

6

Análise e tratamento dos resultados

Com as medidas realizadas, foram calculados os valores de campo elétrico para cada modelo de propagação. Como dispomos de dois bancos de dados para predição do campo, um com edificações e outro com o relevo apenas, também faremos a comparação dos tipos. Para todos os pontos, foram traçados enlaces com a estação transmissora e usados os métodos a seguir para cálculo do campo teórico:

- ITU-R P. 1546
- ITU-R P. 526
- CRC *Predict*
- Deygout – Assis com as seguintes variações:
 - o Todos obstáculos sendo considerados como gumes de faca
 - o Todos obstáculos como arredondados
 - o Obstáculo principal arredondado e os demais gumes de faca

6.1.1

Conversão de potência para campo elétrico

As medidas tomadas com o analisador de espectro têm como saída, potência recebida em dBm, porém, os estudos de propagação para sistemas de TV são normalmente apresentados em campo elétrico, em unidades de dBμV/m. Apresentar os resultados nesta unidade torna o estudo aplicável sob qualquer condição de recepção, podendo variar as características de ganho de antena e cabo de recepção.

Por definição, o campo elétrico é dado por:

$$E_{ef} [dB(V / m)] = 10 \log | E_{ef} |^2 = 20 \log | E_{ef} | \quad (6.1)$$

Para converter potência em campo, vamos utilizar duas equações do eletromagnetismo.

$$\text{Vetor de Poynting: } \vec{S} = \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (6.2)$$

onde E e H são os campos elétrico e magnético, respectivamente, na forma harmônica.

$$\text{Área efetiva de recepção: } A_{ef} = G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} [\text{m}^2] \quad (6.3)$$

onde G_R representa o ganho da antena de recepção.

$$A \text{ potência recebida pode ser escrita como } P_R = S \cdot A_{ef}, \quad (6.4)$$

$$P_R = S \cdot G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (6.5)$$

Considerando que estamos recebendo ondas planas e uniformes,

$$\vec{E} = \frac{1}{Z_0} \vec{H}, \text{ onde } Z_0(\Omega) = 120 \cdot \pi \quad (6.6)$$

$$\text{Então, } \vec{S} = \text{Re}[\vec{E} \times \frac{\vec{E}^*}{Z_0}] = \frac{|E|^2}{Z_0} \vec{as} \quad (6.7)$$

$$P_R = \frac{|E|^2}{Z_0} \cdot G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} [\text{W}] \quad (6.8)$$

Escrevendo a equação em unidades logarítmicas:

$$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) = 77.2 - G_R(\text{dB}) + 20\text{Log}(f(\text{MHz})) + P_R(\text{dBm}) \quad (6.9)$$

Esta equação relaciona campo elétrico e potência recebida. Aplicando ao nosso cenário de medidas, G_R será a soma do ganho da antena de recepção, as perdas nos cabos e divisores e o ganho do amplificador de baixo ruído.

6.1.2

Cálculo do erro

A principal métrica para avaliar os modelos de propagação será o erro entre os valores de campo calculados e os medidos. O erro será calculado de três maneiras diferentes. O erro médio, erro médio em valores absolutos e erro RMS. Tal como descrito em [8], as fórmulas para as três formas estão apresentadas abaixo:

$$\begin{aligned} e_i &= Ep_i - Em_i \\ E_i &= |Ep_i - Em_i| \end{aligned} \quad (6.10)$$

Onde E_{pi} é o campo elétrico previsto por um determinado modelo e E_{mi} é o campo medido para cada ponto. O erro médio e o erro médio absoluto são calculados a partir de (6.1) por:

$$\begin{aligned} \langle e \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \\ \langle E \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \end{aligned} \quad (6.11)$$

Onde N é o número de pontos. O desvio padrão absoluto, σ , é calculado a partir do erro absoluto e do erro médio absoluto por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N E_i^2 - N \langle E \rangle^2 \right)} \quad (6.12)$$

O erro RMS é uma associação dos dois parâmetros anteriores. Assim, usando (6.11) e (6.12), tem-se:

$$E_{RMS} = \sqrt{\langle E \rangle^2 + \sigma^2} \quad (6.13)$$

O objetivo de se calcular o erro RMS é considerar a grande variação entre medido e calculado, que é percebido no desvio padrão. É comum encontrar valores positivos e negativos de erro e quando o desvio padrão não está presente nos cálculos, a conclusão pode ficar “mascarada” devido à média desses valores positivos e negativos se aproximarem de zero. Usando o erro RMS, tanto o erro médio quanto o desvio padrão serão considerados em uma só métrica permitindo uma conclusão mais confiável e verossímil. Os valores absolutos do erro foram calculados apenas para dar uma sensibilidade da variação observada no desvio padrão. O valor RMS será o parâmetro usado para comparar os diferentes modelos testados neste trabalho.

Assim, os resultados mostrados nos próximos itens terão como base as equações apresentadas neste.

6.1.3

Belo Horizonte

Para a localidade de Belo Horizonte, os valores medidos e teóricos foram comparados nas figuras 41 a 46 para os seis modelos de propagação.

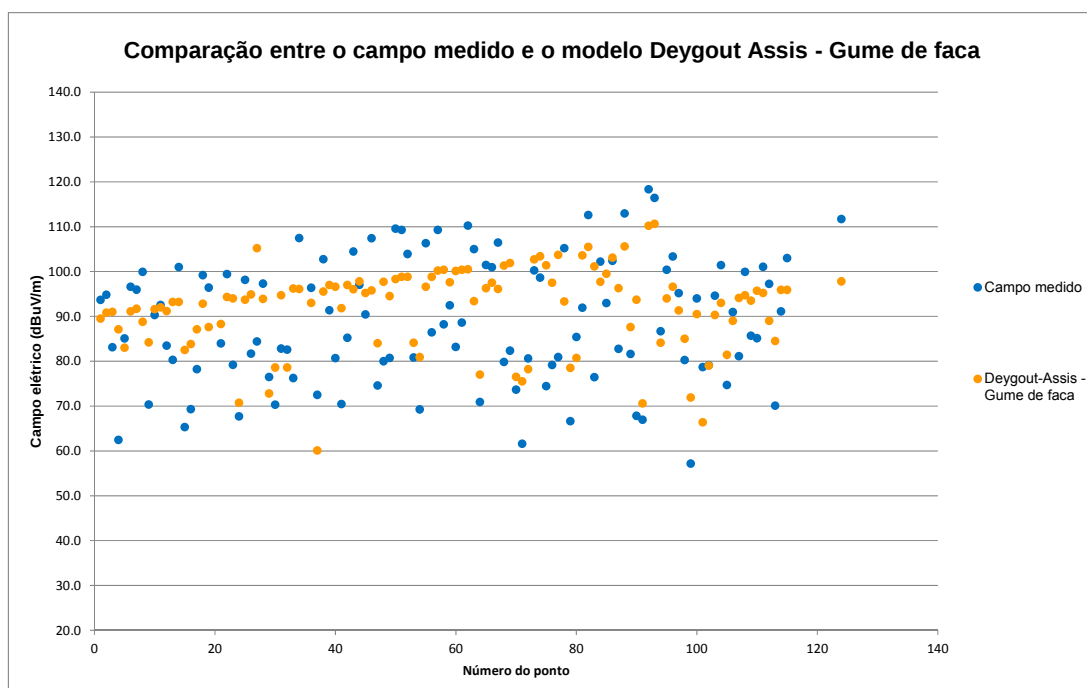


Figura 41 – Comparação entre o campo medido e o modelo Deygout-Assis - Gume de faca

