

5 Configurações 3D

Neste capítulo, o modelo proposto descrito no capítulo 2 será usado para analisar os efeitos do terreno irregular. O terreno irregular, representando configurações tridimensionais hipotéticas, é formado basicamente por combinações de obstáculos Gaussianos. Cada obstáculo Gaussiano é representado pela seguinte função altura

$$h(\Theta, \Phi) = h_0 e^{-\left(\frac{\Theta - \Theta_0}{d\Theta}\right)^2} e^{-\left(\frac{\Phi - \Phi_0}{d\Phi}\right)^2} \quad (5.1)$$

onde

$$d\Theta = w_\Theta / \sqrt{\ln(10)} \quad (5.2)$$

$$d\Phi = w_\Phi / \sqrt{\ln(10)} \quad (5.3)$$

onde Θ_0 e Φ_0 simplesmente translada o perfil em relação à origem e representam o centro da montanha. Por outro lado, h_0 , w_Θ e w_Φ são, respectivamente, a altura de pico, a largura do obstáculo Gaussiano em Θ quando $h(\Theta, \Phi) = h_0/10$ e a largura do obstáculo Gaussiano em Φ quando $h(\Theta, \Phi) = h_0/10$.

Primeiramente, a análise será feita para um terreno irregular suave e continuamente diferenciável representado por um obstáculo Gaussiano isolado. Em seguida, o terreno irregular será representado por um par de obstáculos Gaussianos simetricamente localizados com respeito ao plano vertical contendo o transmissor e receptor. Por último, a análise dos efeitos do terreno irregular definido novamente por um par de obstáculos Gaussianos localizados simetricamente com respeito ao plano vertical contendo o transmissor e receptor será feita. A diferença, agora, é que os efeitos da propagação lateral estarão mais

evidentes, uma vez que os centros dos obstáculos Gaussianos estarão mais próximos.

Todos os resultados apresentados aqui foram simulados numa estação de trabalho Dell *Precision WorkStation* T3500 com processador Intel(R) *Xeon* CPU W3540 contendo quatro núcleos reais e quatro virtuais, cada um tendo a velocidade de 2,93 GHz, com 12 GB de memória RAM disponível, com capacidade de armazenamento de 350 GB, placa gráfica NVIDIA Quadro FX 1800 com 4 GB de memória gráfica e sistema operacional *Windows 7 Professional* de 64 bits. Os tempos de processamento necessários para a obtenção dos resultados apresentados pelo modelo proposto foram de sete dias, em média, para configurações tridimensionais e de, no máximo, 1 dia para configurações bidimensionais.

5.1. Um obstáculo Gaussiano

Nesta seção, considera-se um percurso de 10 km contendo um obstáculo Gaussiano definido conforme a Equação (5.1) com a altura de pico igual a 50 m. O centro da montanha está localizado a 5 km de distância em relação à fonte ($\Theta_0 = 5 \text{ km}/a$), onde a é o raio da Terra, e em 0° de azimute ($\Phi_0 = 0^\circ$). As espessuras longitudinal e lateral da montanha em pontos onde $h/10$ são iguais a 4 km e 1 km, respectivamente. A antena transmissora, operando em 1 GHz, está localizada na origem a 25 m acima do solo com permissividade relativa e condutividade iguais respectivamente a 15 e 0,01 S/m. O campo inicial, polarizado verticalmente, corresponde a uma distribuição Gaussiana tanto em elevação como em azimute. A largura de feixe de meia potência é de 3° em elevação e de 8° em azimute.

O domínio de propagação que limita a região de interesse se estende de 0 km a 10 km em distância radial ($x = a\theta$), de 0 m a 200 m em altura (z) e um ângulo de interesse compreendido em 40° . Os intervalos de discretização usados são: 10 m para a discretização horizontal ($\Delta x = a\Delta\theta$); 0,2 m para a discretização vertical (Δz) e $0,08^\circ$ para discretização em azimute ($\Delta\Phi$).

As figuras de 5.1 a 5.5 exibem a vista de topo da localização do obstáculo Gaussiano (representado pela cor branca) e da distribuição do fator de propagação

normalizado em decibéis (escala de cor) em diversas alturas, a saber: 10 m, 20 m, 25 m (altura do transmissor), 30 m e 40 m. Pode-se observar um perfil de interferência resultante da combinação das ondas direta e refletida no solo entre o transmissor e o obstáculo Gaussiano. Na altura de 40 m, correspondente à Figura 5.5, pode-se observar claramente, entre 4 km e 6 km, o perfil de difração devido a efeitos da dimensão lateralmente finita do obstáculo que não podem ser previsto por modelos bidimensionais.

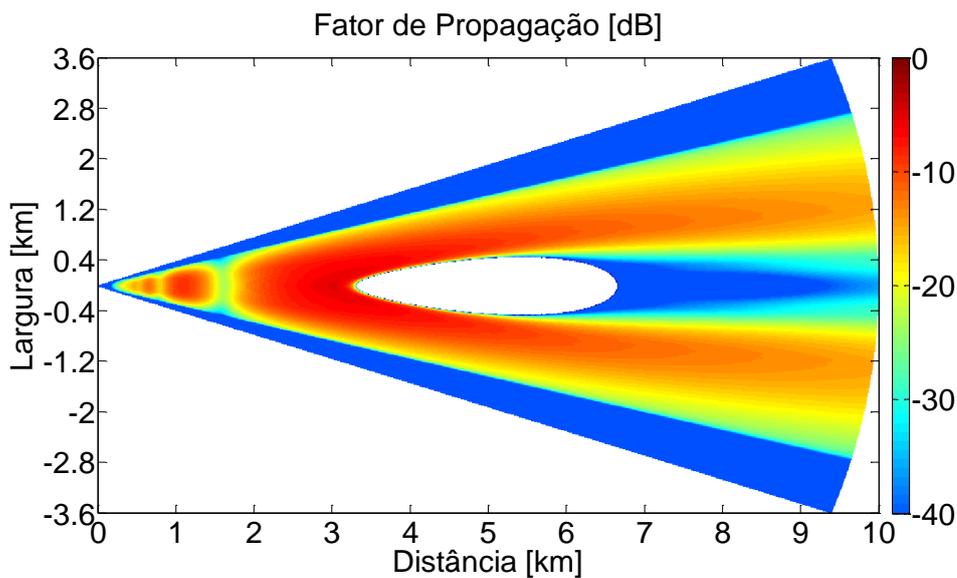


Figura 5.1 - Vista de topo do obstáculo Gaussiano (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 10 m

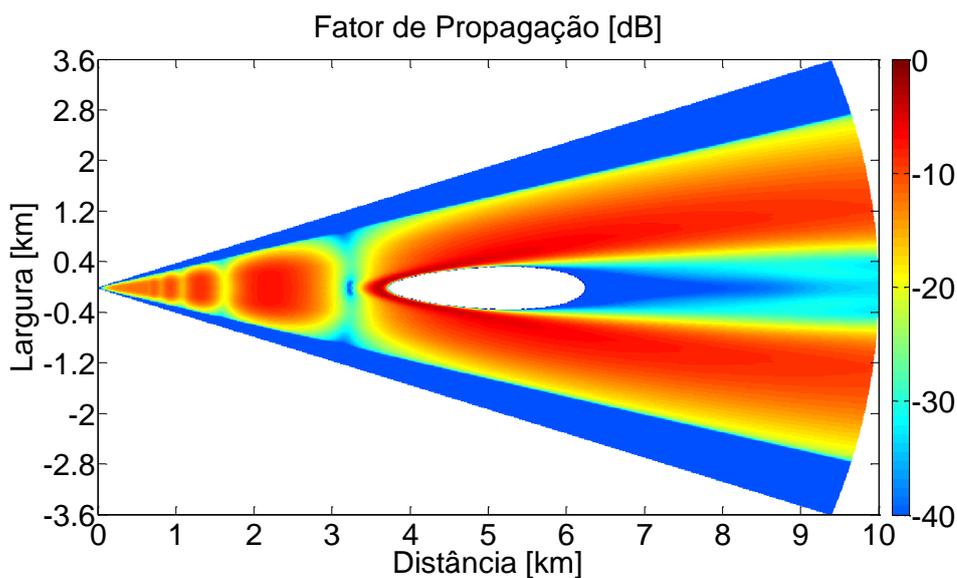


Figura 5.2 - Vista de topo do obstáculo Gaussiano (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 20 m

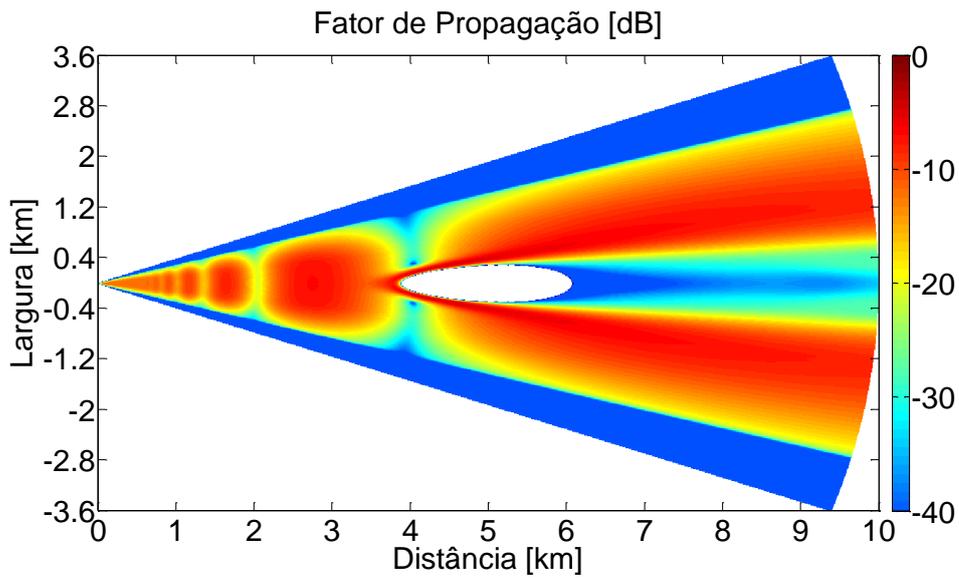


Figura 5.3 - Vista de topo do obstáculo Gaussiano (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura da antena transmissora ($h_{TX} = 25$ m)

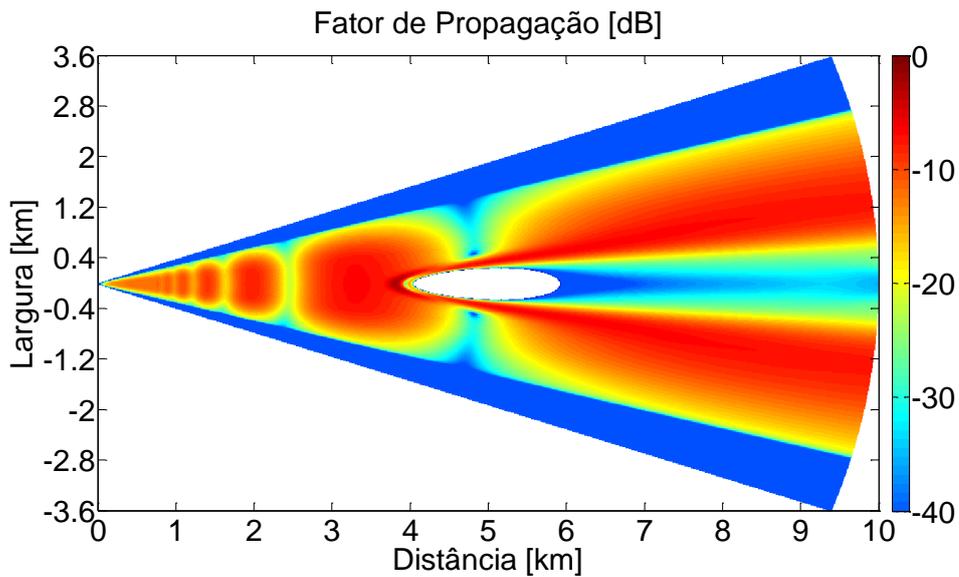


Figura 5.4 - Vista de topo do obstáculo Gaussiano (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 30 m

