

Adaptação do Modelo de Tamir para Predição de Cobertura de Sistemas HF/VHF em Florestas Usando Bases Digitais de Terreno

Marinho Alex Kamiroski Melo, José Carlos Araujo dos Santos e Maurício Henrique Costa Dias

Resumo—O modelo de Tamir é uma das poucas abordagens analíticas para o cálculo da perda de percurso de sinais de rádio em florestas, nas faixas de HF ou VHF. Em que pese a sua simplicidade e facilidade de uso para predições do tipo ponto-área, aplicar esse modelo em predições ponto-a-ponto ainda é um problema em aberto. O presente trabalho propõe uma solução heurística para esse problema, considerando a disponibilidade de bases digitais de altura do terreno e da copa das árvores. Testes com o algoritmo desenvolvido e implementado em Matlab são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave—Fatores de propagação rádio-móvel terrestre, radiopropagação HF, radiopropagação VHF, vegetação.

Abstract—Tamir's model is one of the few known analytical approaches to compute the HF and VHF radio propagation loss in forests. This method is quite straightforward for point-area radio coverage predictions. Its application for point-to-point analysis, however, is still an open matter. The present work proposes a heuristic solution to this problem, when digital terrain and trees canopy heights models are available. Tests with the developed algorithm, implemented in Matlab, are presented and discussed.

Keywords—Land mobile radio propagation factors, HF radio propagation, VHF radio propagation, vegetation.

I. INTRODUÇÃO

Uma das características mais marcantes da Amazônia, maior bioma terrestre brasileiro, é a presença de grandes extensões de florestas densas [1]-[2]. Ao longo das últimas décadas, os esforços da sociedade brasileira na preservação dessas florestas têm sido visíveis, como através da criação e conservação de parques e reservas ambientais. Entretanto, a hostilidade natural desse tipo de ambiente, bem como sua grande extensão, trazem severas dificuldades para viabilidade logística de sua proteção e manutenção.

Um dos problemas enfrentados por profissionais que atuam em áreas de vegetação densa, tais como fiscais ambientais, policiais, bombeiros, militares e outros, é a dificuldade de estabelecer radiocomunicações. O ambiente de floresta atenua significativamente o sinal transmitido nas faixas típicas de emprego de rádios portáteis, especialmente em UHF, em função da absorção e do espalhamento das ondas de rádio pelas árvores. Além disso, o alcance dos rádios portáteis típicos usados por aqueles profissionais já é naturalmente reduzido pela necessidade de operação em baixa potência, decorrente do

uso de baterias ou outras fontes de energia de peso e dimensões reduzidas. Neste cenário, a operação nas faixas de HF e VHF surge como uma das alternativas mais viáveis para enlaces de alguns poucos quilômetros [3]-[4].

O mecanismo de propagação que explica o maior alcance observado na faixa de HF e VHF é o de uma onda de superfície que se propaga ao longo da copa das árvores, usualmente referida como “onda lateral” [5]. Tamir foi um dos primeiros a avaliar esse comportamento, propondo uma metodologia assintótica de estimação do campo irradiado por uma antena dipolo infinitesimal dentro de uma floresta, modelada como um meio homogêneo com perdas e índice de refração maior que o do ar [5]-[7]. As premissas adotadas nessa metodologia impõem limites gerais de validade para o modelo de Tamir, recentemente rediscutidos em [8]: faixa de frequências de 2 a 200 MHz; e distâncias com relação ao transmissor de 1 a 100 km. Com isso, o modelo de Tamir representa uma abordagem adequada para o planejamento de sistemas terrestres HF ou VHF em florestas.

O modelo de Tamir assume uma geometria simplificada do problema, em que tanto o terreno quanto a copa das árvores têm alturas constantes. A abordagem mais óbvia para aplicar o modelo a um cenário real seria considerar as alturas médias daquelas duas camadas. Para uma predição do tipo ponto-área (PA), esta estratégia é razoável. Entretanto, quando a predição ponto-a-ponto (PP) é mais conveniente, a aplicação do modelo de Tamir não é tão simples. Em predições PP, costuma-se utilizar modelos digitais do terreno e de outras camadas morfológicas pertinentes. No caso da propagação de ondas em florestas nas faixas de HF e VHF, além da altura do terreno, é necessário conhecer a altura da copa das árvores. Aplicar o modelo de Tamir considerando as variações de altura do terreno e da copa das árvores de forma pontual é um problema em aberto na literatura.