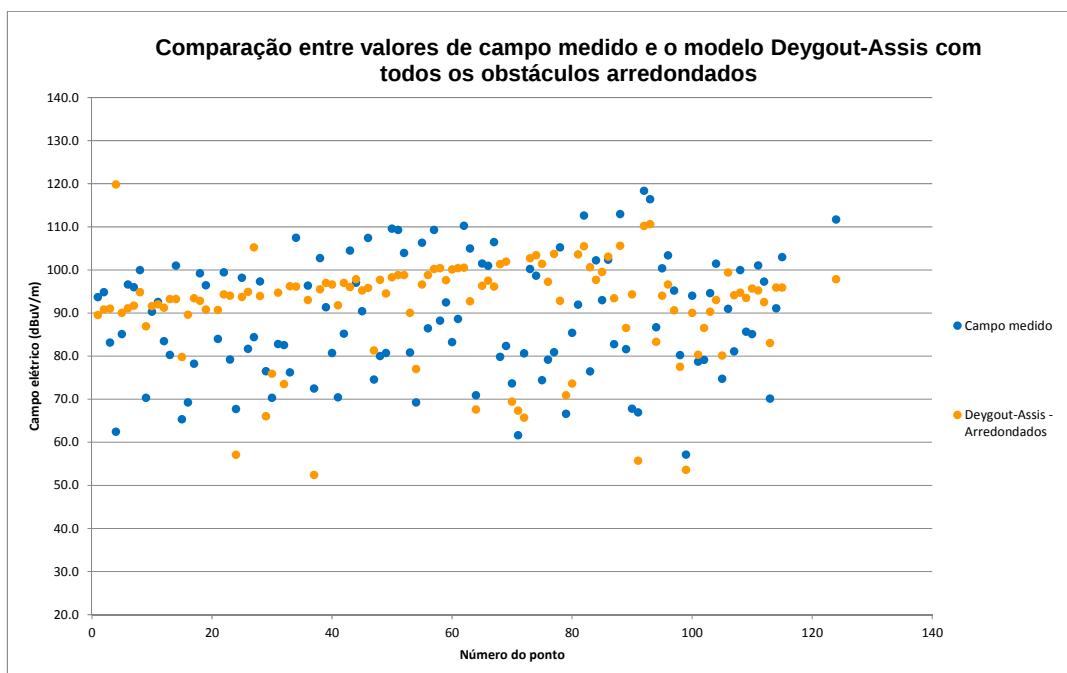


Figura 42 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - obstáculos arredondados

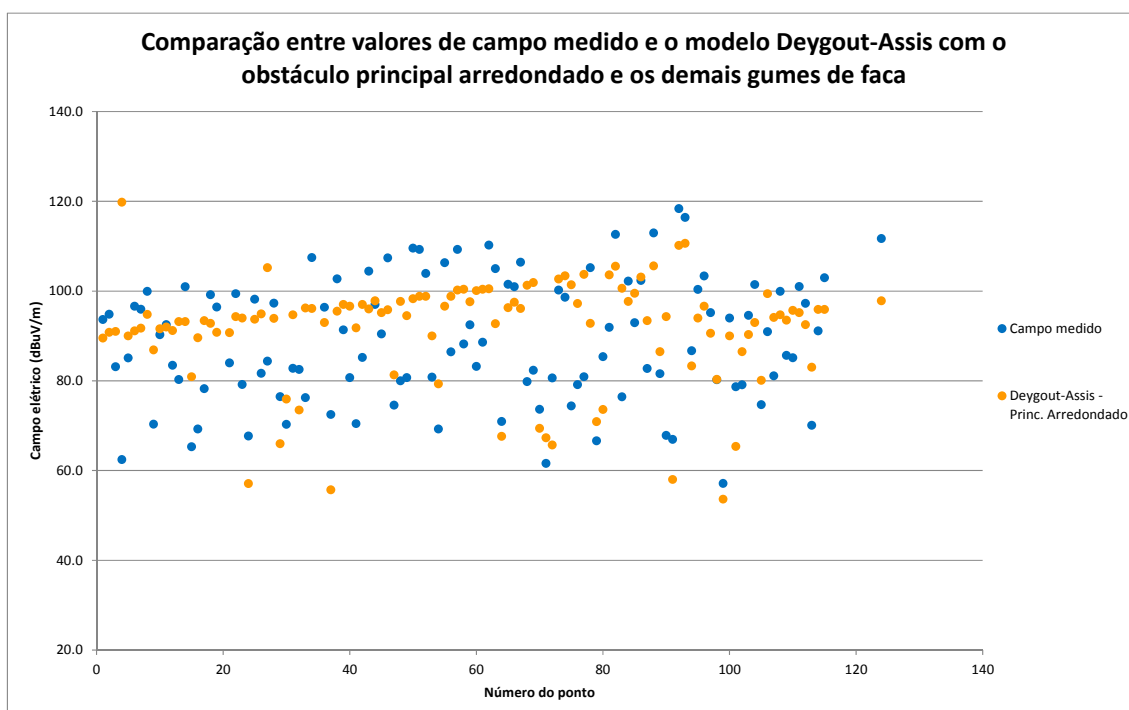


Figura 43 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - principal arredondado

