

Predição de Sinal 4G e 5G Aplicada à Viabilidade de FWA Rural: Avaliação Comparativa dos Modelos COST-231 Hata e 3GPP TR 38.901 com uso do Software Mapa das Torres

Wesley H. S. Abreu, Luiz H. A. Correia, Demóstenes Z. Rodríguez

Resumo— Este trabalho compara os modelos COST-231 Hata e 3GPP TR 38.901 na predição de sinal para enlaces *Fixed Wireless Access* (FWA) em cenários 4G e 5G. As estimativas, geradas no software *Mapa das Torres*, foram confrontadas com medições reais de campo. Os resultados mostram que o COST-231 Hata apresentou melhor aderência no 4G, com $MAE = 1,8$ dB e acurácia média de 98,23%, enquanto o 3GPP TR 38.901 obteve melhor desempenho no 5G, com $MAE = 2,6$ dB e acurácia média de 97,48%.

Palavras-Chave— FWA, propagação de rádio, COST-231 Hata, 3GPP TR 38.901, 4G, 5G.

Abstract— This work compares the COST-231 Hata and 3GPP TR 38.901 models for signal prediction in *Fixed Wireless Access* (FWA) links under 4G and 5G scenarios. Estimates generated by the *Mapa das Torres* software were compared against real field measurements. Results show that COST-231 Hata achieved better agreement in 4G, with $MAE = 1.8$ dB and mean accuracy of 98.23%, whereas 3GPP TR 38.901 performed better in 5G, with $MAE = 2.6$ dB and mean accuracy of 97.48%.

Keywords— FWA, radio propagation, COST-231 Hata, 3GPP TR 38.901, 4G, 5G.

I. INTRODUÇÃO

As redes móveis têm papel central na oferta de conectividade em áreas rurais e remotas, onde a implantação de infraestrutura cabeada tende a ser mais lenta e onerosa. Nesse contexto, soluções de *Fixed Wireless Access* (FWA) baseadas em 4G/LTE (*Long-Term Evolution*) e 5G/NR (*New Radio*) surgem como alternativa prática para ampliar o acesso à internet, desde que o planejamento do enlace seja apoiado por estimativas confiáveis de cobertura e nível de sinal [1], [3].

O interesse por *Fixed Wireless Access* (FWA) tem crescido de forma consistente [2]. O relatório de perspectivas da Ericsson indica expansão sustentada dessa modalidade, com 81% dos provedores móveis analisados já ofertando FWA em 2025 e potencial adicional na América Latina com a difusão do 5G [7]. No Brasil, essa tendência se conecta à necessidade de ampliar banda larga em áreas rurais e distritos afastados. O Ministério da Agricultura e Pecuária destaca a conectividade como infraestrutura essencial para a agricultura digital e

informa que mais de 70% das áreas rurais ainda não dispõem de internet [14]. Em 2026, o Ministério do Desenvolvimento Agrário informou que 4 milhões de domicílios da agricultura familiar e de pequenos agricultores ainda não eram atendidos por sinal 4G [15].

A expansão recente da infraestrutura móvel reforça a atualidade do problema: o Ministério das Comunicações informou a ampliação do 4G para mais de 1,3 mil localidades rurais em 2026 e projetou cobertura 5G para cerca de 80% da população brasileira até o fim do mesmo ano; em maio de 2026, a tecnologia já estava presente em mais de 1,5 mil cidades [8], [9], [10]. Em paralelo, o painel da Anatel e a agenda para repetidores e reforçadores subsidiam o planejamento e a expansão do sinal em áreas remotas [11], [12], [13]. Plataformas como o *Mapa das Torres* desenvolvida pelo autor deste artigo integram mapas de cobertura, geometria do enlace e estimativas de intensidade de sinal em apoio à decisão de instalação [16].