O presente trabalho se insere no escopo em questão, propondo uma metodologia heurística de aplicação do modelo de Tamir para predição de cobertura PP de sistemas de comunicação HF/VHF em florestas. Para apresentar devidamente a técnica proposta, este artigo foi estruturado da seguinte forma. A seção II descreve resumidamente o modelo de referência considerado neste trabalho (Tamir). A metodologia adotada para aplicar esse modelo em algoritmos que usam bases digitais de terreno e superfície (copa das árvores) é explicada na seção III. A seção seguinte discute resultados preliminares do algoritmo desenvolvido para predição de cobertura de sistemas HF/VHF terrestres em florestas. Por fim, a seção V conclui o artigo.

II. MODELO DE TAMIR PARA PROPAGAÇÃO EM FLORESTAS

O modelo de Tamir parte da hipótese de Terra plana e considera a floresta como uma camada dielétrica com perdas, ou seja, com condutividade finita, interposta entre o ar e o solo [5]-[7]. Assume-se, ainda, que as bordas da floresta estão suficientemente afastadas dos rádios (transmissor – Tx e receptor – Rx), de modo que o modelo de camada de comprimento infinito seja uma boa aproximação. A Fig. 1 ilustra a concepção do modelo. A altura média do topo da copa das árvores define a altura da camada h_f . No presente trabalho, considera-se apenas a situação em que ambas as antenas estão dentro da floresta, ou seja, h_T e $h_R < h_f$.

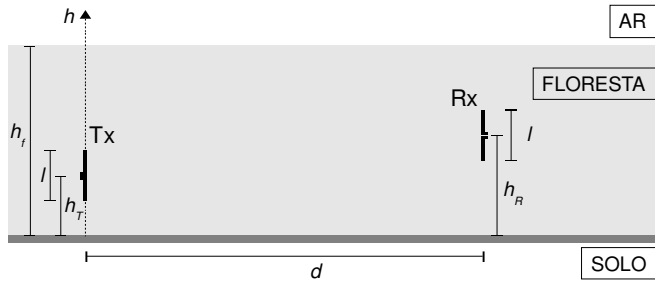


Fig. 1. Modelo de floresta como camada dielétrica com perdas entre o solo e o ar.

A Tabela I apresenta propriedades elétricas e alturas médias de floresta para três situações típicas. A permissividade relativa e a condutividade da floresta são dadas, respectivamente, por ϵ_f e σ_f . As florestas de 1 a 3 são caracterizadas por Tamir como fina, média e densa, respectivamente [6]. Considera-se que a permeabilidade da floresta é igual à do ar ($\mu_0 = 0,4\pi \mu\text{H/m}$).

TABELA I. PARÂMETROS CONSTITUTIVOS TÍPICOS DE FLORESTAS

Floresta	σ_f (mS/m)	ϵ_f	h_f (m)
1	0,03	1,03	5
2	0,1	1,1	10
3	0,3	1,3	20-30

Segundo o modelo de Tamir [5], nos limites considerados, o mecanismo de propagação dominante é o de uma onda de superfície que se propaga ao longo da interface floresta-ar, decorrente da refração sob incidência em ângulo crítico θ_c . A Fig. 2 ilustra este conceito.

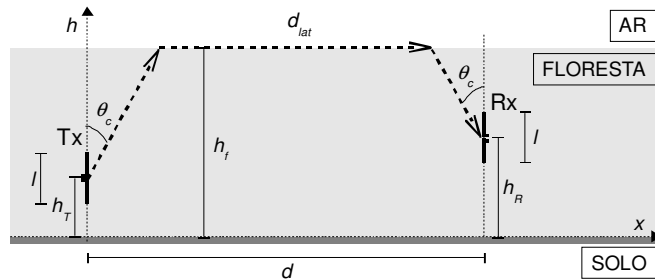


Fig. 2. Conceito da onda lateral de Tamir, com indicação do percurso de propagação mais significativo (linha tracejada).