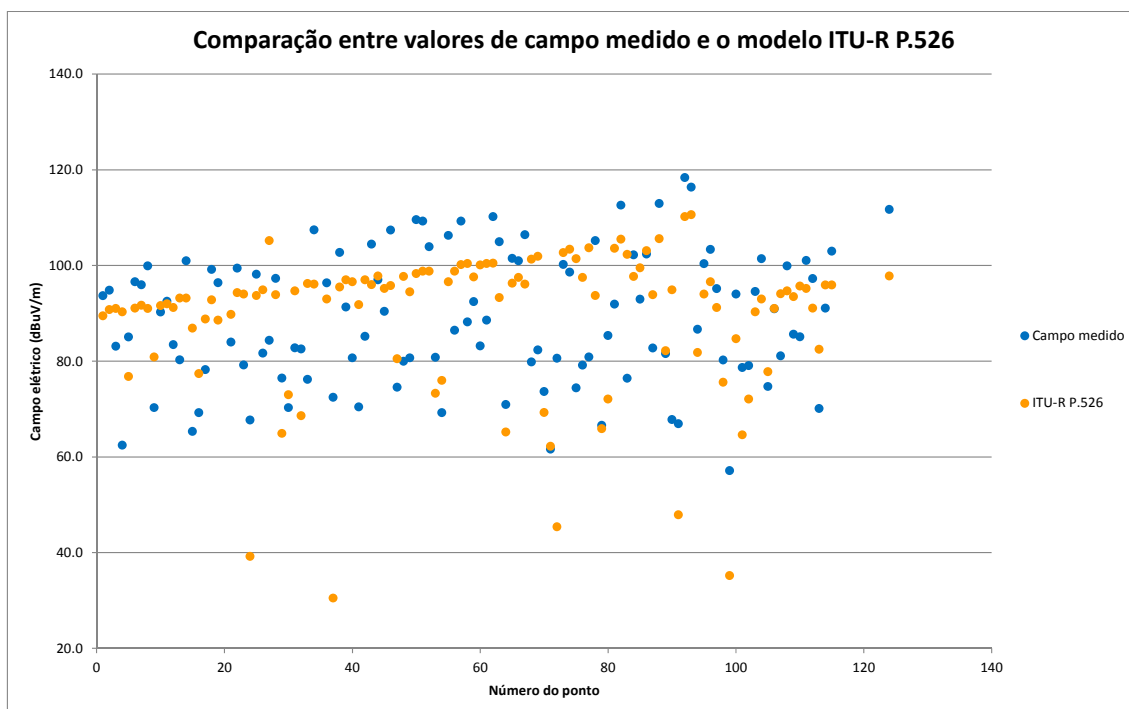


Figura 44 – Comparação entre o campo medido e o modelo ITU-R P.526

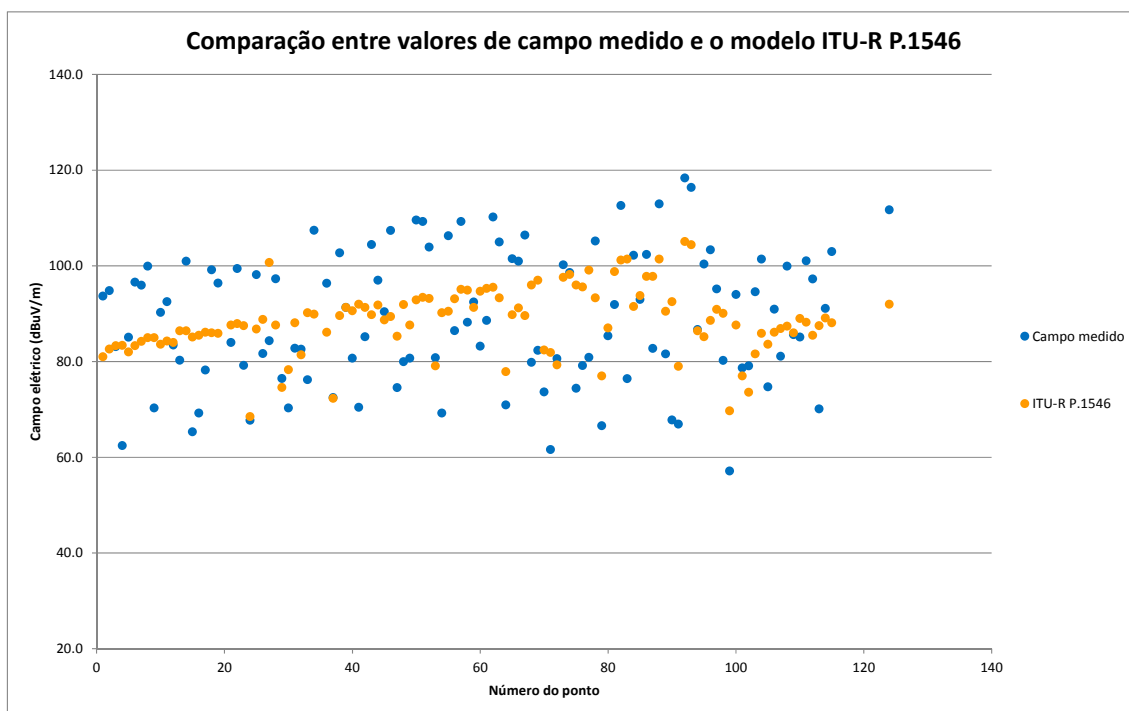


Figura 45 – Comparação entre o campo medido e o modelo ITU-R P.1546

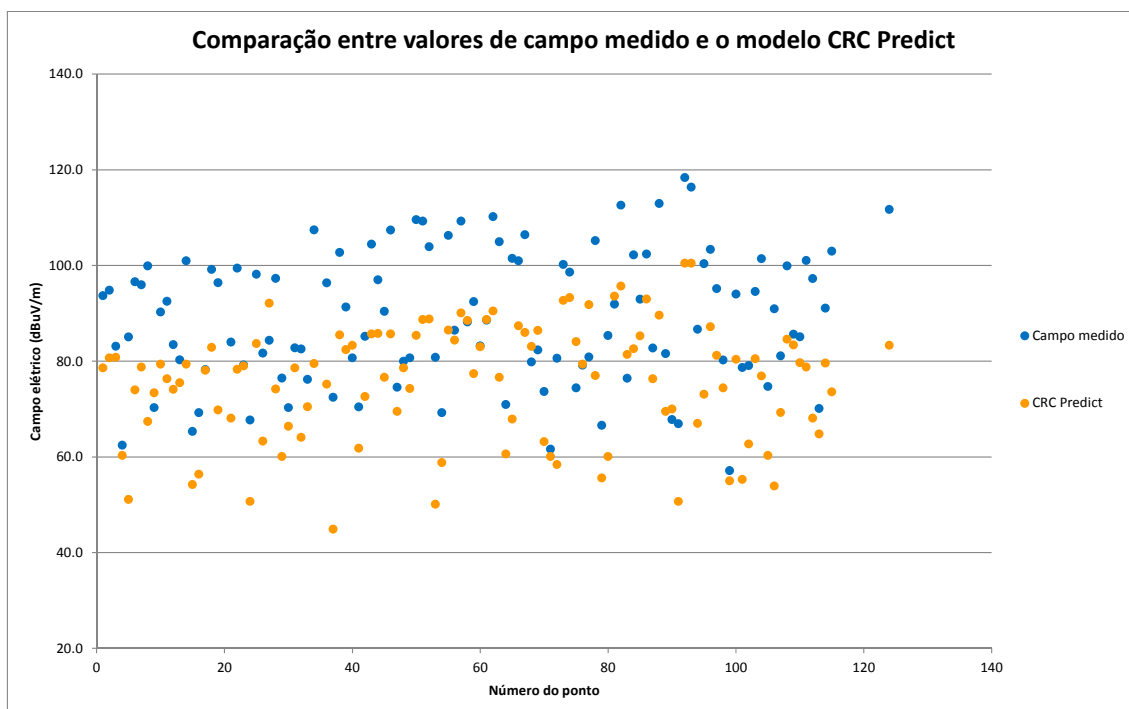


Figura 46 – Comparação entre o campo medido e o modelo CRC-Predict

A figura 47 mostra a comparação entre todos os modelos e as medidas realizadas.