Embora o modelo COST-231 Hata apresente bom desempenho em cenários 4G/LTE, especialmente em ambientes rurais, sua formulação empírica não incorpora explicitamente características avançadas do 5G NR, tais como a forte dependência da geometria tridimensional do enlace, o *beamforming*, o *massive MIMO* e a variação probabilística de condições LoS/NLoS. Por outro lado, o relatório técnico 3GPP TR 38.901 oferece um framework mais adequado para a predição de perda de percurso em sistemas 5G, ao definir cenários específicos de propagação que contemplam parâmetros geométricos detalhados, probabilidade de linha de visada e efeitos de sombreamento, tornando-o particularmente apropriado para estudos de viabilidade de FWA em áreas rurais [3], [4]. Nessa linha, diversos estudos comparativos têm destacado a limitação dos modelos empíricos clássicos, como o COST-231 Hata, em capturar os efeitos de propagação em frequências mais altas do 5G, enquanto o 3GPP TR 38.901 demonstra maior precisão ao incorporar a modelagem geométrica tridimensional e probabilística em diferentes cenários de propagação [5]. Tais trabalhos reforçam a importância de selecionar o modelo de acordo com a tecnologia e o ambiente, especialmente em aplicações de FWA rural, onde a combinação de medições de campo com predições baseadas em padrões 3GPP tem se mostrado uma abordagem promissora [6].

Este trabalho investiga a aderência prática desses dois modelos em cenários reais de 4G e 5G, por meio da com-

Wesley H. S. Abreu (e-mail: wesleyhenriquesantosabreu@gmail.com), Luiz H. A. Correia (e-mail: lcorreia@ufla.br), Demóstenes Z. Rodríguez (e-mail: demostenes.zegarra@ufla.br)
Departamento de Ciência da Computação (DCC), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras-MG, Brasil. Projeto Financiado parcialmente por FINEP, projeto No. 2817/22 - 01.23.0593.01

paração entre previsões geradas no software *Mapa das Torres* e medições obtidas em campo. O objetivo é identificar qual modelagem apresenta melhor desempenho em cada tecnologia e, com isso, apoiar a escolha de critérios mais confiáveis para estudo de viabilidade de enlaces em aplicações FWA rurais.

Como contribuição principal, o artigo mostra que o modelo COST-231 Hata permanece adequado para o conjunto de casos 4G analisado, enquanto a modelagem baseada no 3GPP TR 38.901 apresenta maior aderência nos cenários 5G avaliados. Além da comparação experimental, o estudo consolida uma diretriz prática de uso de modelos por tecnologia, com aplicação direta no software *Mapa das Torres* [16].

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta a metodologia, incluindo a estrutura do software *Mapa das Torres*, os cenários avaliados, os modelos de propagação e as métricas utilizadas. A Seção III discute os resultados obtidos para os cenários 4G e 5G, bem como a síntese quantitativa do desempenho dos modelos. Por fim, a Seção IV apresenta as conclusões e indica possíveis trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

O estudo adota uma abordagem comparativa entre previsão e medição real de sinal em cenários de FWA, com foco nas tecnologias 4G/LTE (*Long-Term Evolution*) e 5G/NR (*New Radio*). As estimativas foram geradas no software *Mapa das Torres* e confrontadas com medições de campo, de modo a avaliar a aderência prática dos modelos COST-231 Hata e 3GPP TR 38.901 [3], [4].

A. Estrutura do software *Mapa das Torres*

O *Mapa das Torres* é uma plataforma de engenharia de telecomunicações e planejamento técnico de enlaces 4G/5G para aplicações FWA. O sistema integra dados públicos de estações licenciadas da Anatel, perfil altimétrico de relevo e rotinas de modelagem de propagação para transformar informações regulatórias e geoespaciais em apoio operacional à instalação [16]. No fluxo de processamento, a plataforma seleciona a localização de interesse, identifica ERBs (Estações Rádio Bases) elegíveis, extrai parâmetros técnicos, calcula o perfil de terreno e executa a modelagem de propagação conforme a tecnologia analisada: COST-231 Hata para 4G/LTE e formulação baseada no 3GPP TR 38.901 para 5G-NR, com ajustes práticos associados a setor, azimuth, inclinação vertical e ambiente.