Da análise das condições de contorno na interface floresta-ar e tendo em vista que a incidência se dá de um meio mais denso com perdas (floresta) para um meio menos denso sem perdas (ar), o ângulo crítico é dado por [9]:

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\text{Re} \left\{ \sqrt{\hat{\epsilon}_{rf}} - 1 \right\}} \right) \quad (1)$$

Em (1) a permissividade relativa complexa da floresta é dada por [9]:

$$\hat{\epsilon}_{rf} = \epsilon_{rf} - j \frac{\sigma_f}{\omega \epsilon_0} \quad (2)$$

em que ω (rad/s) é a frequência angular do sinal irradiado e $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$ é a permissividade do vácuo.

Nas expressões de campo assintóticas de Tamir, considera-se que as antenas são dipolos infinitesimais, de comprimento $l \ll \lambda_0$ (comprimento de onda no espaço livre). Apenas polarizações lineares vertical e horizontal são abordadas em [5]. O modelo assume, ainda, que as antenas transmissora e receptora têm o mesmo comprimento e a mesma polarização. No presente trabalho, apenas a modelagem referente à polarização vertical foi tomada.

É importante reforçar que o modelo de Tamir aponta a contribuição da onda lateral como aquela que domina a composição do campo total recebido. Com isso, a parcela associada à refração ionosférica é desprezada, assim como outras contribuições como a da propagação na direção de visada e as reflexões no solo e na interface floresta-ar. A validação experimental do modelo foi apresentada em alguns trabalhos, inclusive nacionais, como [1]-[2] e [10]-[11].

A intensidade E_{lat} do campo recebido por uma antena dipolo infinitesimal polarizada verticalmente (alinhada com o eixo h da Fig. 1) é dada por [5]:

$$E_{lat} = -j \frac{60Il}{n_f^2 - 1} \frac{e^{-jk_0(d + s\sqrt{n_f^2 - 1})}}{d^2} \quad (3)$$

em que I (A) é a corrente na entrada da antena transmissora, l (m) é o comprimento da antena, k_0 é a constante de fase no espaço livre, d (m) é a distância entre as antenas, e $h_{T,R}$ (m) são as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente. Os demais parâmetros em (3) são dados pelas expressões [5]:

$$s = 2h_f - h_T - h_R \quad (4)$$

$$n_f = \sqrt{\hat{\epsilon}_{rf}} \quad (5)$$

sendo n_f o índice de refração da floresta.

Neste trabalho, como em [6], o cálculo da potência recebida P_R (W) baseia-se no conceito de comprimento vetorial efetivo para determinar a tensão induzida V_R (V) nos terminais de saída da antena receptora [12]. Com isso, tem-se:

$$V_R = E_{lat} \cdot l/2 \quad (6)$$

$$P_R = \frac{V_R^2}{R_{AR}} = \frac{E_{lat}^2 l^2}{4(R_{rR} + R_{IR})} \quad (7)$$

com E_{lat} dado por (3). R_{AR} é a resistência da antena receptora, dada pela soma R_{rR} (Ω) - resistência de radiação, mais R_{IR} (Ω) -

resistência de perdas da antena receptora. Considera-se que a antena receptora está casada à carga.

A corrente I na entrada da antena transmissora pode ser expressa em função da potência de transmissão P_T (W) por:

$$I = \sqrt{\frac{e_{cd} P_T}{R_{rT}}} \quad (8)$$

em que e_{cd} é a eficiência de radiação e R_{rT} (Ω) é a resistência de radiação da antena transmissora, assumindo-se que a antena esteja casada à saída do transmissor (P_T é a potência efetivamente entregue à antena). A eficiência de radiação é dada por:

$$e_{cd} = \frac{R_{rT}}{R_{rT} + R_{lT}} \quad (9)$$

em que R_{lT} (Ω) é a resistência de perdas da antena transmissora.