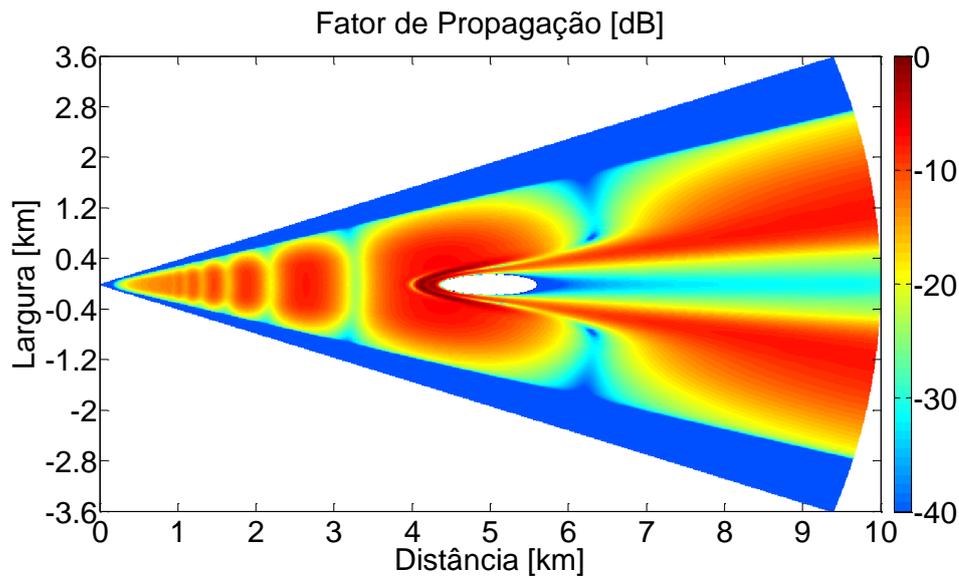


Figura 5.5 - Vista de topo do obstáculo Gaussiano (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 40 m

A Figura 5.6, representando a vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) no plano vertical central (azimute de 0°), ilustra a aplicação do modelo proposto ao terreno irregular tridimensional formado por um obstáculo Gaussiano (cor branca) com variação azimutal como definido acima. Como esperado, pode-se observar um perfil de interferência devido às ondas diretas e refletidas no solo antes da montanha, assim como fortes reflexões da face frontal do obstáculo Gaussiano e um profundo sombreamento do campo incidente a partir do pico.

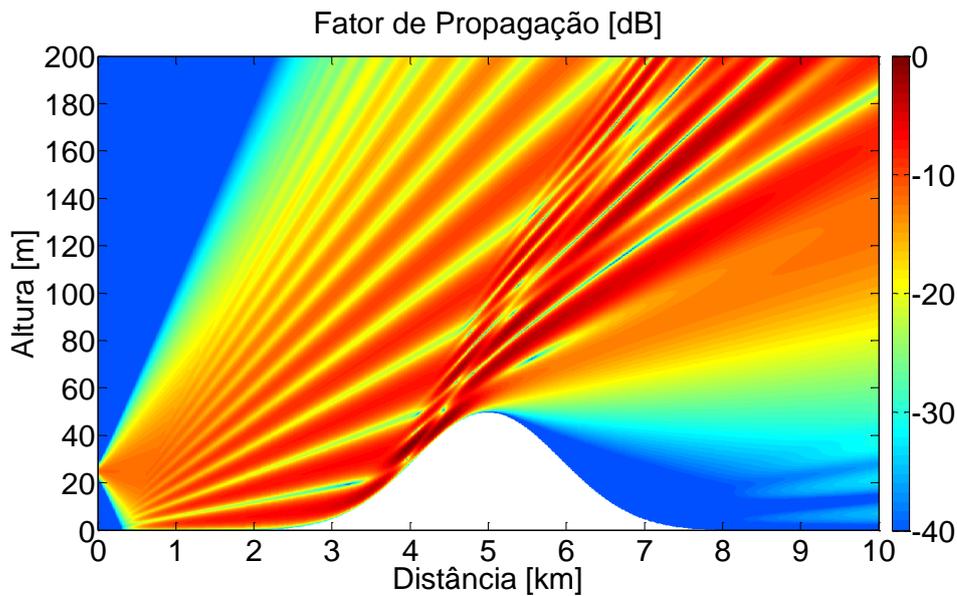


Figura 5.6 - Vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical central contendo o transmissor e receptor (azimute de 0°)

As figuras de 5.7 a 5.12 mostram um conjunto de distribuições do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) em planos transversais (Φ, z) para valores fixos de $\theta = x/a$. Esses planos estão localizados a 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km e 10 km do transmissor, respectivamente. O primeiro plano transversal intercepta o obstáculo Gaussiano no centro. A Figura 5.7 mostra que os efeitos da parte inicial da inclinação ascendente da montanha na distribuição do fator de propagação acompanham praticamente a curva do relevo, tendo variações em azimute que reforçam o campo lateralmente que um modelo bidimensional não apresentaria. É possível observar nessa figura a presença de um perfil de difração lateral no topo do obstáculo Gaussiano, no segundo e no terceiro lóbulo mais baixo, com o campo variando lateralmente entre mínimo e máximo. Esses efeitos da propagação lateral são evidentes em planos transversais mais distantes do transmissor, principalmente nos lóbulos superiores a partir do segundo.

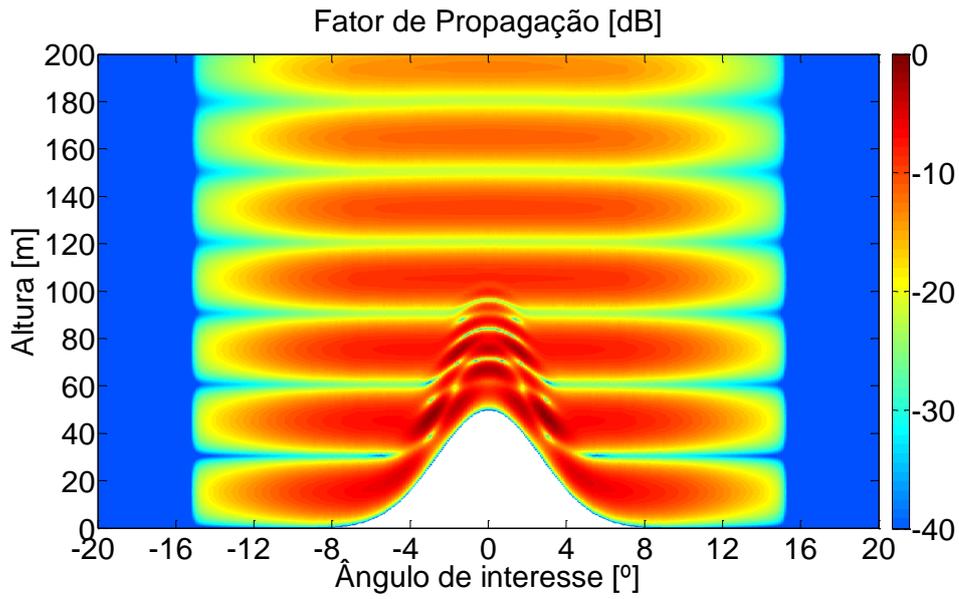


Figura 5.7 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 5 km do transmissor

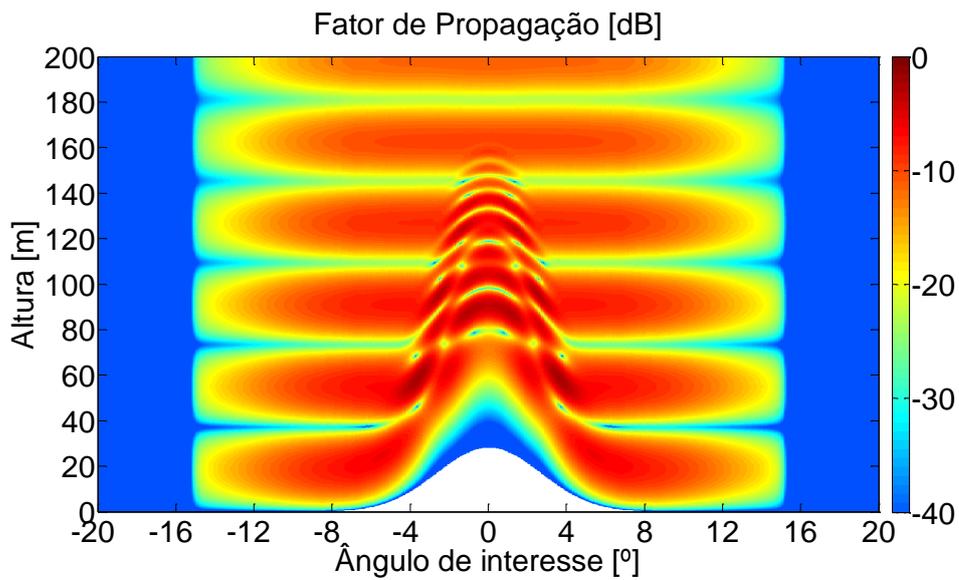


Figura 5.8 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 6 km do transmissor

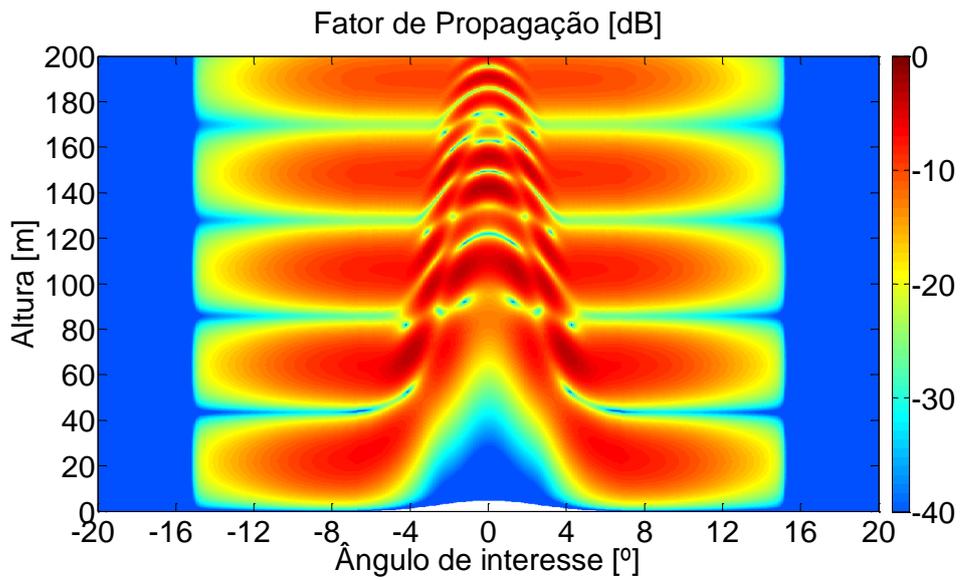


Figura 5.9 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 7 km do transmissor