Em termos operacionais, o fluxo inicia com a definição do ponto receptor no mapa, seguida da consulta às estações licenciadas nas proximidades e da filtragem das ERBs (Estações Rádio Bases) potencialmente atendentes segundo distância, tecnologia e parâmetros de setor. Na sequência, o sistema consolida frequência, azimuth, altura da antena transmissora, potência, ganho e inclinação mecânica ou elétrica quando disponível, compondo a base de entrada para o cálculo do enlace. Essa etapa é importante porque reduz a análise a candidatos tecnicamente plausíveis e evita comparar a medição com estações sem alinhamento setorial com o ponto avaliado.

Para a caracterização do relevo, a plataforma utiliza dados altimétricos *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*) ao longo do trajeto entre transmissor e receptor, de modo a reconstruir o perfil longitudinal do enlace e verificar obstruções geométricas. A partir desse perfil, o software estima linha de visada, *clearance* da primeira zona de Fresnel e diferenças de cota que afetam a distância tridimensional e a perda de percurso, para recepção do sinal em *CPE* (*Customer Premises Equipment*). Com isso, o *Mapa das Torres* não se limita à distância em planta, ele combina informações regulatórias, topográficas e geométricas em uma cadeia única de previsão, mais aderente ao contexto de enlaces rurais e periurbanos.

B. Cenários avaliados e procedimento de coleta

Foram considerados dois conjuntos de testes. No primeiro, referente ao 4G, utilizaram-se medições obtidas em instalações FWA rurais realizadas pelo autor com *CPE* (*Customer Premises Equipment*), modelo Amplimax Fit, tomando como referência enlaces na banda 28 de 700 MHz. No segundo, referente ao 5G, utilizaram-se medições em campo na banda 78 de 3500 MHz, obtidas com *smartphone* 5G, modelo Motorola Moto G35 em pontos selecionados. Em ambos os casos, foram organizados, para cada enlace, a estação rádio base associada, a distância até o ponto de recepção, a altura das antenas, o ganho do terminal receptor, a potência efetiva de transmissão e a condição de visada.

O procedimento de comparação foi estruturado em etapas. Primeiro, cada ponto medido foi georreferenciado e associado à ERB mais compatível com a cobertura observada e com a orientação do setor irradiador. Em seguida, os mesmos pontos foram inseridos no *Mapa das Torres*, preservando-se frequência de operação, alturas e características do enlace para gerar a previsão correspondente. Por fim, os valores simulados e medidos foram comparados ponto a ponto, permitindo analisar não apenas o erro numérico, mas também a coerência física entre relevo, visada, posição relativa ao setor e intensidade de sinal recebida.

A análise também incorporou a verificação geométrica da primeira zona de Fresnel, empregada como critério auxiliar para identificar obstruções por relevo e vegetação [3]. Seu raio foi calculado por

$$r = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

em que $n = 1$, λ é o comprimento de onda, e d_1 e d_2 são as distâncias entre o ponto de obstrução e, respectivamente, o transmissor e o receptor. Quando necessário, a obstrução da zona de Fresnel foi utilizada como informação complementar para interpretar discrepâncias entre previsão e medição.

C. Modelos de propagação comparados

Esta subseção apresenta os modelos de propagação utilizados para estimar a perda de percurso nos enlaces avaliados. Inicialmente, descreve-se o COST-231 Hata, aplicado aos cenários 4G, e em seguida a formulação baseada no 3GPP TR 38.901, adotada para os cenários 5G-NR.