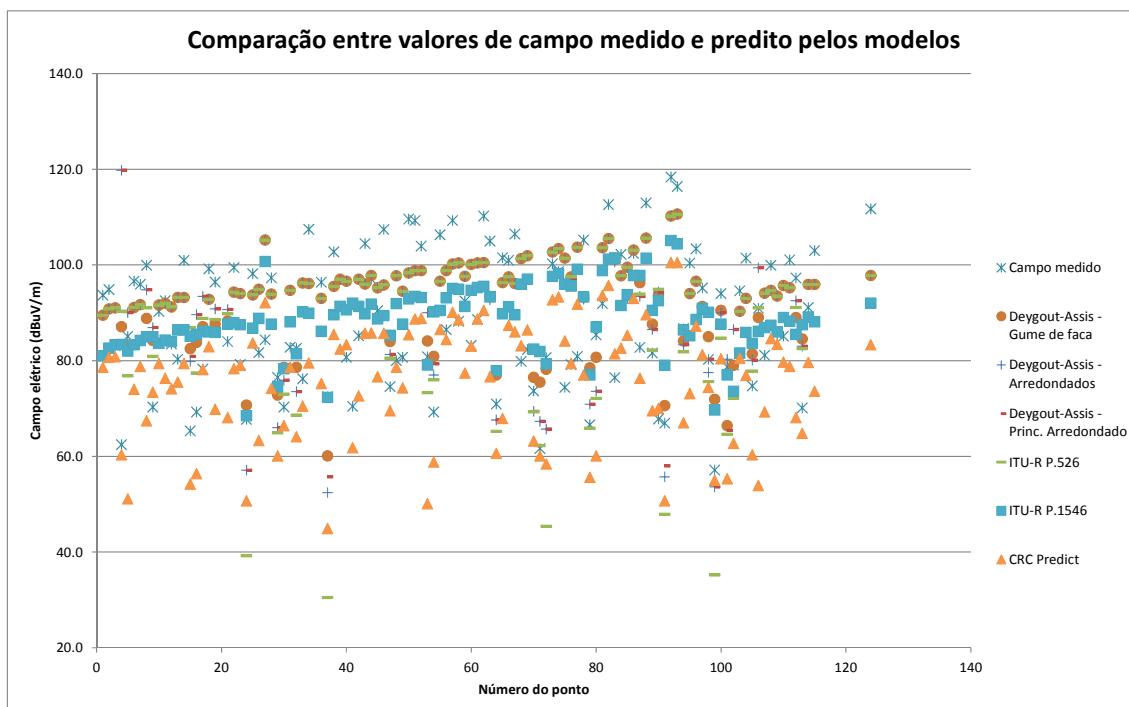


Figura 47 - Comparação entre o campo medido e os 6 modelos de predição

Como a observação visual entre o campo medido e o predito não permite comparar de forma objetiva os modelos estudados, o gráfico abaixo mostra o erro para cada modelo.

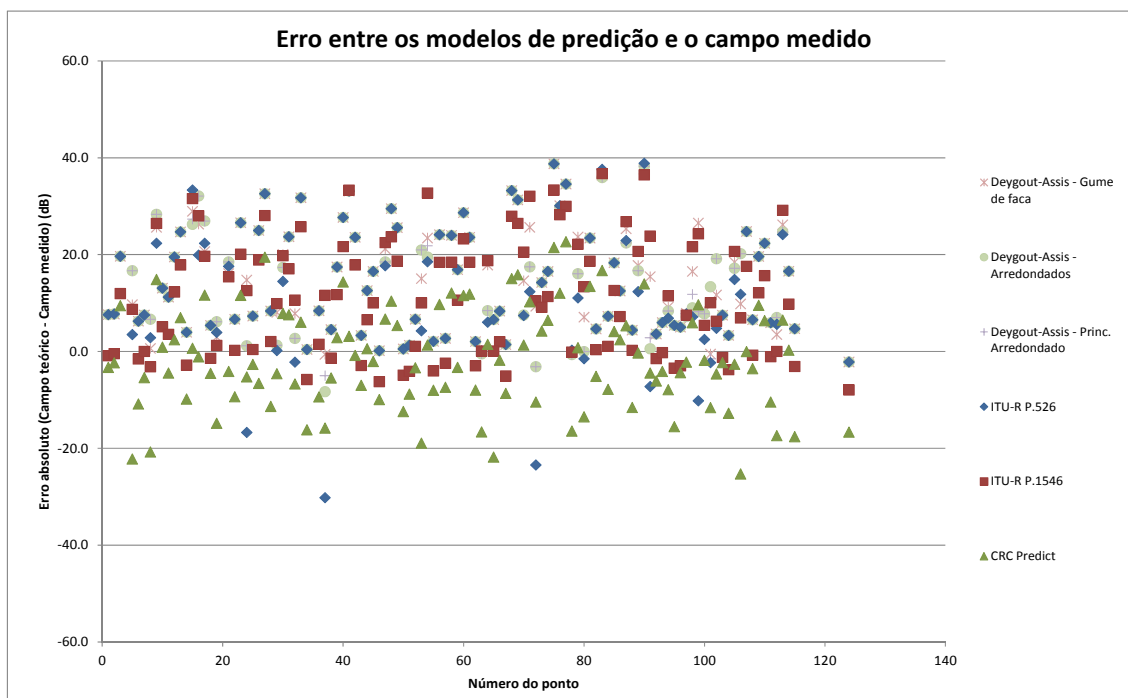


Figura 48 – Erro médio entre o campo teórico e o campo medido

A tabela 18 mostra os resultados de erro para cada modelo de propagação.