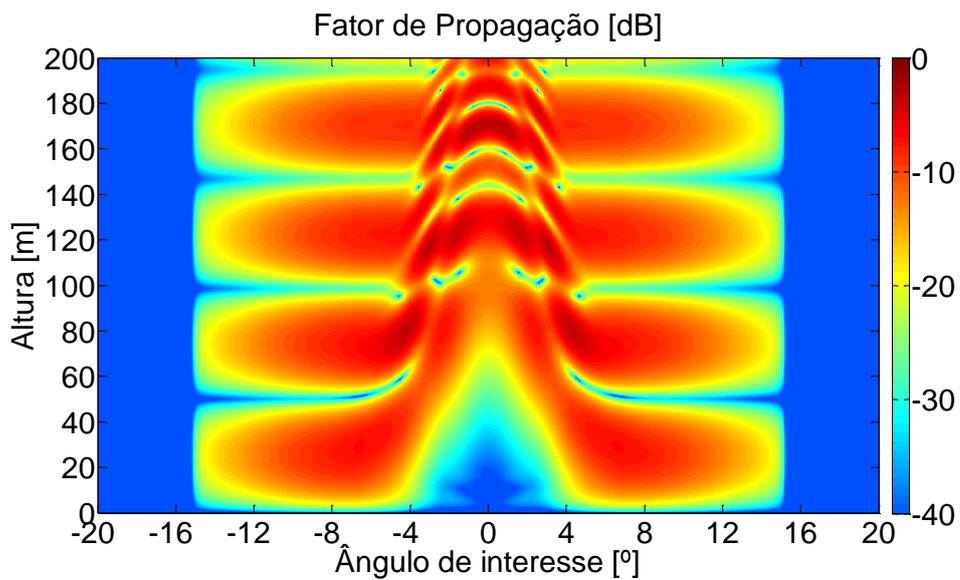


Figura 5.10 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 8 km do transmissor

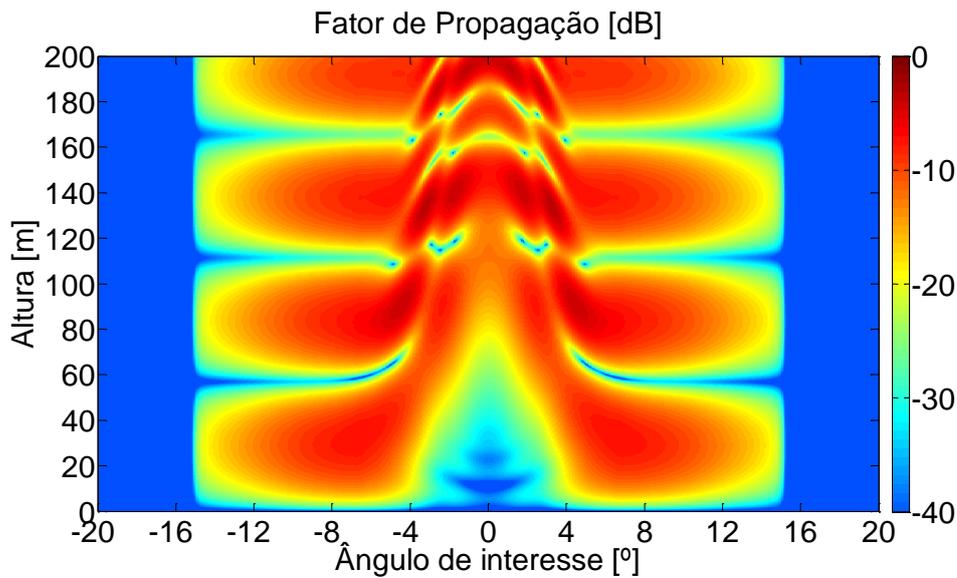


Figura 5.11 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 9 km do transmissor

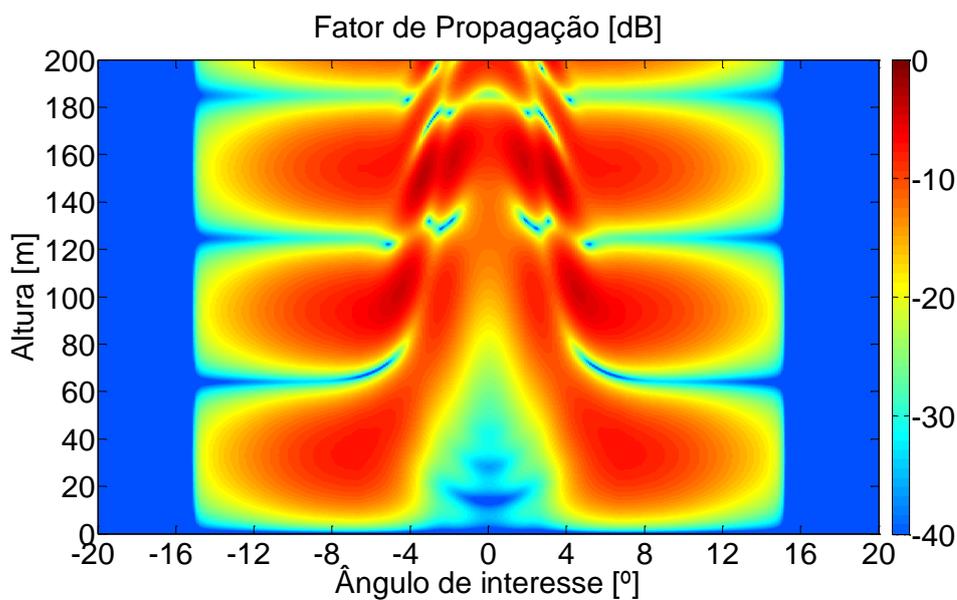


Figura 5.12 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 10 km do transmissor

5.2. Dois obstáculos Gaussianos

Nesta seção, considera-se um percurso de 10 km contendo um par de obstáculos Gaussianos definida conforme a Equação (5.1) com a altura de pico igual a 50 m. O centro de cada montanha está localizado a 5 km de distância em relação à fonte ($\theta_0 = 5 \text{ km}/a$), onde a é o raio da Terra, e em $\pm 5,14^\circ$ de azimute

($\Phi_0 = \pm 5,14^\circ$). As espessuras longitudinal e lateral das montanhas em pontos onde $h/10$ são iguais a 4 km e 600 m e a distância entre os centros das montanhas é igual a 900 m. A antena transmissora, operando em 1 GHz, está localizada na origem a 25 m acima do solo com permissividade relativa e condutividade iguais respectivamente a 15 e 0,01 S/m. O campo inicial, polarizado verticalmente, corresponde a uma distribuição Gaussiana tanto em elevação como em azimute. A largura de feixe de meia potência é de 3° em elevação e de 8° em azimute.

O domínio de propagação limitando a região de interesse se estende de 0 km a 10 km em distância radial ($x = a\theta$), de 0 m a 200 m em altura (z) e um ângulo de interesse compreendido em 40° . Os intervalos de discretização usados são: 10 m para a discretização horizontal ($\Delta x = a\Delta\theta$); 0,2 m para a discretização vertical (Δz) e $0,08^\circ$ para discretização em azimute ($\Delta\Phi$).

As figuras de 5.13 a 5.17 exibem a vista de topo da localização do par de obstáculos Gaussianos (representada pela cor branca) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) em diversas alturas, a saber: 10 m, 20 m, 25 m (altura do transmissor), 30 m e 40 m. Pode-se observar, novamente, um perfil de interferência resultante da combinação das ondas direta e refletida no solo entre o transmissor e o par de obstáculos Gaussianos. Na altura de 40 m, correspondente à Figura 5.17, pode-se observar claramente, entre 4 km e 6 km, o de difração devido aos efeitos da dimensão lateralmente finita dos obstáculos.

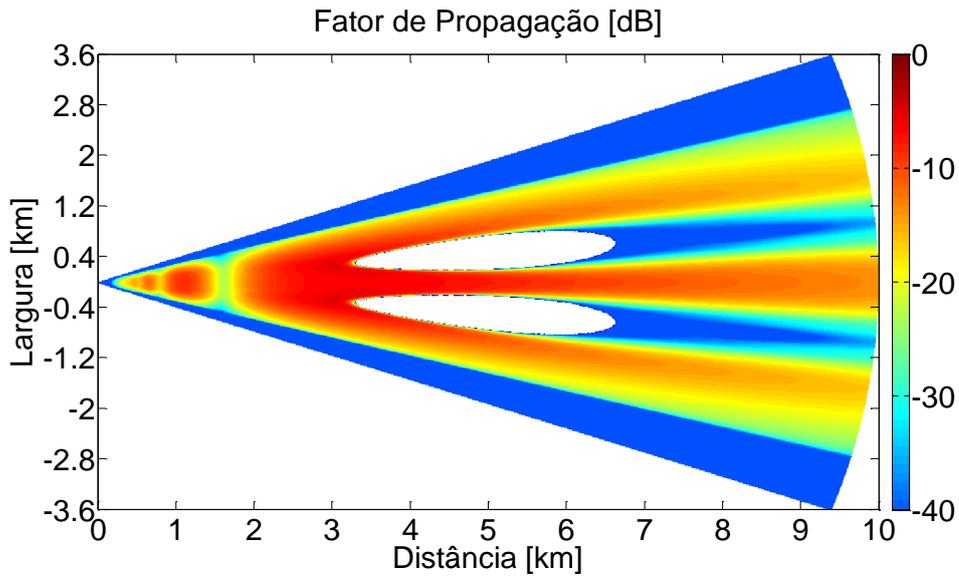


Figura 5.13 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 10 m

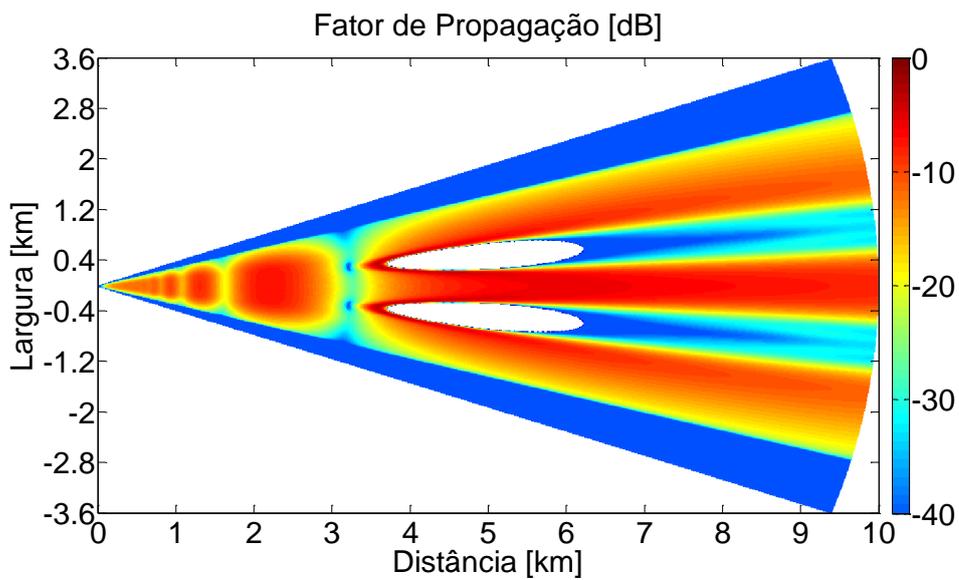


Figura 5.14 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 20 m

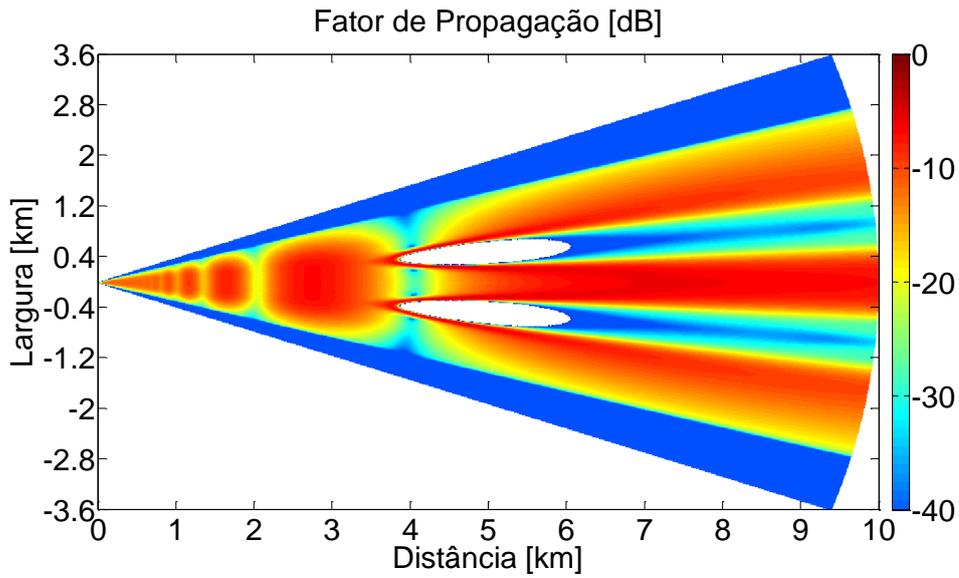


Figura 5.15 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura da antena transmissora ($h_{TX} = 25$ m)