Para os cenários 4G, o modelo COST-231 Hata foi empregado como referência principal de predição, sendo a perda média de percurso dada por

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d), \quad (2)$$

com o fator de correção da altura da estação móvel expresso por

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8). \quad (3)$$

Nessas expressões, f é a frequência em MHz, h_b é a altura da estação base em metros, h_m é a altura da estação receptora em metros e d é a distância em km.

Para os cenários de 5G, foi adotada a modelagem descrita no 3GPP TR 38.901 para o ambiente urbano macro (UMa) [4], uma vez que as medições ocorreram em áreas urbanas ou semiurbanas, devido limitação de ERBs 5G em áreas rurais na região do estudo (Lavras-MG). Ressalta-se, contudo, que o TR 38.901 também contempla o cenário rural macro. A formulação geral da perda de percurso é expressa por:

$$PL(d) = 10 n \log_{10}(d) + C + X_\sigma \quad (4)$$

e a distância tridimensional do enlace foi calculada por

$$d_{3D} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2}. \quad (5)$$

Para condição de linha de visada (LoS), utilizou-se a expressão

$$PL_{UMa,LoS}(dB) = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \quad (6)$$

válida para distâncias inferiores ao ponto de quebra, e

$$PL_{UMa,LoS}(dB) = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2), \quad (7)$$

para distâncias superiores, com

$$d_{BP} = \frac{4 h'_{BS} h'_{UT} f_c}{c}. \quad (8)$$

Nessas expressões, $PL(d)$ representa a perda de percurso em dB, n é o expoente de perda de percurso, d é a distância do enlace, C é uma constante associada ao cenário de propagação e X_σ representa o desvanecimento de sombreamento modelado por uma variável aleatória log-normal com desvio padrão σ . A variável d_{3D} corresponde à distância tridimensional entre transmissor e receptor, d_{2D} é a distância horizontal em planta, h_{BS} é a altura da estação base, h_{UT} é a altura do terminal do usuário e f_c é a frequência central em GHz nas expressões do 3GPP TR 38.901. O termo d_{BP} indica a distância de ponto de quebra do modelo, calculada a partir das alturas efetivas h'_{BS} e h'_{UT} e da velocidade da luz c . A condição LoS, do inglês *Line-of-Sight*, ocorre quando há linha de visada direta entre transmissor e receptor, sem bloqueios relevantes

por relevo, edificações ou vegetação. Já a condição NLoS, do inglês *Non-Line-of-Sight*, ocorre quando essa visada direta é inexistente ou parcialmente obstruída, fazendo com que o sinal recebido dependa mais de difração, reflexão e espalhamento no ambiente.

Além da perda básica de percurso, a implementação considerou ajustes práticos compatíveis com o uso da ferramenta, incluindo restrições mínimas de entrada, ponderação entre condições LoS e NLoS e penalizações associadas ao desalinhamento horizontal e à diferença vertical entre estação e receptor.

D. Métricas de avaliação

A comparação entre os modelos foi realizada a partir do erro absoluto por ponto de medição, seguido do cálculo das métricas agregadas de erro médio absoluto (MAE) e acurácia média. O MAE foi definido por

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{predição}_i - \text{medição}_i| \quad (9)$$

e a acurácia média foi calculada por

$$A = \left(1 - \frac{|\text{predição} - \text{medição}|}{|\text{medição}|} \right) \times 100. \quad (10)$$

Essas métricas foram utilizadas para sintetizar o desempenho de cada modelo em cada tecnologia, preservando a comparação ponto a ponto e permitindo identificar qual formulação apresentou maior aderência às medições reais nos cenários avaliados.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos para os cenários 4G e 5G, comparando as medições de campo com as predições geradas pelos modelos COST-231 Hata e 3GPP TR 38.901, respectivamente.