A resistência de radiação é função não só da antena propriamente dita como do meio que a cerca. Não obstante, a exemplo da argumentação em [6], optou-se, neste trabalho, pelas expressões conhecidas para a condição de espaço livre, pois o efeito do solo e da camada de floresta tendem a ser pouco significativos em antenas infinitesimais. Com isso, as resistências de radiação e de perdas são dadas por [12]:

$$R_{rT,R} = 80\pi \left(\frac{l}{\lambda_0} \right)^2 \quad (10)$$

$$R_{lT,R} = \frac{l}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_c}} \quad (11)$$

Em (11), a (m) é o raio da seção reta circular da antena (fio cilíndrico) e σ_c (S/m) é a condutividade do metal do qual a antena é constituída.

III. ADAPTAÇÃO DO MODELO DE TAMIR PARA USO DE BASES DE DADOS CARTOGRÁFICOS

Como ilustrado pela Fig. 1, o modelo de Tamir considera uma geometria idealizada uniforme para a camada de floresta, sem variação de altura do terreno e da copa das árvores. Esta abordagem é pertinente para aplicação em cenários com variação pouco expressiva dessas alturas, particularmente em predições PA, bastando para isso tomar as alturas médias dos dois estratos como referências. Por outro lado, em predições PP, espera-se acompanhar as oscilações da potência recebida em função das variações de alturas ao longo dos percursos analisados. Neste caso, não há como aplicar diretamente o modelo de Tamir, na forma expressa em (3).

Para tentar estender a aplicação do modelo de Tamir a predições PP, é preciso observar dois aspectos fundamentais. Em primeiro lugar, o mecanismo de propagação dominante é a onda lateral, um tipo específico de onda que se propaga *ao longo* da interface em questão (floresta-ar). O segundo aspecto relevante diz respeito ao cenário de aplicação. A geometria idealizada da Fig. 1 é uma mera abstração de florestas que apresentam pequenas variações nas altimetrias do terreno e da copa das árvores, comparáveis a frações ou a poucos comprimentos de onda do sinal de rádio. O exemplo típico no contexto brasileiro é o das florestas ombrófilas densas de terras baixas, de presença abundante na Amazônia [1]-[2].

Tendo em vista os aspectos fundamentais da radiopropagação HF/VHF em florestas densas sobre terrenos pouco acidentados, o presente trabalho propõe uma abordagem heurística de adaptação do modelo de Tamir para predições PP. Para tal, duas aproximações são adotadas. A primeira é assumir que a onda lateral *acompanha* as flutuações de altura da copa das árvores, sem perdas adicionais consideráveis, dada a pequena amplitude dessas variações de altura. A segunda é considerar que o impacto principal das oscilações de altura do terreno seja tomado somente nas alturas *efetivas* das antenas de transmissão e recepção, tendo em vista que a parte real do termo exponencial em (3) é função somente do trecho propagado ao longo do eixo h , dado por (4) no caso original.

A Fig. 3 ilustra o cenário de aplicação da adaptação proposta ao modelo de Tamir para uso com modelos digitais de altura de terreno e de vegetação. Observa-se que tanto a altura da copa quanto a do solo variam com a posição de observação ao longo do eixo horizontal (x). Em vez de um valor único de altura da copa h_f , como na Fig. 2, é preciso considerar as duas alturas distintas indicadas na Fig. 3: uma tomada no ponto de refração próximo ao transmissor (h_{fT}); outra no ponto de refração próximo ao receptor (h_{fR}).

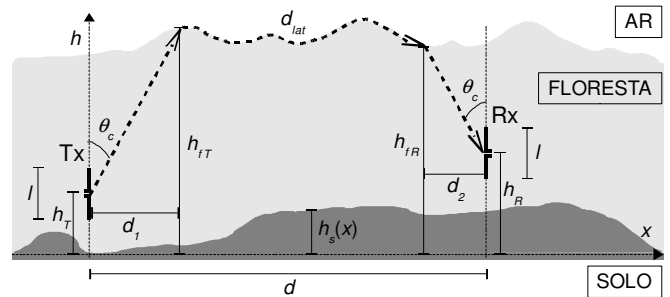


Fig. 3. Adaptação do conceito de onda lateral de Tamir para terreno e copa irregulares, com indicação do percurso de propagação mais significativo (linha tracejada).