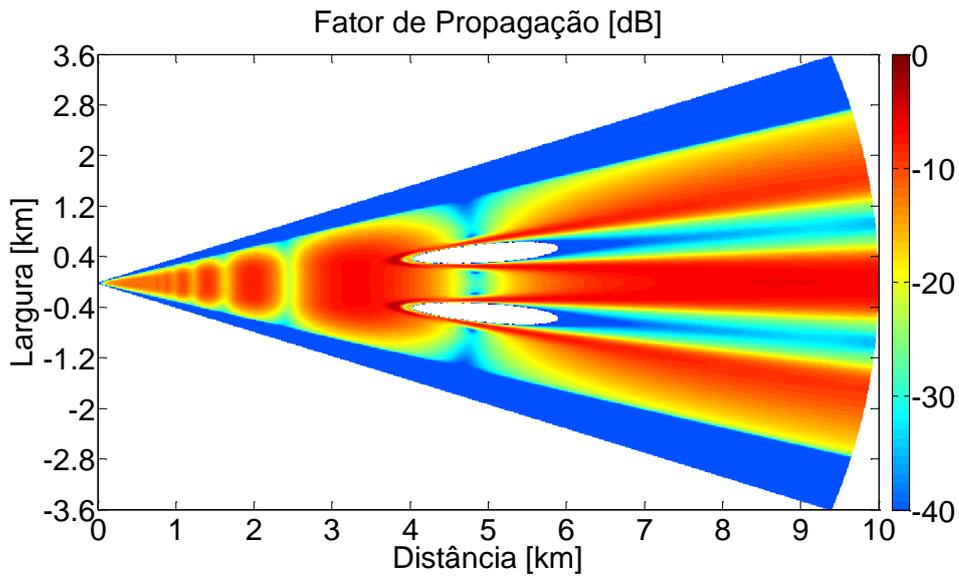


Figura 5.16 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 30 m

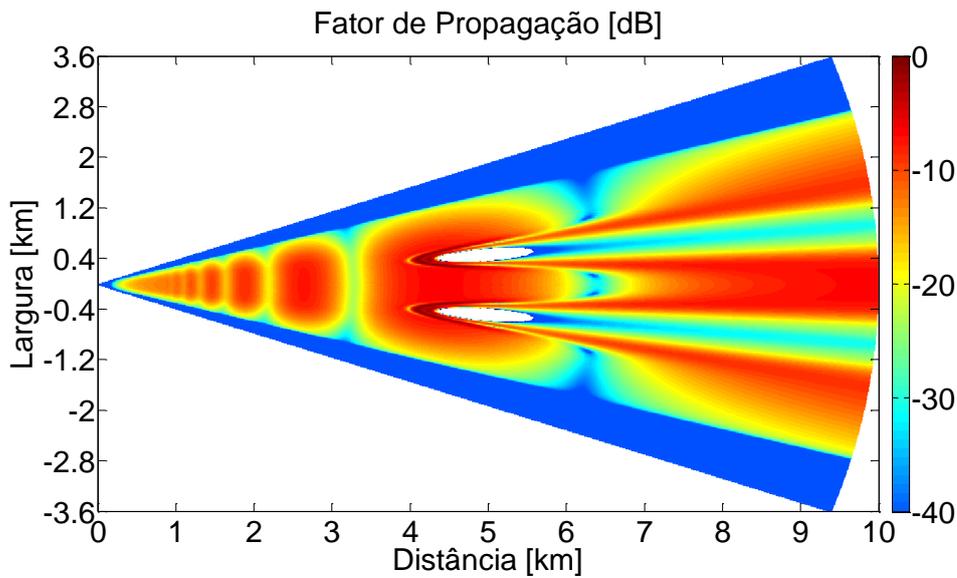


Figura 5.17 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 40 m

A Figura 5.18, representando a vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) no plano vertical central (azimute de 0°), ilustra a aplicação do modelo proposto ao terreno irregular tridimensional formado por um par de obstáculos Gaussianos com variação azimutal como definido acima. Por outro lado, a Figura 5.19 representa o plano vertical da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no azimute de $\pm 5,14^\circ$. Nessa figura, observam-se fortes reflexões da face frontal do perfil Gaussiano e um profundo sombreamento do campo incidente a partir do pico que representa um comportamento esperado como visto na seção anterior para um obstáculo Gaussiano.

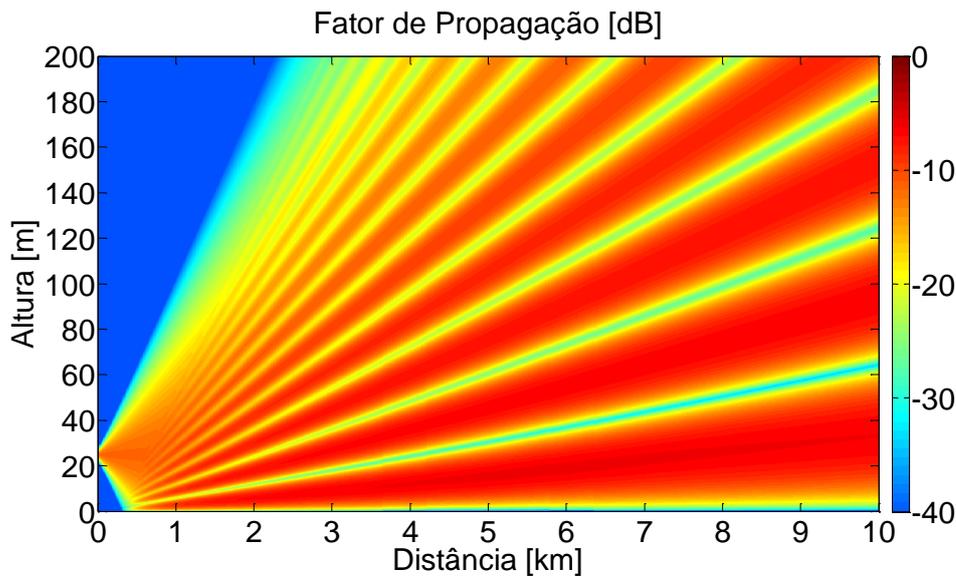


Figura 5.18 - Vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical central contendo o transmissor e receptor (azimute de 0°)

As figuras de 5.20 a 5.25 mostram um conjunto de distribuições do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) em planos transversais (Φ, z) para valores fixos de $\theta = x/a$. Esses planos estão localizados a 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km e 10 km do transmissor, respectivamente. O primeiro plano transversal intercepta o par de obstáculos Gaussianos no centro a 5 km da fonte. Assim como para um único obstáculo Gaussiano, a Figura 5.20 mostra que os efeitos da parte inicial da inclinação ascendente do par de obstáculos Gaussianos na distribuição do fator de propagação acompanham praticamente a curva do relevo, tendo variações em azimute que reforçam o campo lateralmente e esse comportamento não seria apresentado por um modelo bidimensional. Ainda nessa figura, é possível observar um reforço do campo no primeiro lóbulo mais baixo, na parte central, devido ao espalhamento e difração lateral. Como esperado, percebe-se nessa figura o mesmo comportamento do perfil de difração lateral no topo do obstáculo Gaussiano, no segundo e no terceiro lóbulo mais baixo, com o campo variando lateralmente entre mínimo e máximo. Esses efeitos da propagação lateral são evidentes em planos transversais mais distantes do transmissor, principalmente nos lóbulos superiores a partir do segundo e, diferentemente do observado no caso de um obstáculo Gaussiano isolado, aqui não há simetria em torno das montanhas. Os campos são ligeiramente mais fortes

na região central do que nas extremidades, como pode ser observado nos dois lóbulos mais baixos.

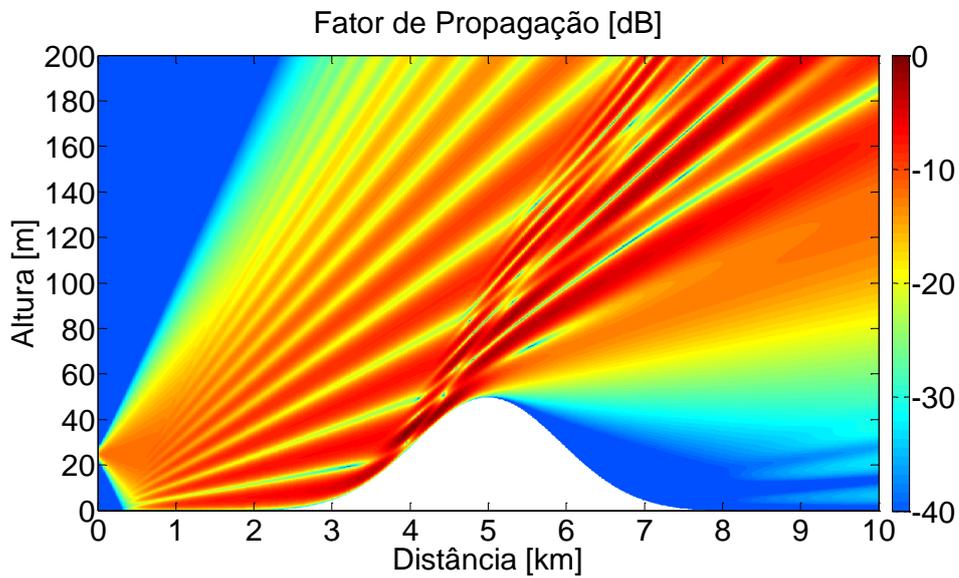


Figura 5.19 - Plano vertical da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no azimute de $\pm 5,14^\circ$

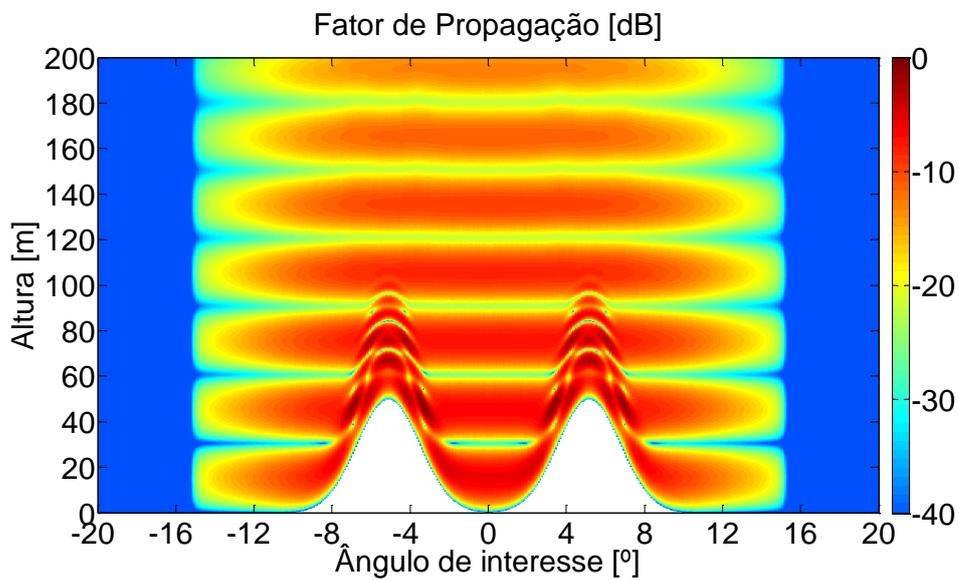


Figura 5.20 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 5 km do transmissor