Os experimentos contemplaram dois conjuntos de cenários. No 4G, foram avaliados cinco enlaces rurais na banda 28 (700 MHz), com medições obtidas em instalações FWA reais usando CPE, modelo Elsys Amplimax Fit. No 5G, foram avaliados cinco enlaces na banda 78 (3500 MHz), com medições obtidas em *smartphone*, modelo Motorola Moto G35 incluindo pontos no campus da UFLA e um cenário urbano adicional com receptor em cota elevada. O protocolo experimental concentrou-se em intensidade de sinal em dBm, geometria do enlace, condição de visada e comprometimento da zona de Fresnel; métricas de *throughput* (vazão) e latência não fizeram parte da campanha de medição original.

A. Resultados no 4G

A Tabela I apresenta as comparações completas entre valores medidos e preditos no 4G. Os resultados mostram predominância do COST-231 Hata em praticamente todos os pontos analisados. Nos enlaces Ponto 4G (1), Ponto 4G (2) e Ponto 4G (3), a predição do COST-231 Hata coincidiu com a medição observada, enquanto o 3GPP TR 38.901 superestimou a perda em 18 a 23 dB. Mesmo nos cenários

mais adversos, com vegetação e obstrução parcial ou total da zona de Fresnel, o COST-231 Hata permaneceu mais aderente ao comportamento medido.

TABELA I
COMPARAÇÃO NO 4G NA BANDA 28 (700 MHz) ENTRE COST-231 HATA E 3GPP TR 38.901.

Ponto	ERB	Dist. (km)	Med. (dBm)	COST-231	Erro COST-231	3GPP	Erro 3GPP
Ponto 4G (1)	ERB 4G (A)	2,34	-85	-85	0	-107	22
Ponto 4G (2)	ERB 4G (C)	1,07	-94	-94	0	-112	18
Ponto 4G (3)	ERB 4G (B)	3,25	-85	-85	0	-108	23
Ponto 4G (4)	ERB 4G (A)	3,92	-98	-99	1	-133	35
Ponto 4G (5)	ERB 4G (A)	2,06	-102	-94	8	-107	5

Para contextualizar as medições, a Tabela II resume os pontos analisados no 4G, destacando altura do receptor, ganho da antena e condição de visada. As localizações desses pontos não são apresentadas em mapa por questões de privacidade, pois correspondem a residências e propriedades rurais de clientes atendidos em instalações de internet FWA realizadas pelo autor. Observa-se que os enlaces com visada limpa coincidem com os menores erros do COST-231 Hata, enquanto os cenários com vegetação frontal, obstrução de Fresnel e recepção por reflexão ou difração concentram as maiores discrepâncias.

TABELA II
PONTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS NA COMPARAÇÃO 4G.

Ponto	ERB	Ganho/Altura	Condição de visada
Ponto 4G (1)	ERB 4G (A)	7 dBi / 8 m	Visada limpa
Ponto 4G (2)	ERB 4G (C)	7 dBi / 6 m	Fresnel 10% + vegetação moderada
Ponto 4G (3)	ERB 4G (B)	7 dBi / 8 m	Visada limpa
Ponto 4G (4)	ERB 4G (A)	7 dBi / 13 m	Visada bloqueada; Fresnel 100%
Ponto 4G (5)	ERB 4G (A)	7 dBi / 5 m	Fresnel 51% + vegetação frontal

Os casos Ponto 4G (4) e Ponto 4G (5) são particularmente informativos. No primeiro, a visada estava bloqueada e a primeira zona de Fresnel comprometida em 100%, de modo que o sinal recebido resultou de reflexão e difração não modeladas explicitamente; ainda assim, o COST-231 Hata apresentou erro de apenas 1 dB. No segundo, com comprometimento de 51% da zona de Fresnel e vegetação frontal, ambos os modelos se aproximaram menos da medição, mas o 3GPP TR 38.901 só superou o COST-231 Hata nesse único enlace. Os valores medidos variaram de -85 dBm a -102 dBm, cobrindo desde condição favorável de recepção até situação limítrofe para instalação rural.

A Tabela III sintetiza os principais parâmetros das ERBs 4G usadas nos ensaios. Esses dados ajudam a interpretar a diferença entre os cenários, sobretudo pela combinação entre frequência, altura, ganho, potência de transmissão e operadora.