Com isso, tomando por base a geometria da Fig. 3, a intensidade de campo elétrico passa a ser dada por:

$$E'_{lat} = -j \frac{60Il}{n_f^2 - 1} \frac{e^{-jk_0(d' + s' \sqrt{n_f^2 - 1})}}{d'^2} \quad (12)$$

onde

$$d' = d_1 + d_2 + d_{lat} \quad (13)$$

$$s' = h_{fT} - h_T + h_{fR} - h_R \quad (14)$$

A distância d_{lat} corresponde ao perímetro total entre os pontos de incidência na copa e retorno à floresta da onda lateral, como indicado na Fig. 3. Os parâmetros geométricos d_1 , d_2 , h_T e h_R em (13) e (14) estão definidos na Fig. 3. As demais variáveis em (12) são as mesmas definidas na seção II. Destaca-se, ainda, que todas as alturas em (14) estão referenciadas a $h = 0$ na Fig. 3.

IV. TESTE PRELIMINAR DO MODELO

A adaptação proposta foi implementada em uma rotina para Matlab. O algoritmo lê, inicialmente, duas matrizes com informações de altimetria do terreno e da copa de árvores da região de interesse. Essas matrizes são obtidas a partir de modelos digitais de terreno, como os do projeto SRTM da

NASA [13], ou do Projeto Radiografia da Amazônia, da Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro (DSG) [14]. No presente trabalho, tomou-se como dados de entrada uma base de alturas da copa de uma região de $10,7 \times 10,7 \text{ km}^2$ nos arredores de São Gabriel da Cachoeira – AM, obtida em [15]. Essa base, representada na Fig. 4, foi oriunda do projeto SRTM, com resolução horizontal de 90 m.

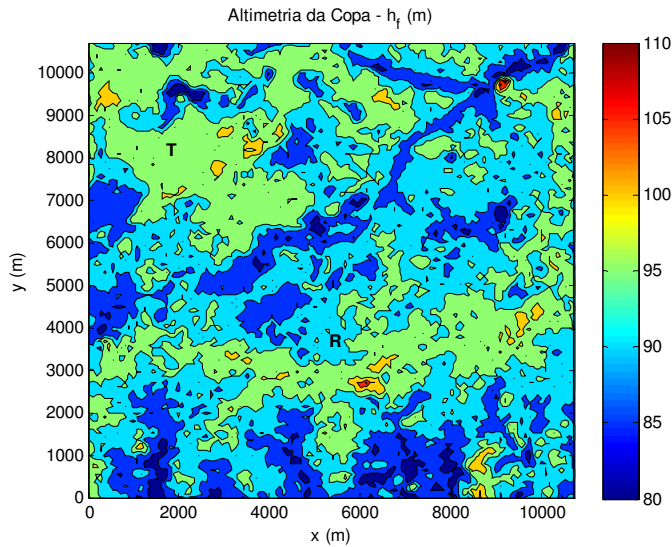


Fig. 4. Modelo digital de altura da copa das árvores da área selecionada.

O projeto SRTM não levantou dados que possibilitassem a geração de modelos digitais de terreno das florestas amazônicas. Em função disso, para testar o algoritmo desenvolvido, precisou-se criar uma base hipotética de alturas do terreno (h_s). Para tal, adotou-se uma altura média de copa $h_{fm} = 30 \text{ m}$ como referência. A base criada tinha as mesmas alturas da copa (h_f), subtraídas daquela altura média e de uma variável aleatória normal, de média nula e desvio-padrão ajustável. A Fig. 5 ilustra uma base gerada, tomando um desvio-padrão de 7 m. A escolha deste valor particular hipotético foi baseada em avaliações esporádicas das estatísticas de altimetria de bases SRTM de alguns trechos de floresta ao redor de Manaus e São Gabriel da Cachoeira, que deram desvios-padrão entre 5 e 15 m. Em [16], esse mesmo valor de 7 m foi observado no cenário de floresta considerado.