Tabela 18 – Comparação entre modelos de propagação para Belo Horizonte

Comparação entre os valores medidos e a predição de cada modelo para Belo Horizonte						
	Deygout-Assis Gume de faca	Deygout-Assis Arredondados	Deygout-Assis Principal Arredondado	ITU-R P.526	ITU-R P.1546	CRC Predict
Erro médio (Módulo do erro)	14.6	14.2	14.1	13.7	12.4	8.6
Erro médio	14.6	13.9	13.9	12.0	11.1	-1.6
Desvio padrão do erro	10.5	10.9	10.9	12.5	11.8	10.3
Erro RMS	18.0	17.6	17.6	17.4	16.2	10.5

Reexaminando a tabela 17, que associa as localidades estudadas com suas topografias, vemos que na cidade que apresenta valores intermediários de HSNMT e de desvio padrão do terreno, o modelo que se comportou melhor foi o CRC Predict em todos os tipos de erros considerados.

6.1.4

Rio de Janeiro

Para a localidade do Rio de Janeiro, os dados foram comparados nas figuras 49 a 54 para os seis modelos de propagação.

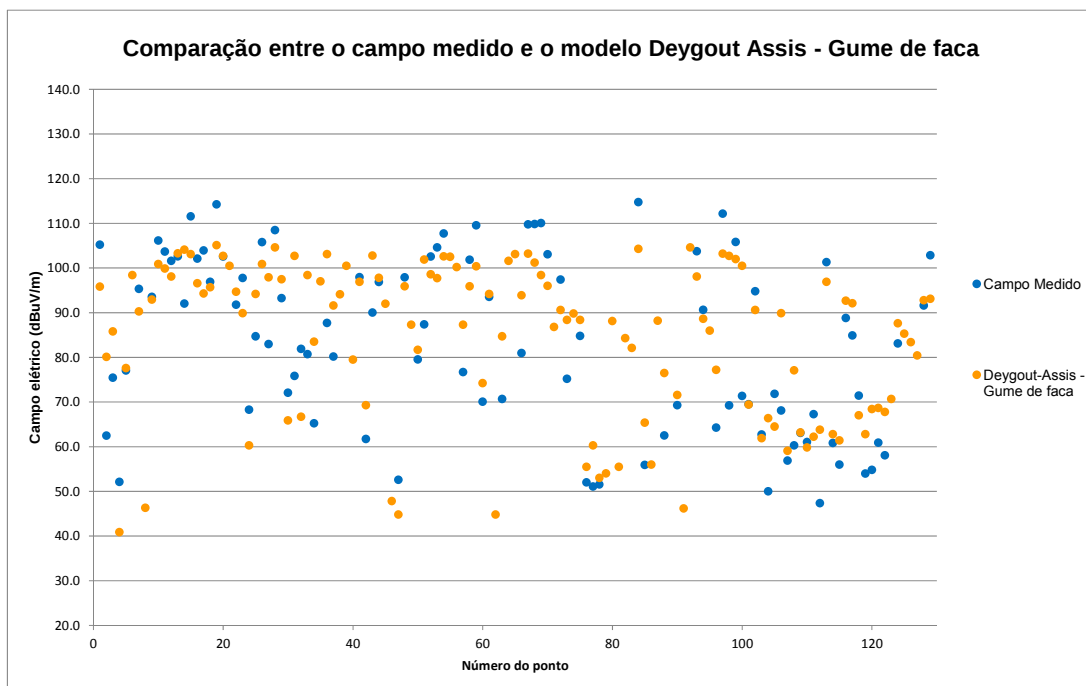


Figura 49 – Comparação entre o campo medido e o modelo Deygout-Assis - Gume de faca

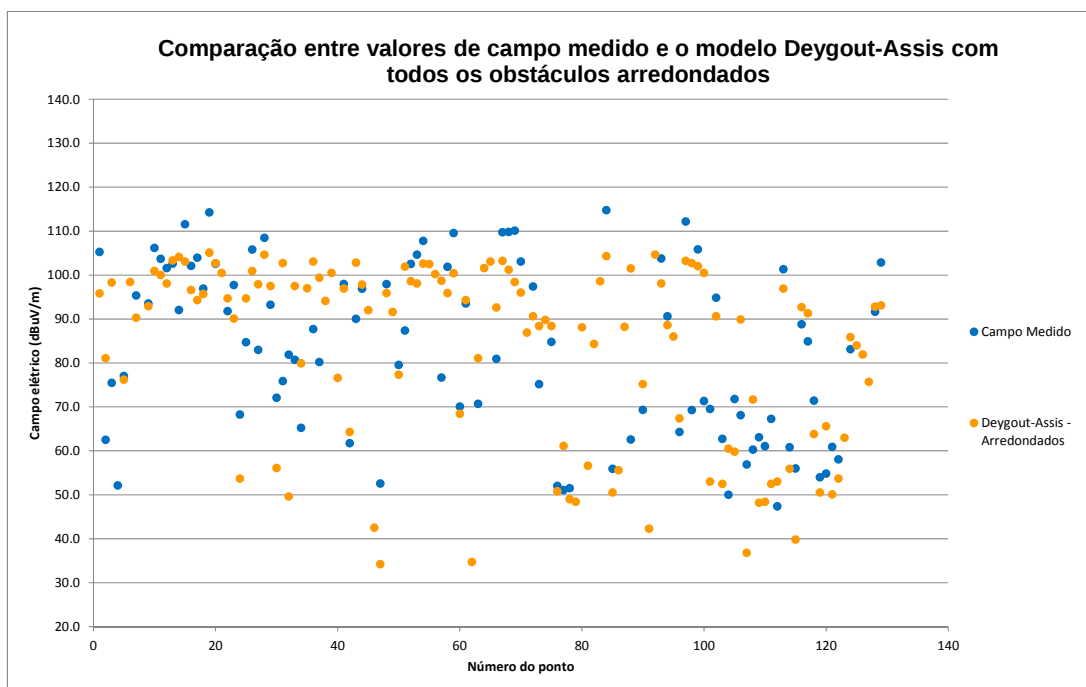


Figura 50 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - obstáculos arredondados