TABELA III
PARÂMETROS DAS ERBS 4G UTILIZADAS NOS ENSAIOS.

ERB	Freq. (MHz)	Altura (m)	Ganho/Potência	Operadora
4G (A)	798	60	13,8 dBi / 60 W	Claro
4G (B)	798	55	13,8 dBi / 60 W	Claro
4G (C)	778	70	11,96 dBi / 40 W	TIM

B. Resultados no 5G

A Tabela IV apresenta os principais parâmetros das ERBs 5G utilizadas nos ensaios. A separação desses dados em relação ao 4G facilita a comparação dos cenários, uma vez que as frequências, ganhos e potências de transmissão diferem entre as tecnologias avaliadas.

No 5G, a comparação espacial dos pontos analisados é mostrada na Figura 1, enquanto a Tabela V resume as medições e predições. Diferentemente do 4G, os resultados apontam clara superioridade do 3GPP TR 38.901. Em três enlaces, a predição do modelo coincidiu com a medição observada; no cenário urbano ERB 5G (X) → Ponto 5G (X), o COST-231 Hata apresentou erro extremo de 75 dB, ao passo que o 3GPP TR 38.901 reproduziu exatamente o valor medido.

TABELA IV
PARÂMETROS DAS ERBS 5G UTILIZADAS NOS ENSAIOS.

ERB	Freq. (MHz)	Altura (m)	Ganho/Potência	Operadora
5G (A)	3450	56	25 dBi / 200 W	Vivo
5G (B)	3350	50	13,8 dBi / 41 W	Claro
5G (X)	3350	63	23,8 dBi / 199,5 W	Claro

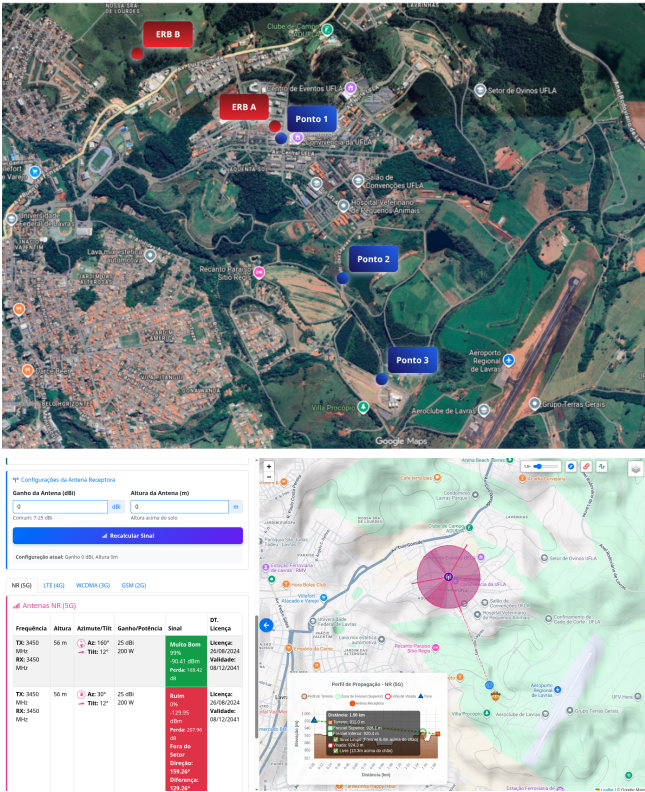


Fig. 1. Mapa dos pontos 5G e tela do simulador do Mapa das Torres.

TABELA V
COMPARAÇÃO NO 5G NA BANDA 78 (3500 MHz) ENTRE COST-231 HATA E 3GPP TR 38.901.