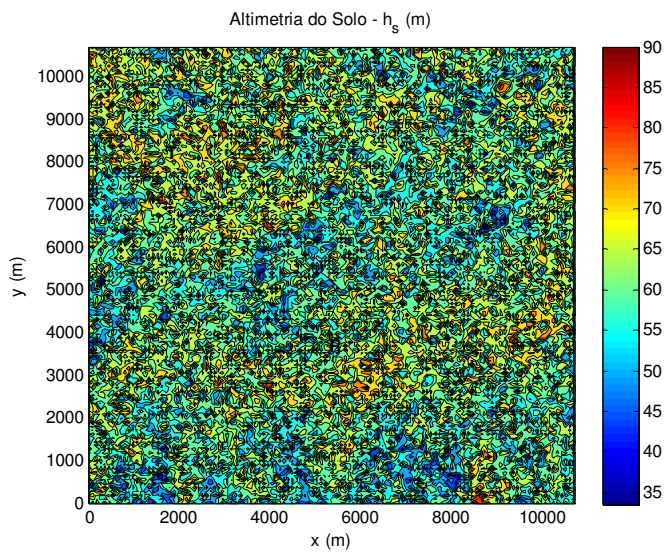


Fig. 5. Modelo digital de altura do terreno da área selecionada.

Além das bases altimétricas, é preciso especificar ainda os parâmetros elétricos da floresta e os dados do sistema de rádio. Para o presente teste, os valores de floresta densa da Tabela I foram tomados. Quanto aos dados de sistema, considerou-se o uso de antenas dipolo curtas com $l = \lambda_0/50$, ambas polarizadas verticalmente e a uma altura de 3 m com relação ao terreno. Como a aplicação desejada era a de sistemas táticos pessoais, escolheu-se um valor típico de potência de transmissão: $P_T = 10 \text{ W}$. A perda de percurso foi calculada em uma frequência na faixa de HF e outra na de VHF.

As Figs. 6 e 7 ilustram o decaimento da potência recebida ao longo do percurso entre os pontos T e R indicados na Fig. 4, para as frequências de 20 e 50 MHz, respectivamente. O ponto T representa um transmissor localizado nas coordenadas (1710, 8100), e R um receptor na posição final do percurso em (5310, 3600). Dois modelos foram representados: o proposto, que considera os dados reais altimétricos; e o ideal, calculado para uma altura média igual a 30 m e terreno regular. A diferença entre as alturas da copa e do terreno ao longo do percurso também são ilustradas para facilitar a análise.

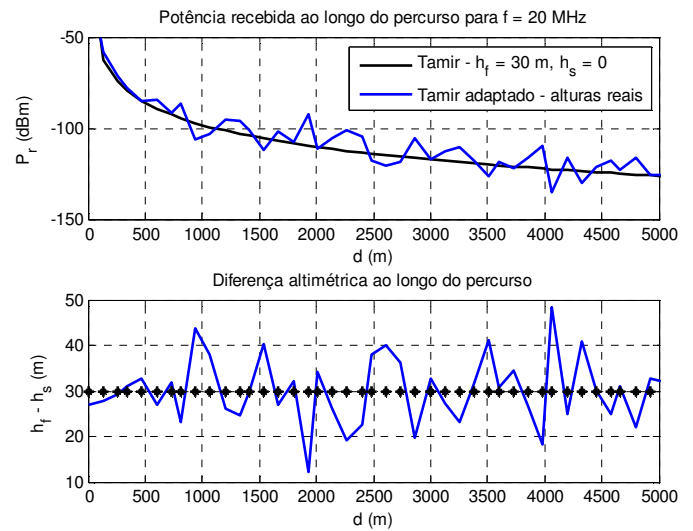


Fig. 6. Potência recebida e perfil de diferenças altimétricas ao longo do percurso escolhido, para $f = 20 \text{ MHz}$.