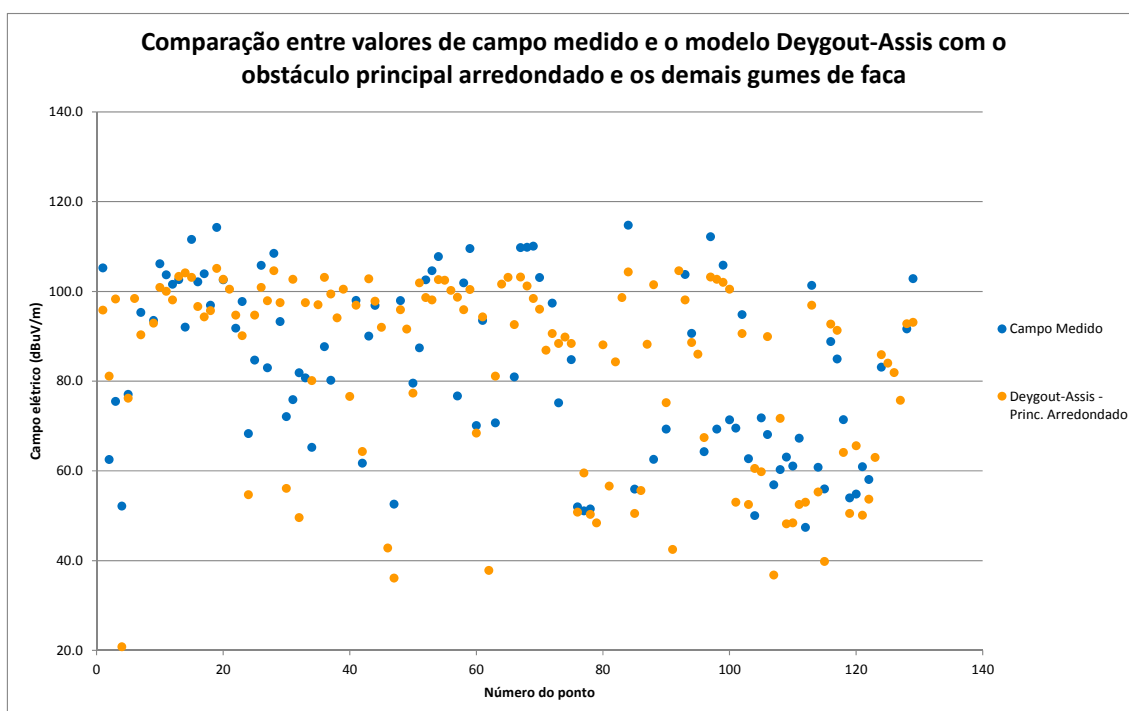


Figura 51 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - principal arredondado