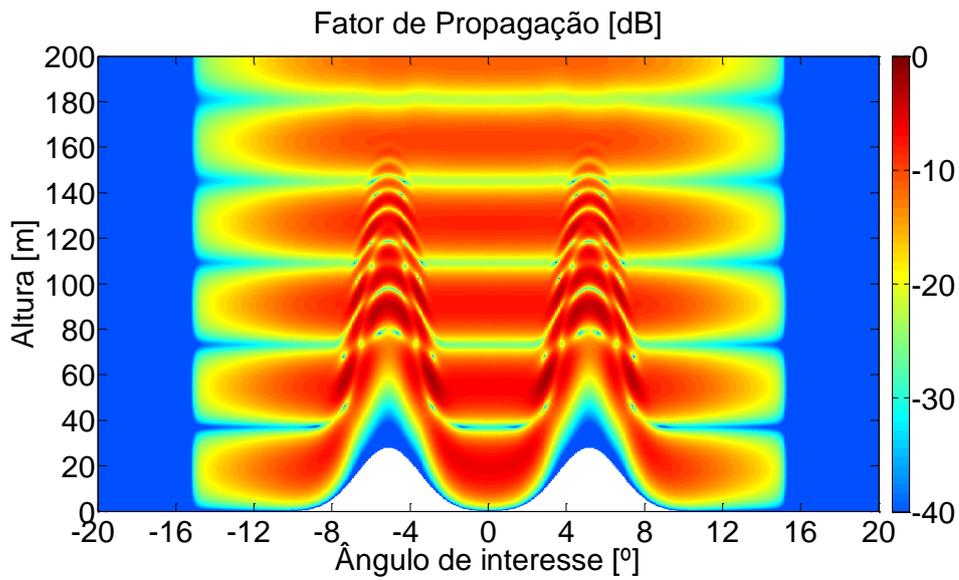


Figura 5.21 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 6 km do transmissor

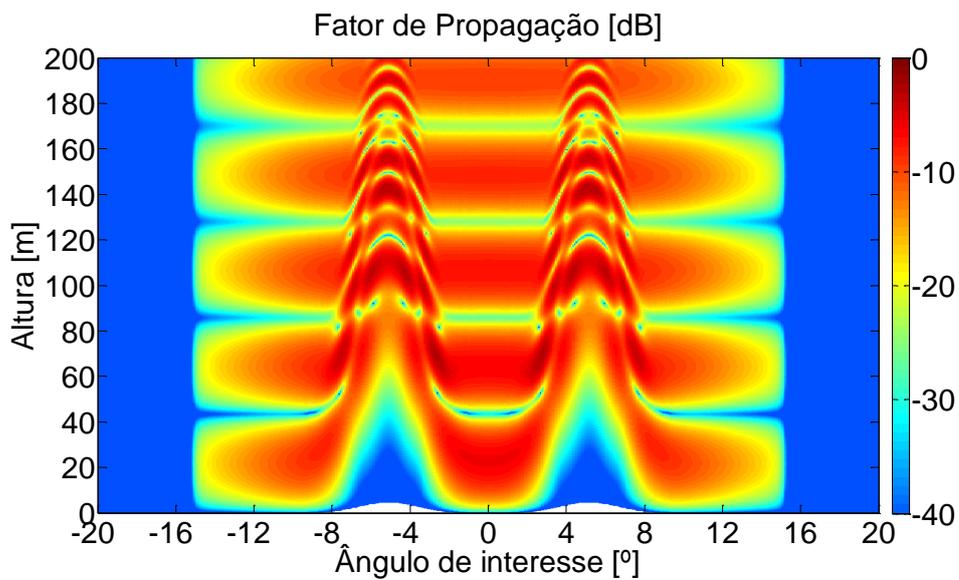


Figura 5.22 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 7 km do transmissor

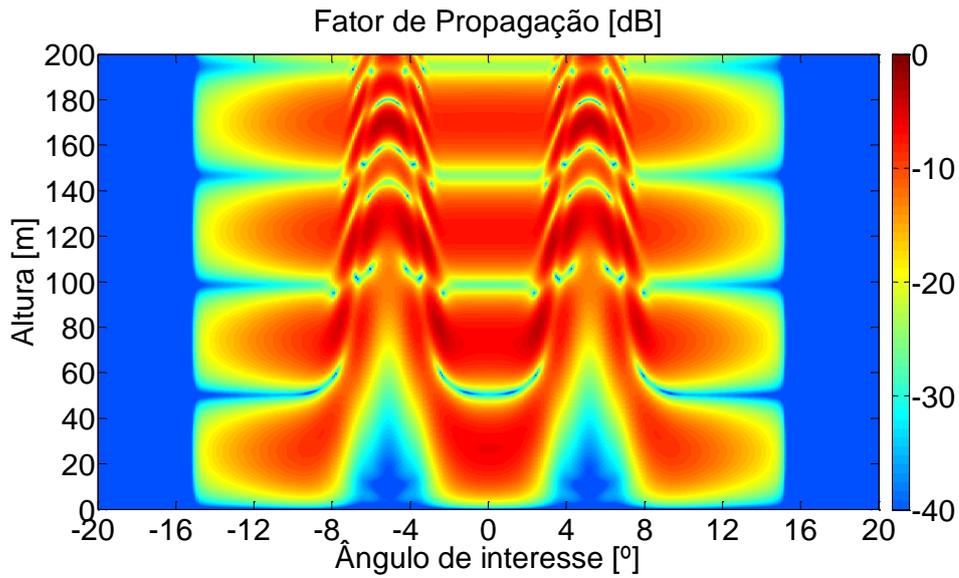


Figura 5.23 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 8 km do transmissor

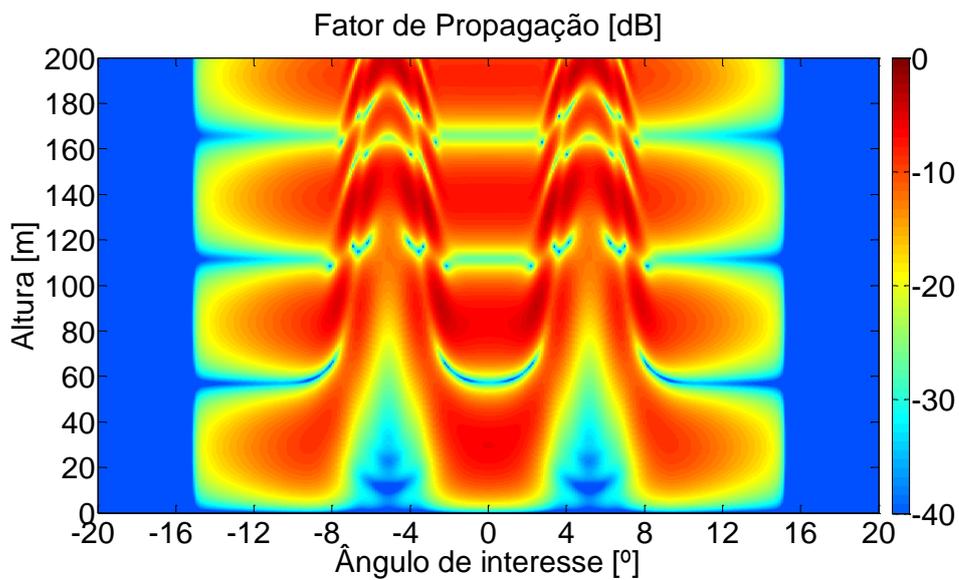


Figura 5.24 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 9 km do transmissor

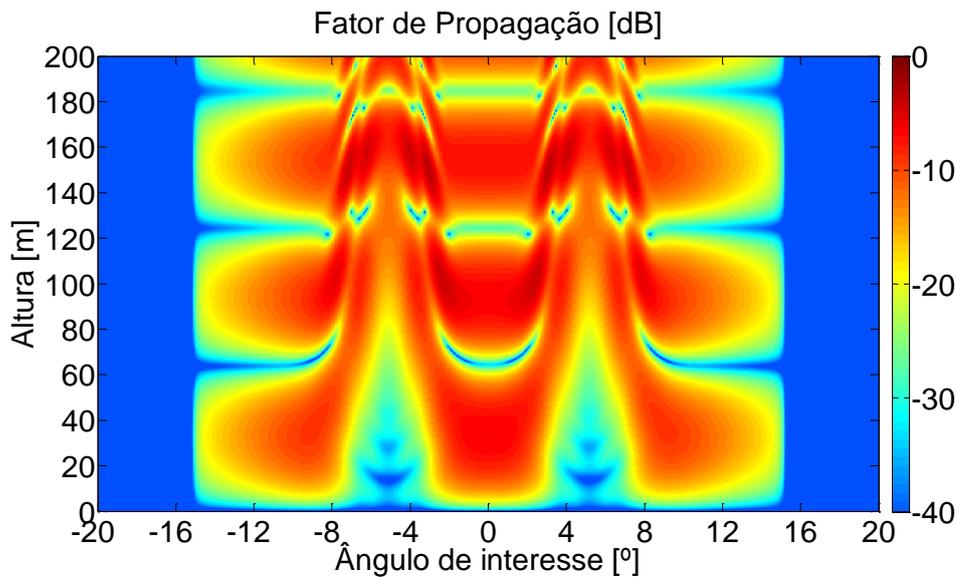


Figura 5.25 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 10 km do transmissor

5.3. Evidências da propagação lateral

Os dois exemplos acima não deixam claras as evidências do espalhamento e difração lateral. Para elucidar a importância do mecanismo da propagação lateral, considera-se um percurso de 10 km contendo um terreno irregular formado novamente por um par de obstáculos Gaussianos, só que agora a distância entre os centros das montanhas é igual 80 m e a largura lateral equivale a 60 m em pontos a 5 m do solo. Os obstáculos Gaussianos são definidos conforme a Equação (5.1) com altura de pico igual a 50 m. O centro de cada montanha está localizado a 5 km de distância em relação à fonte ($\theta_0 = 5 \text{ km}/a$), onde a é o raio da Terra, e em $\pm 0,4584^\circ$ de azimute ($\Phi_0 = \pm 0,4584^\circ$). As espessuras longitudinal e lateral das montanhas em pontos onde $h/10$ são iguais a 3 km e 60 m. A antena transmissora, operando em 1 GHz, está localizada na origem a 25 m acima do solo com permissividade relativa e condutividade iguais respectivamente a 80 e 4,4 S/m. O campo inicial, polarizado verticalmente, corresponde a uma distribuição Gaussiana em elevação, sem variação em azimute. A largura de feixe de meia potência é de 3° em elevação. O campo inicial não tem variação em azimute, pois essa característica dispensa o uso do filtro lateral, desde que não haja campo incidente obliquamente ao limite da grade de interesse.

O domínio de propagação limitando a região de interesse se estende de 0 km a 10 km em distância radial ($x = a\theta$), de 0 m a 200 m em altura (z) e um ângulo de interesse compreendido em 4° . Os intervalos de discretização usados são: 10 m para a discretização horizontal ($\Delta x = a\Delta\theta$); 0,2 m para a discretização vertical (Δz) e $0,01^\circ$ para discretização em azimute ($\Delta\Phi$).

As figuras de 5.26 a 5.30 exibem a vista de topo da localização do par de obstáculos Gaussianos (representada pela cor branca) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) em diversas alturas, a saber: 10 m, 20 m, 25 m (altura do transmissor), 30 m, 40 m. Pode-se observar, como era esperado, um perfil de interferência resultante da combinação das ondas direta e refletida no solo entre o transmissor e o par de obstáculos Gaussianos. Pode-se observar, também, o perfil de difração devido aos efeitos do espalhamento e da difração lateral, exibindo, mais nitidamente, características que não podem ser previstas por modelos bidimensionais.