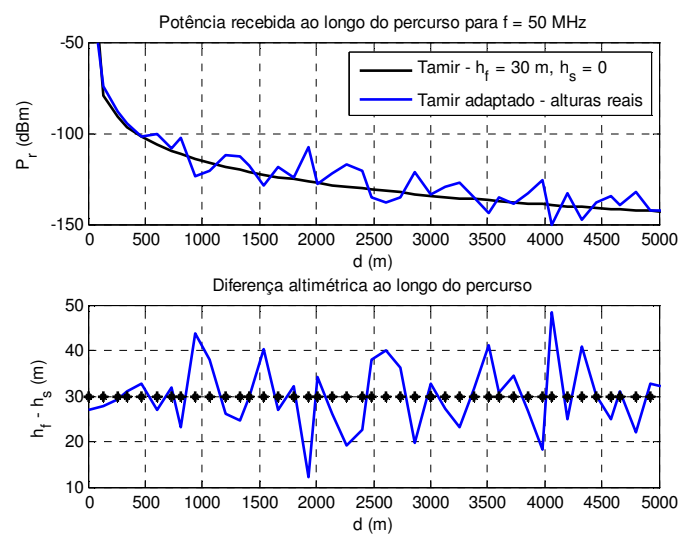


Fig. 7. Potência recebida e perfil de diferenças altimétricas ao longo do percurso escolhido, para $f = 50 \text{ MHz}$.

Em ambas as Figs. 6 e 7 percebe-se claramente a presença de um “ganho de altura” no modelo proposto. Diferenças de altura maiores que o valor médio (30 m) levam a incrementos na atenuação do sinal com relação à predição ideal, e vice-versa. De fato, a variação mais representativa esperada estava associada ao parâmetro s' de (14), já que d' tende a ser aproximadamente igual a d no cenário em questão. Os resultados apresentados são coerentes com o esperado, e apontam variações significativas (> 10 dB) que o modelo ideal não teria como prever.

O algoritmo realiza também a predição para toda a área considerada. As Figs. 8 e 9 ilustram os mapas de cobertura de sinal para os dois cenários previamente considerados. Os resultados também são coerentes, apontando uma esperada simetria aproximadamente circular no decaimento médio do sinal com a distância. As variações em torno desse comportamento são em decorrência do “ganho de altura” pontual, já discutido.

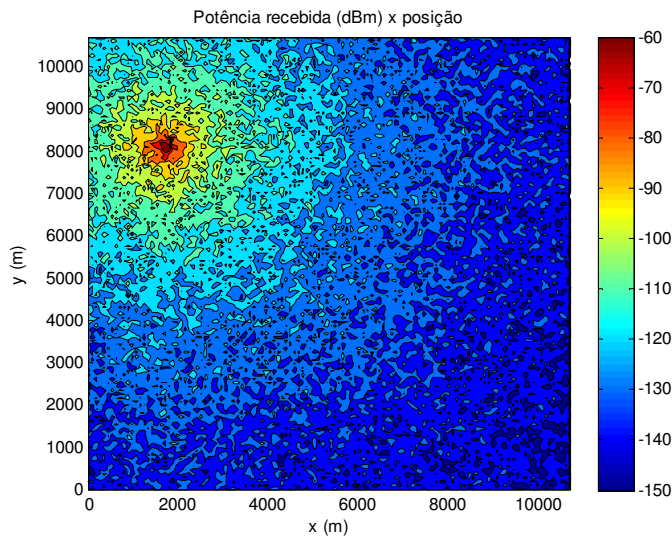


Fig. 8. Diagrama de cobertura PP na área selecionada, para $f = 20$ MHz.

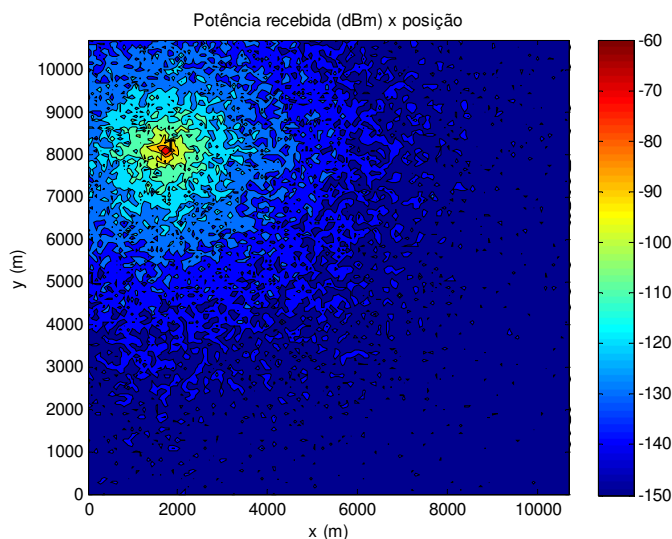


Fig. 9. Diagrama de cobertura PP na área selecionada, para $f = 50$ MHz.