Ponto	ERB	Dist. (km)	Med. (dBm)	COST-231	Erro COST-231	3GPP	Erro 3GPP
Ponto 5G (1)	ERB 5G (A)	0,05	-75	-75	0	-75	0
Ponto 5G (2)	ERB 5G (A)	0,79	-92	-96	4	-92	0
Ponto 5G (1)	ERB 5G (B)	1,00	-113	-116	3	-113	0
Ponto 5G (3)	ERB 5G (A)	1,30	-103	-92	11	-90	13
Ponto 5G (X)	ERB 5G (X)	0,72	-83	-8	75	-83	0

A Tabela VI detalha as condições físicas dos pontos de medição no 5G, incluindo receptor ao nível do solo, ponto adjacente à ERB, obstrução parcial por relevo e um caso urbano em pavimento elevado.

TABELA VI
PONTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS NA COMPARAÇÃO 5G.

Ponto	ERB	Ganho/Altura	Condição de visada
Ponto 5G (1)	ERB 5G (A)	0 dBi / 1 m	Ao lado da estação
Ponto 5G (1)	ERB 5G (B)	0 dBi / 1 m	Fresnel 15% pelo relevo
Ponto 5G (2)	ERB 5G (A)	0 dBi / 1 m	Fresnel 53% pelo relevo
Ponto 5G (3)	ERB 5G (A)	0 dBi / 1 m	Vegetação (não considerada no relevo)
Ponto 5G (X)	ERB 5G (X)	0 dBi / 30 m	Janela de apartamento urbano

Do ponto de vista dos cenários, o enlace Ponto 5G (2) apresentou comprometimento de 53% da zona de Fresnel pelo relevo e ainda assim foi estimado sem erro pelo 3GPP TR 38.901. Já no Ponto 5G (3), o modelo de terreno indicou condição de visada limpa, porém havia vegetação imediatamente à frente do ponto de medição, elemento que não é representado no cálculo baseado apenas no relevo. Essa obstrução local explica a discrepância observada na predição, pois introduz atenuação adicional não considerada pelo modelo. Ainda assim, o conjunto de resultados mostra que a modelagem 3GPP captura melhor os efeitos de geometria tridimensional típicos do 5G. As medições variaram de -75 dBm a -113 dBm, da condição muito forte próxima à ERB ao cenário mais degradado em distância quilométrica.

C. Síntese quantitativa

As métricas agregadas confirmam as tendências observadas nas comparações por localização. A Tabela VII sintetiza o desempenho final dos modelos. No 4G, o COST-231 Hata obteve $MAE = 1,8$ dB e acurácia média de 98,23%, enquanto o 3GPP TR 38.901 apresentou $MAE = 20,6$ dB e acurácia média de 77,46%. No 5G, a situação se inverteu: o COST-231 Hata apresentou $MAE = 21,4$ dB e acurácia média de 74,66%, ao passo que o 3GPP TR 38.901 atingiu $MAE = 2,6$ dB e acurácia média de 97,48%.

TABELA VII
MÉTRICAS AGREGADAS DOS MODELOS AVALIADOS.

Cenário / Modelo	MAE (dB)	Acurácia média (%)
4G – COST-231 Hata	1,8	98,23
4G – 3GPP TR 38.901	20,6	77,46
5G – COST-231 Hata	21,4	74,66
5G – 3GPP TR 38.901	2,6	97,48

Em síntese, os resultados mostram que a escolha do modelo de propagação deve considerar explicitamente a geração da rede, a geometria do enlace e as condições de visada. No contexto avaliado, o COST-231 Hata se manteve mais adequado para o 4G/LTE, enquanto a modelagem baseada no 3GPP TR 38.901 se mostrou mais apropriada para o 5G/NR. Do ponto de vista aplicado, esse resultado reforça o uso seletivo de modelos no software *Mapa das Torres*, com impacto direto na confiabilidade do estudo de viabilidade de enlaces FWA [16].