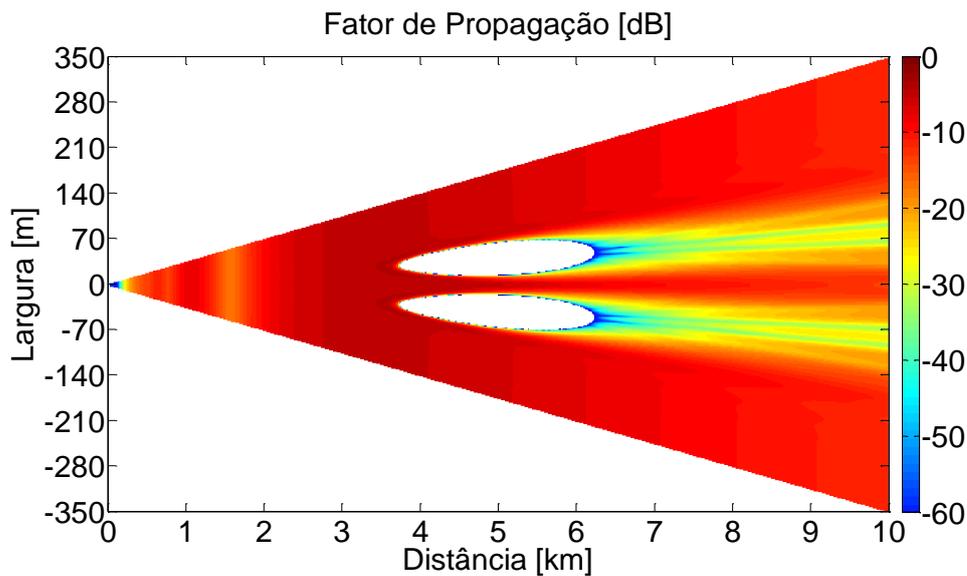


Figura 5.26 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 10 m

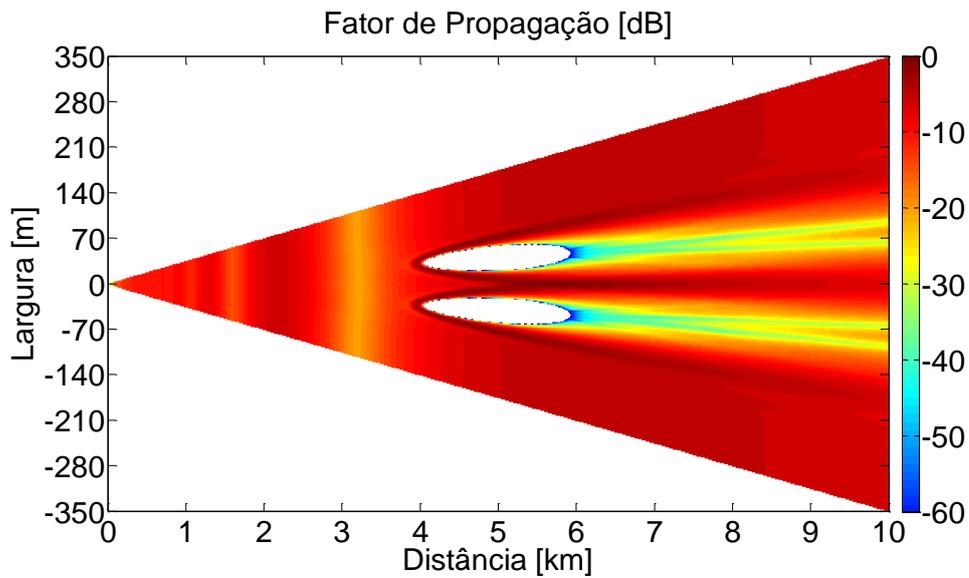


Figura 5.27 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 20 m

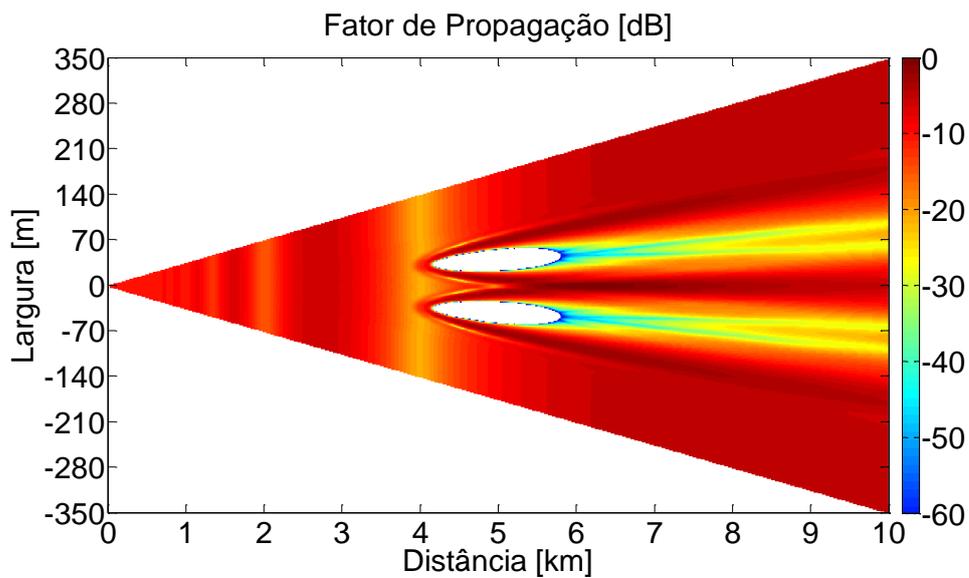


Figura 5.28 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura da antena transmissora ($h_{TX} = 25$ m)

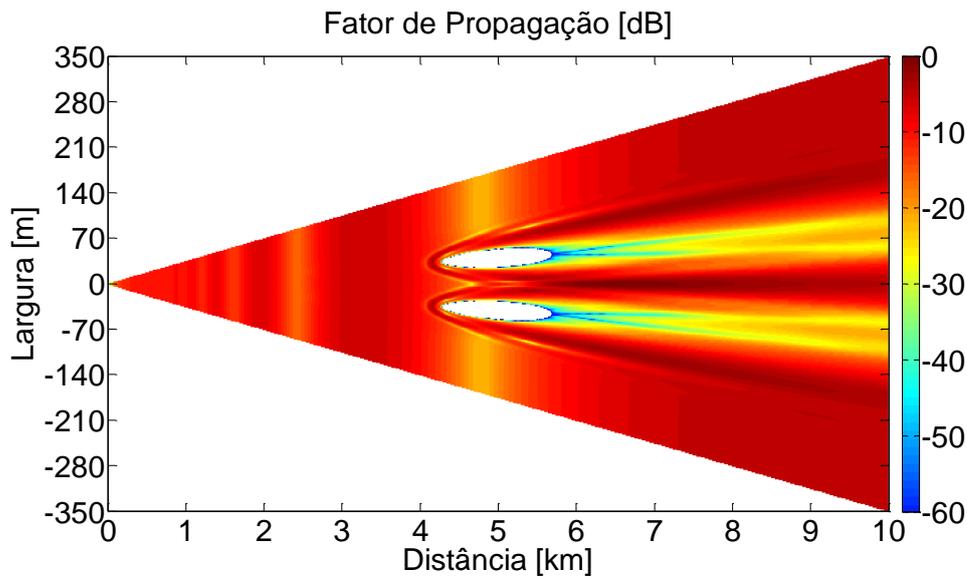


Figura 5.29 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 30 m

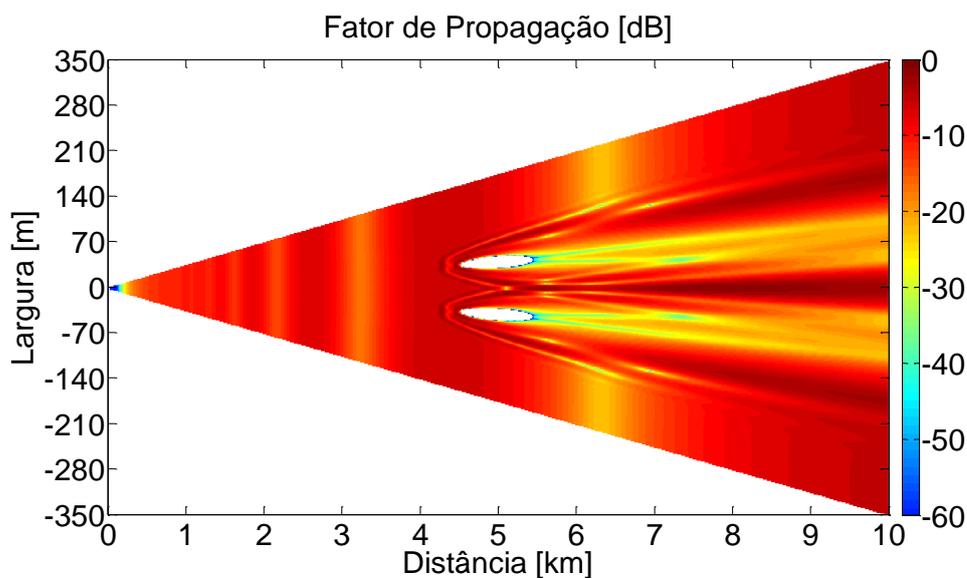


Figura 5.30 - Vista de topo do par de obstáculos Gaussianos (branco) e da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) na altura de 40 m

A Figura 5.31, representando a vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) no plano vertical central (azimute de 0°), ilustra a aplicação do modelo proposto ao terreno irregular tridimensional formado por um par de obstáculos Gaussianos com variação azimutal como definido acima. Como as montanhas estão mais próximas, os efeitos do espalhamento e da difração lateral ficam mais evidentes em relação ao exemplo da seção anterior. Como esperado, um perfil de interferência resultante

da combinação das ondas direta e refletida no solo é observado entre o transmissor e o centro das montanhas em 5 km. Para distâncias maiores, a Figura 5.31 mostra também perfis de interferência complexos resultantes dos efeitos do espalhamento e da difração lateral que não podem ser previstos por modelos bidimensionais. Para confirma essa afirmação, a Figura 5.32 exibe a aplicação do modelo *Split-Step* de Fourier que não leva em consideração as variações laterais do terreno, resultando na aplicação de um modelo bidimensional. Pode-se observar que um modelo bidimensional não é capaz de prever a contribuição devido à propagação lateral.

A Figura 5.33 apresenta o fator de propagação normalizado em decibéis em função da altura da antena receptora a 10 km de distância da fonte no plano vertical central correspondendo ao azimute de 0° . Nesta figura, a curva em azul corresponde o fator de propagação devido ao modelo tridimensional proposto e a curva em vermelho ao modelo bidimensional *Split-Step* de Fourier. Pode-se observar que a discrepância entre as duas curvas e as diferenças entre elas se devem, exclusivamente, à contribuição da propagação lateral.

A Figura 5.34 representa o plano vertical da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no azimute de $\pm 0,4584^\circ$. Nessa figura, pode-se observar um perfil de interferência resultante da combinação das ondas direta e refletida no solo entre o transmissor e o centro da montanha em 5 km, como era esperado, assim como fortes reflexões da face frontal do perfil Gaussiano e um profundo sombreamento do campo incidente a partir do pico. Além disso, nota-se um perfil de interferência mais complexo em comparação ao resultado obtido pela aplicação do modelo bidimensional *Split-Step* de Fourier apresentado na Figura 5.35.