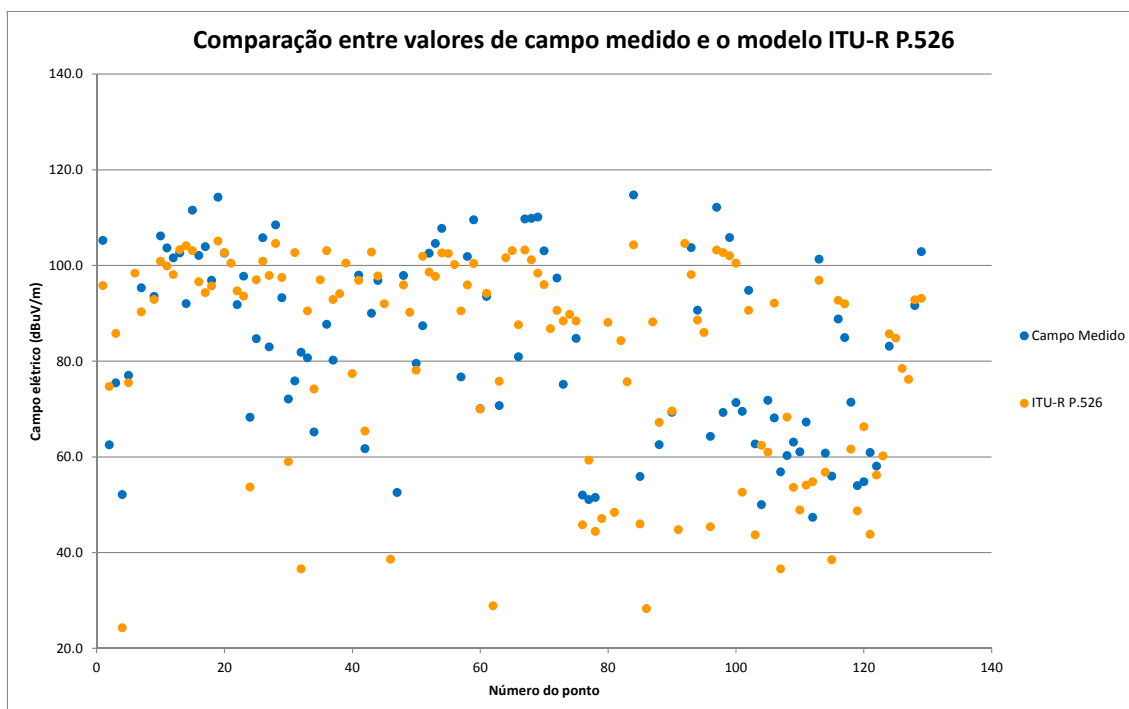


Figura 52 – Comparação entre o medido e o modelo ITU-R P.526

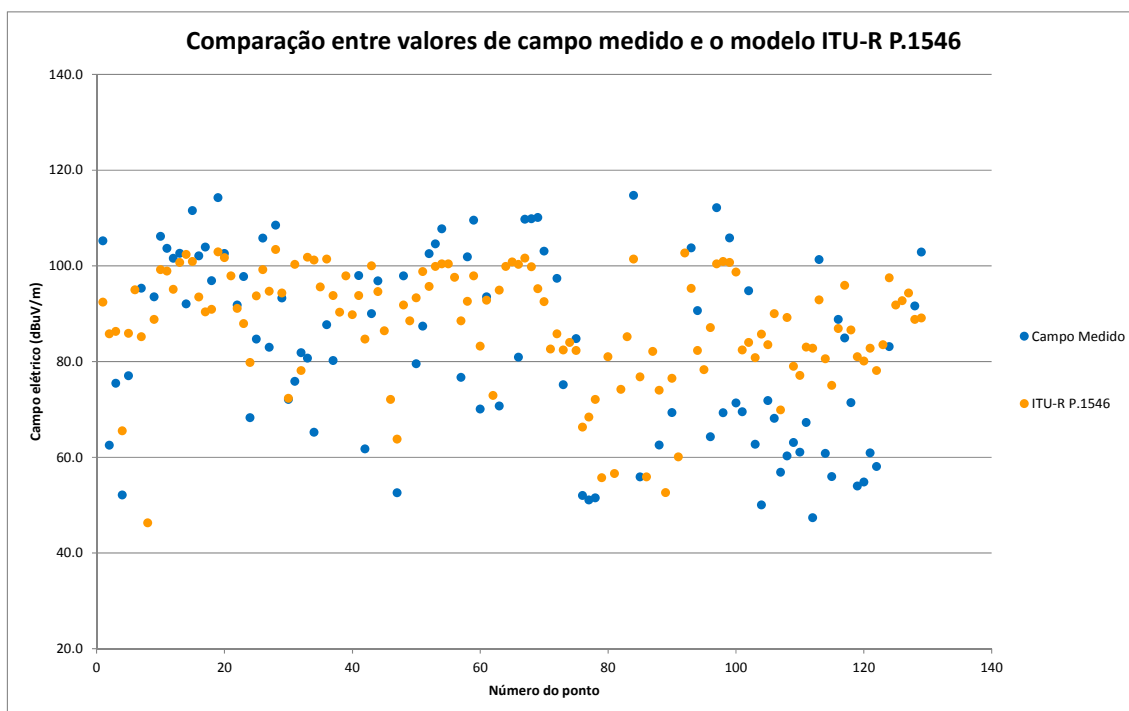


Figura 53 – Comparação entre o campo medido e o modelo ITU-R P.1546

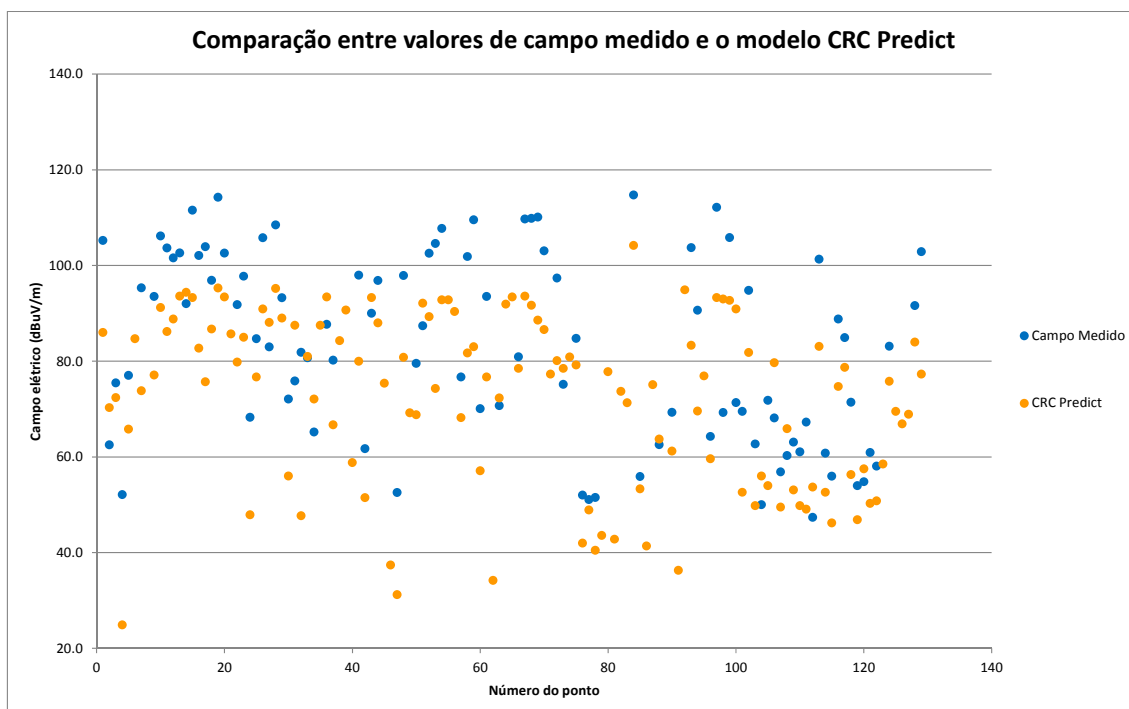


Figura 54 – Comparação entre o campo medido e o modelo CRC-Predict

A figura 55 mostra a comparação entre todos os modelos e as medidas realizadas.

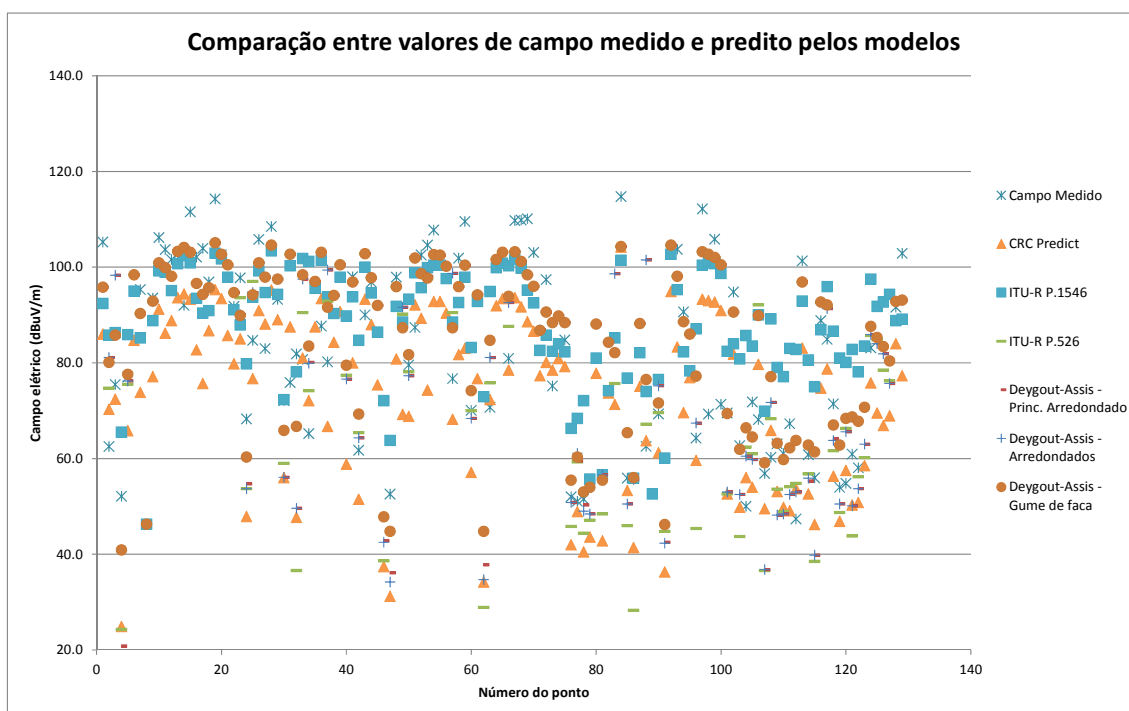


Figura 55 – Comparação entre o campo medido e os 6 modelos estudados

Como a observação visual entre o campo medido e o predito não permite comparar de forma objetiva os modelos estudados, os gráficos abaixo mostram o erro para cada modelo.

