisSim: A graphical language for simulation and model-based embedded development," Nov. 2016. [Online]. Available: <http://web.solidthinking.com/vissim-is-now-solidthinking-embed>
- [7] K. Bullington, "Radio propagation for vehicular communications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 295–308, Nov. 1977.
- [8] Statistical Methodology and Applications Branch, Surveillance Research Program, National Cancer Institute, "Joinpoint Regression Program, Version 4.2.0," Apr. 2015. [Online]. Available: <http://surveillance.cancer.gov/joinpoint/>
- [9] G. Hahn, "The coefficient of determination exposed!" *Chemical Technology*, vol. 3, no. 10, pp. 609–614, Oct. 1973.