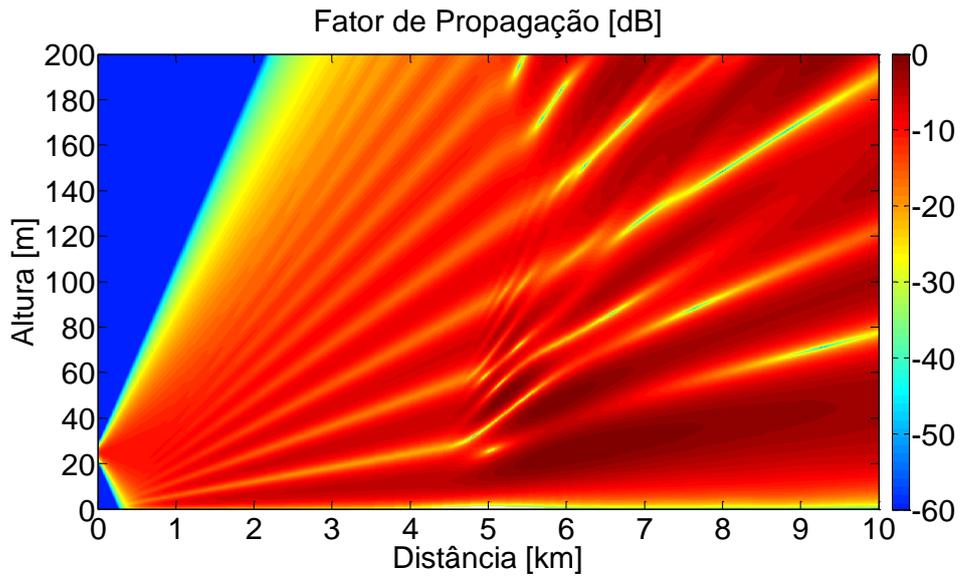


Figura 5.31 - Vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical central contendo o transmissor e receptor (azimute de 0°) considerando o modelo proposto

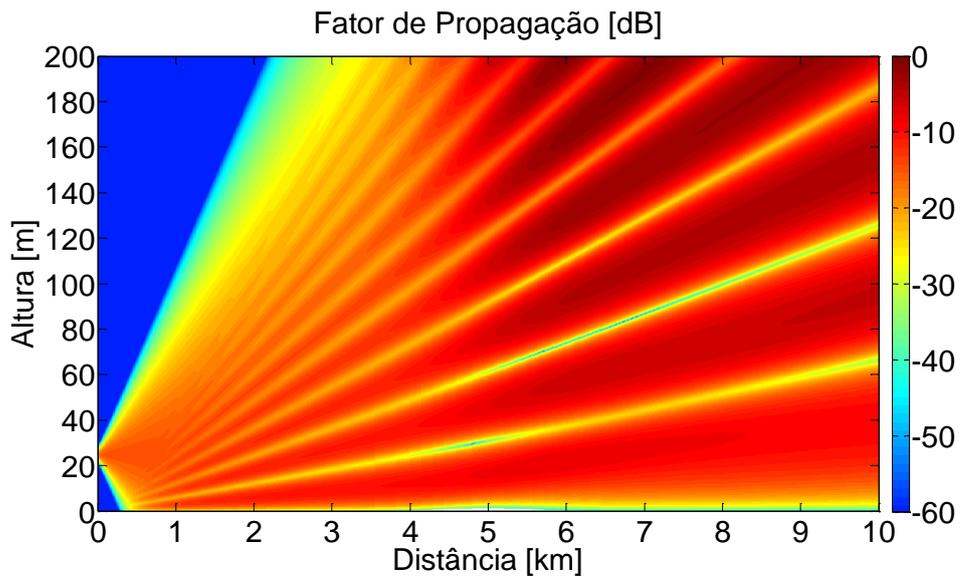


Figura 5.32 - Vista lateral da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical central contendo o transmissor e receptor (azimute de 0°) considerando o modelo *Split-Step* de Fourier

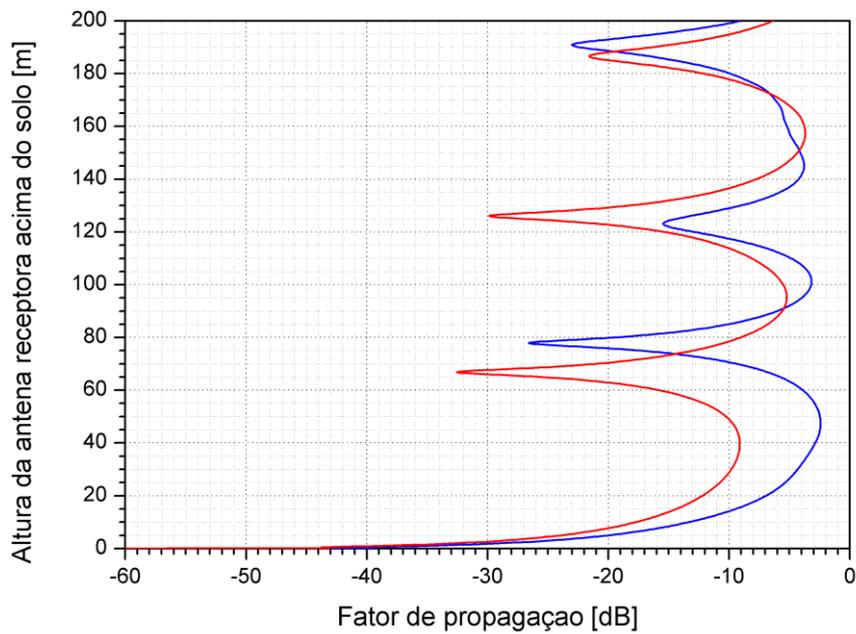


Figura 5.33 - Fator de propagação normalizado em decibéis em função da altura da antena receptora a 10 km da fonte no azimute de 0° . Curva azul: modelo proposto. Curva vermelha: modelo *Split-Step* de Fourier

A Figura 5.36 apresenta o fator de propagação normalizado em decibéis em função da altura da antena receptora a 10 km de distância da fonte no plano vertical correspondendo ao azimute de $\pm 0,4584^\circ$. Nesta figura, a curva em azul corresponde o fator de propagação devido ao modelo tridimensional proposto e a curva em vermelho ao modelo bidimensional *Split-Step* de Fourier. Pode-se observar que a discrepância entre as duas curvas e as diferenças entre elas se devem, exclusivamente, à contribuição da propagação lateral.

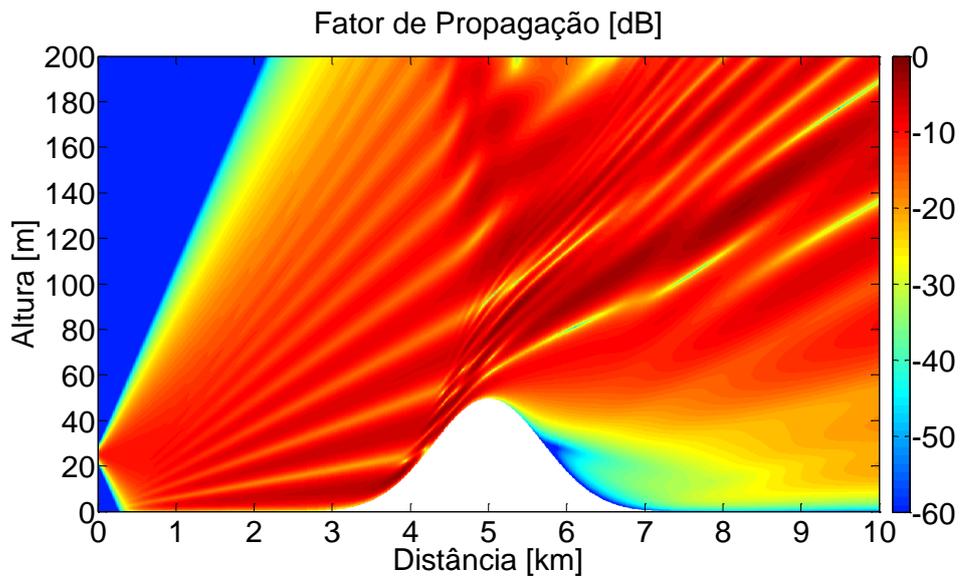


Figura 5.34 - Plano vertical da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no azimute de $\pm 0,4584^\circ$ considerando o modelo proposto

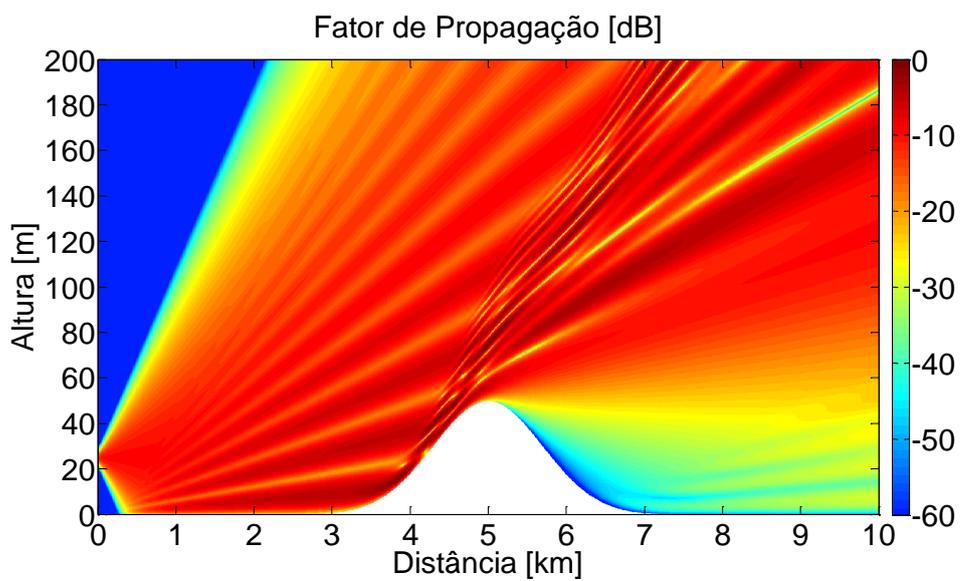


Figura 5.35 - Plano vertical da distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no azimute de $\pm 0,4584^\circ$ considerando o modelo *Split-Step* de Fourier

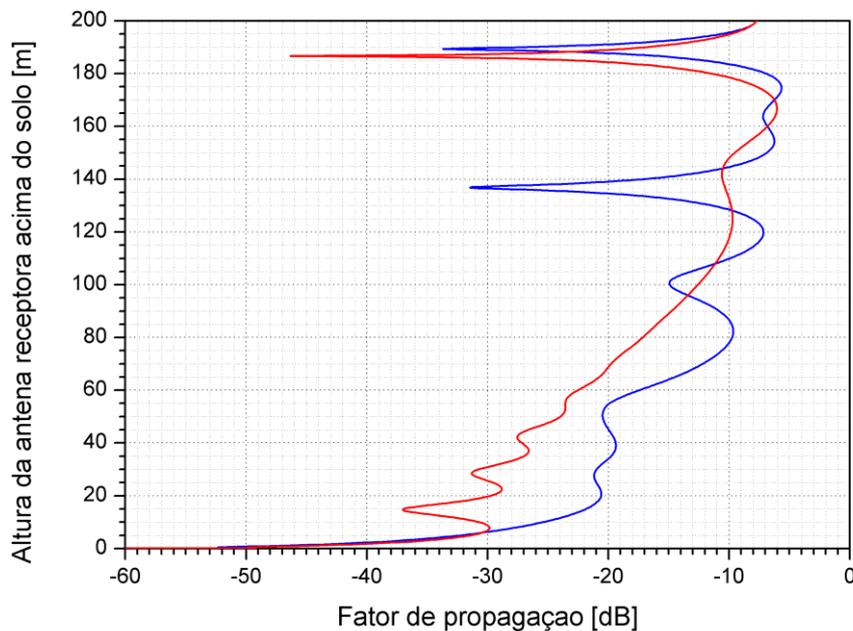


Figura 5.36 - Fator de propagação normalizado em decibéis em função da altura da antena receptora a 10 km da fonte no azimute de $\pm 0,4584^\circ$. Curva azul: modelo proposto. Curva vermelha: modelo *Split-Step* de Fourier

As figuras de 5.37 a 5.42 mostram um conjunto de distribuições do fator de propagação normalizado em decibéis (escala de cor) em planos transversais (Φ, z) para valores fixos de $\theta = x/a$. Esses planos estão localizados a 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km e 10 km do transmissor, respectivamente. O primeiro plano transversal intercepta o par de obstáculos Gaussianos no centro a 5 km da fonte. Essas figuras apresentam claramente os efeitos da propagação lateral devidos ao espalhamento e à difração pelo par de obstáculos Gaussianos. A região central apresenta variações em azimute que reforçam o campo lateralmente, deixando-os muito mais fortes na região central do que nas extremidades e, portanto, não há simetria em torno das montanhas. Como era esperado, percebe-se um perfil de difração lateral, com o campo variando em azimute entre mínimo e máximo. Esses efeitos da propagação lateral são cada vez mais evidentes em planos transversais distantes do transmissor e esse comportamento não seria apresentado por um modelo bidimensional.