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho comparou os modelos COST-231 Hata e 3GPP TR 38.901 na predição de sinal para enlaces FWA em cenários 4G e 5G, com base na confrontação entre estimativas geradas no software *Mapa das Torres* e medições reais de campo. Os resultados mostraram que o modelo COST-231 Hata apresentou maior aderência no 4G, com $MAE = 1,8$ dB, enquanto a modelagem baseada no 3GPP TR 38.901 foi superior nos cenários 5G, com $MAE = 2,6$ dB. Tais valores de erro médio absoluto são competitivos e se posicionam de forma adequada para validações com medições reais em para FWA. Embora os testes apresentados neste trabalho sejam limitados em quantidade de amostras, eles foram selecionados de modo a contemplar o comportamento dos modelos em cenários reais de uso. Foi observado tendências consistentes e limitações relevantes de cada abordagem. Além disso, na operação cotidiana da plataforma *Mapa das Torres*, usuários reportam retorno positivo quanto à aderência prática das estimativas fornecidas, indicando que a ferramenta se mostra válida e funcional como apoio ao planejamento técnico de enlaces. Como trabalhos futuros pode-se ampliar a base de medições, incorporar novas faixas de frequência e avaliar cenários adicionais de obstrução e sazonalidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Z. E. Khaled, W. Ajib and H. Mcheick, *An Accurate Empirical Path Loss Model for Heterogeneous Fixed Wireless Networks Below 5.8 GHz Frequencies*, in IEEE Access, vol. 8, pp. 182755-182775, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3023141
- [2] O. O. Erunkulu, A. M. Zungeru, C. K. Lebekwe and J. M. Chuma, *Cellular Communications Coverage Prediction Techniques: A Survey and Comparison*, in IEEE Access, vol. 8, pp. 113052-113077, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003247
- [3] J. Rochol, *Sistemas de comunicação sem fio: conceitos e aplicações*. Porto Alegre: Bookman, 2018.
- [4] 3GPP, *TR 38.901: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, V15.0.0 (2018-06)*. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2018, Versão 15.0.0, jun. 2018.
- [5] Shaibu FE, Onwuka EN, Salawu N, Oyewobi SS, Djouani K, Abu-Mahfouz AM. Performance of Path Loss Models over Mid-Band and High-Band Channels for 5G Communication Networks: A Review. *Future Internet*. 2023; 15(11):362. <https://doi.org/10.3390/fi15110362>
- [6] P. Harris et al., "Performance Characterization of a Real-Time Massive MIMO System With LOS Mobile Channels," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1244-1253, June 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2686678
- [7] Ericsson, *Fixed Wireless Access outlook*. Ericsson Mobility Report, 2025. Acesso em: 8 maio 2026.
- [8] Ministério das Comunicações, "Brasil vai ampliar cobertura 4G e levar internet a mais de 1,3 mil localidades rurais em 2026." Publicado em 14 jan. 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [9] Ministério das Comunicações, "80% da população brasileira terá acesso ao 5G até o fim de 2026." Publicado em 16 mar. 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [10] Ministério das Comunicações, "5G avança no Brasil, supera meta e já é utilizada em mais de 1,5 mil cidades antes do prazo." Publicado em 7 maio 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [11] Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), *Painel de dados: cobertura móvel*. Acesso em: 8 maio 2026.
- [12] Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), "Anatel firma acordo para ampliar cobertura móvel com uso de repetidores e reforçadores." Publicado em abr. 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [13] Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), "Reforçadores de sinal." Atualizado em 27 abr. 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [14] Ministério da Agricultura e Pecuária, "Internet no Campo." Atualizado em 26 ago. 2022. Acesso em: 8 maio 2026.
- [15] Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar, "MDA realiza oficina de conectividade e inclusão digital para a agricultura familiar." Publicado em 13 mar. 2026. Acesso em: 8 maio 2026.
- [16] Wesley H. S. Abreu, *Mapa das Torres de Celular do Brasil*. Disponível em: <https://mapadastorres.com>. Acesso em: 8 maio 2026.