V. CONCLUSÃO

Uma adaptação do modelo de Tamir foi proposta no presente trabalho, para permitir sua utilização plena em ferramentas de predição de cobertura PP de sistemas táticos de rádio HF/VHF em florestas. A partir do conhecimento sobre o mecanismo fundamental de propagação no cenário em questão, propôs-se, heurísticamente, inserir as variações pontuais de alturas do terreno e da copa das árvores na equação de campo elétrico do modelo de Tamir. Desse modo, o modelo passou a apresentar comportamento PP, que se manifesta essencialmente na forma de um “ganho de altura”. Testes preliminares confirmaram a coerência dos resultados e o maior potencial de aproveitamento das bases de dados altimétricos em predições de cobertura. A adaptação PP permite apontar e quantificar flutuações significativas do sinal na região analisada, que o uso PA do modelo original não tem como prever.

Apesar do potencial evidenciado pela técnica proposta, falta validação experimental. Os preparativos para isso estão em andamento. Modelos digitais de altura de terreno e de copa das árvores de algumas localidades da Amazônia foram solicitados à DSG, em particular de São Gabriel da Cachoeira. Assim que estiverem disponíveis, serão enviados aos autores. Prevê-se, ainda, campanha de medidas em 2012 naquela cidade, para complementar o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] “Florestas do Brasil em resumo”, Serviço Florestal Brasileiro, Ministério do Meio Ambiente, Brasília – DF, 2010.
- [2] IBGE, Manual Técnico da vegetação brasileira, 1992.
- [3] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, “Comunicações táticas na região amazônica – 1ª Parte”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol. IX, no. 3, pp. 12-20, 1992.
- [4] J. C. R. Dal Bello, M. S. Assis, “Comunicações táticas na região amazônica – 2ª Parte”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, vol. IX, no. 4, pp. 7-19, 1992.
- [5] T. Tamir, “On Radio Wave Propagation in Forest Environments”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-15, no. 6, pp. 806-817, Nov 1967.
- [6] D. Dence, T. Tamir, “Radio loss of lateral waves in forest environments”, *Radio Science*, vol. 4, no. 4, pp. 307-318, Abr 1969.
- [7] T. Tamir, “Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-25, no. 4, pp. 471-477, Jul 1977.
- [8] M. H. C. Dias, R. A. Alem, J. C. A. Santos, “Análise Crítica do Modelo de Tamir para Predição de Alcance de Rádio-Enlaces em Florestas”, in *9th Int. Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2010)*, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, vol. 1, pp. 1-7, 13-15 Dez 2010.
- [9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, 1989.
- [10] J. C. R. Dal Bello, Propagação de Ondas Eletromagnéticas na Floresta Amazônica, dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro – RJ, 1984.
- [11] R. C. Pinto Filho, Propagação de Sinais Radioelétricos na Floresta Amazônica: Dimensionamento de Sistema, dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro – RJ, 1986.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Ed, Wiley, 2005.
- [13] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Isdorf, “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Reviews of Geophysics*, vol. 45, no. RG2004, Mai 2007.
- [14] DSG, Documento descritivo do Projeto Radiografia da Amazônia, em www.dsg.eb.mil.br/prjram (acesso em 04/04/2011).
- [15] Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility, em <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> (acesso em 04/04/2011).
- [16] G. M. O. Silva, Desenvolvimento de Algoritmo para Predição de Cobertura de Bloqueio de Rádio-Frequência em HF/VHF/UHF, dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro – RJ, 2009.