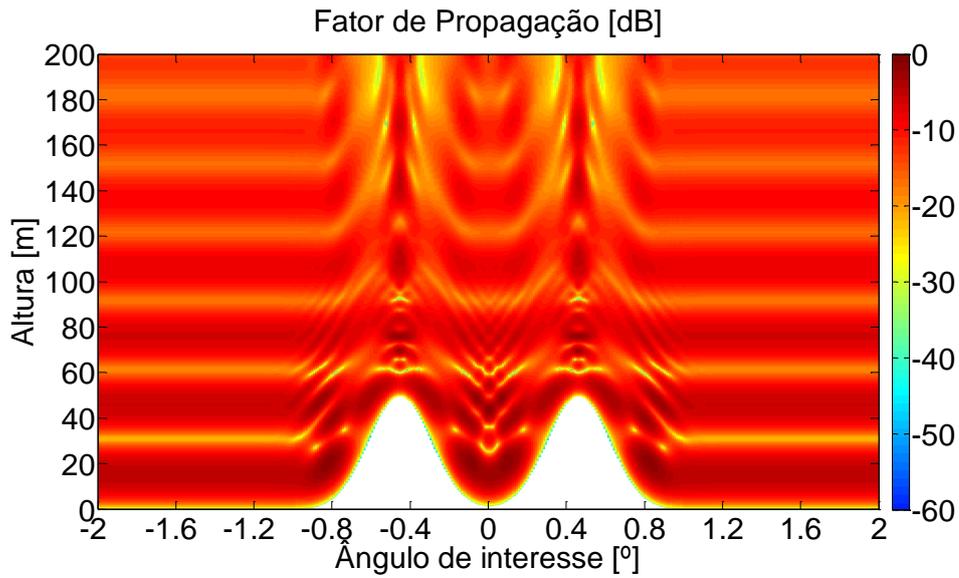


Figura 5.37 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 5 km do transmissor

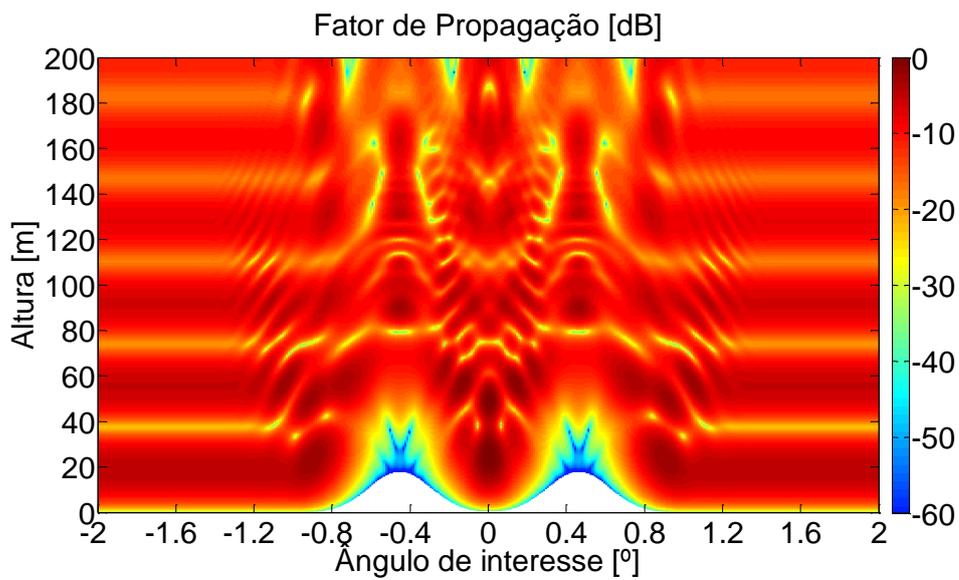


Figura 5.38 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 6 km do transmissor

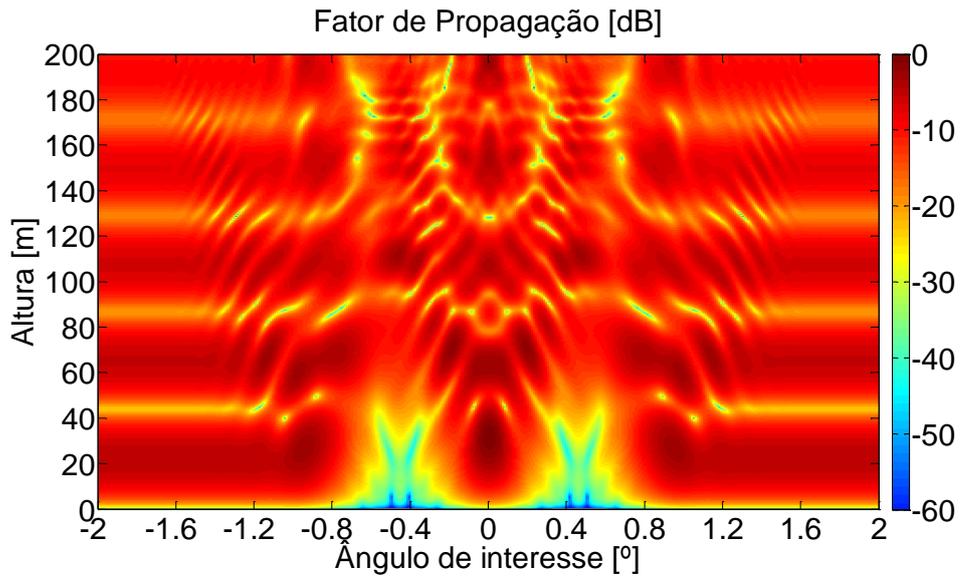


Figura 5.39 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 7 km do transmissor

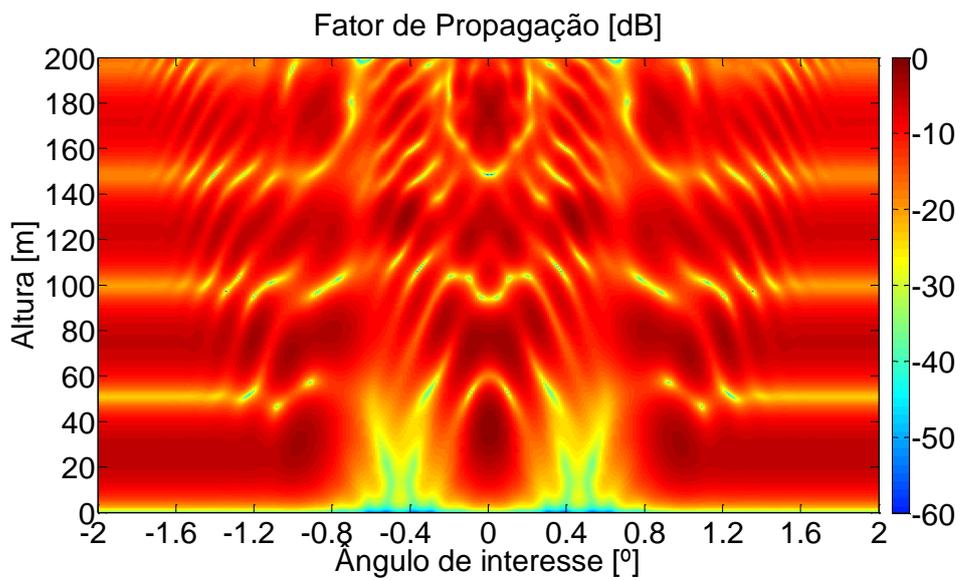


Figura 5.40 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 8 km do transmissor

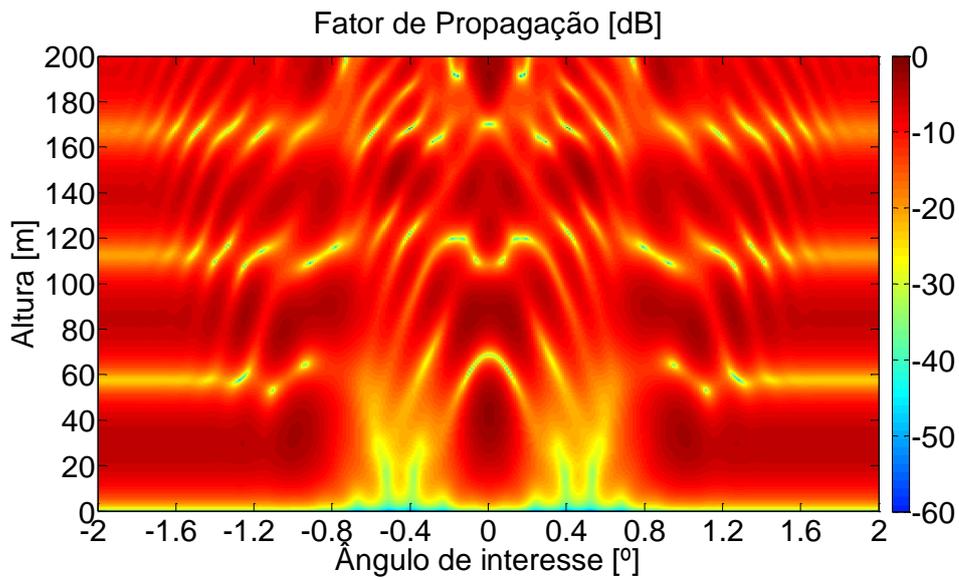


Figura 5.41 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 9 km do transmissor

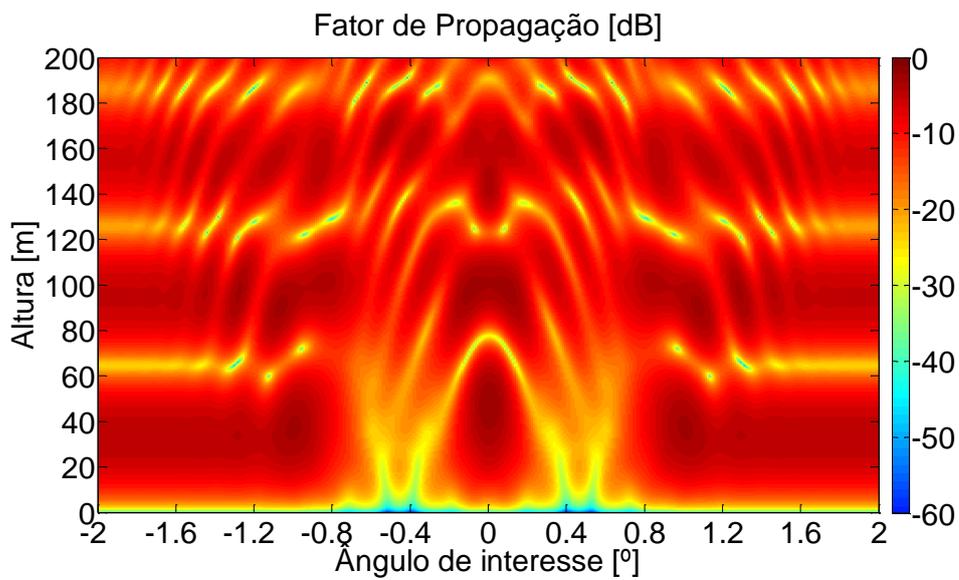


Figura 5.42 - Distribuição do fator de propagação normalizado em decibéis no plano vertical transversal a 10 km do transmissor