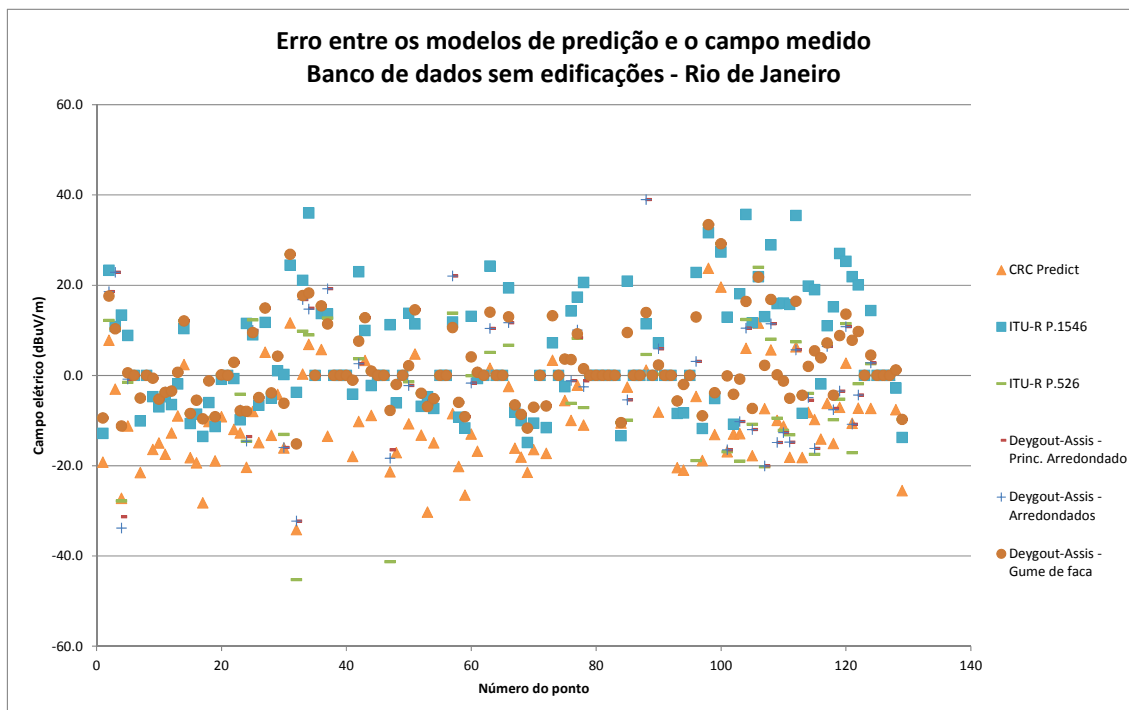


Figura 56 – Gráfico do erro para os 6 modelos estudados com banco de dados sem edificações

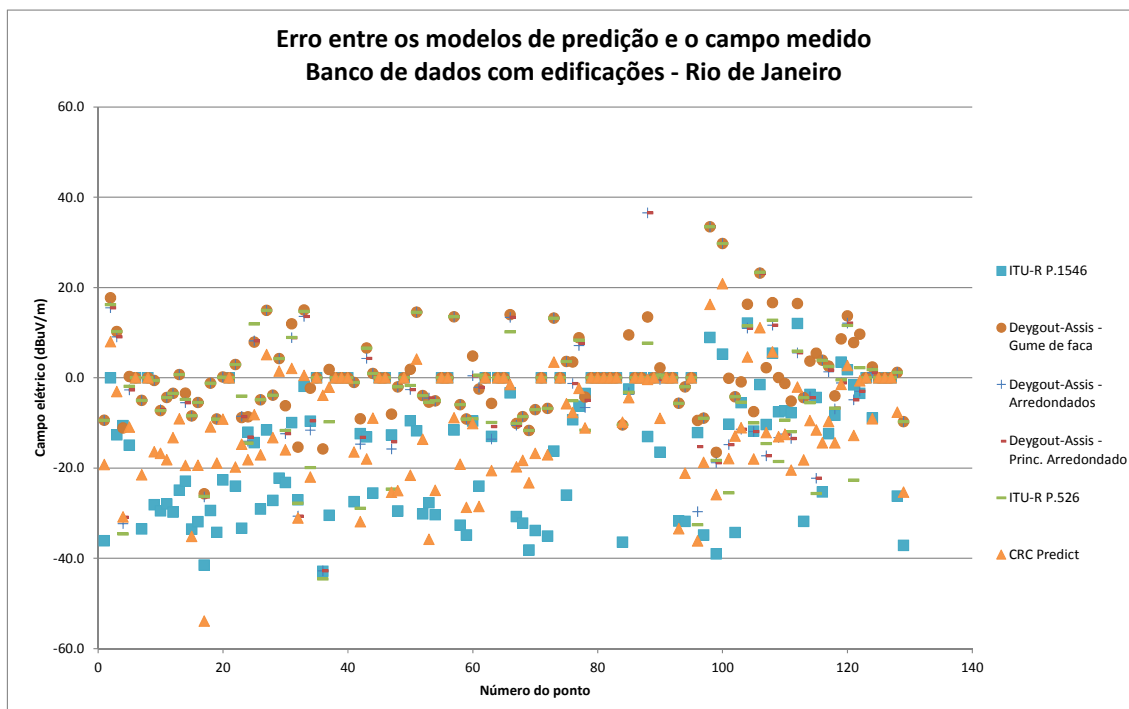


Figura 57 – Erro entre os modelos de propagação - Banco de dados com edificações

As tabelas 19 e 20 mostram os resultados de erro para cada modelo de propagação. Como nesta localidade também dispomos de banco de dados com edificações, apresentamos os cálculos de erro para as duas situações. A tabela 19 apresenta os erros com modelo de elevação sem edificações.

Tabela 19 – Comparação entre modelos de propagação para o Rio de Janeiro - banco de dados sem edificações.

Comparação entre os valores medidos e a predição de cada modelo para o Rio de Janeiro Banco de dados sem edificações						
	Deygout-Assis Gume de faca	Deygout-Assis Arredondados	Deygout-Assis Principal Arredondado	ITU-R P.526	ITU-R P.1546	CRC Predict
Erro médio (Módulo do erro)	8.1	9.8	9.7	9.4	12.9	12.7
Erro médio	2.5	-0.1	-0.1	-1.8	6.3	-10.0
Desvio padrão do erro	10.0	12.7	12.6	12.5	13.9	10.6
Erro RMS	10.3	12.7	12.6	12.6	15.2	14.6

A tabela 20 apresenta os erros com modelo de elevação com edificações.

Tabela 20 – Comparação entre modelos de propagação para o Rio de Janeiro - banco de dados com edificações

Comparação entre os valores medidos e a predição de cada modelo para o Rio de Janeiro Banco de dados com edificações						
	Deygout-Assis Gume de faca	Deygout-Assis Arredondados	Deygout-Assis Principal Arredondado	ITU-R P.526	ITU-R P.1546	CRC Predict
Erro médio (Módulo do erro)	7.8	10.4	10.1	10.2	19.6	15.0
Erro médio	0.4	-2.4	-2.1	-3.9	-18.6	-13.2
Desvio padrão do erro	10.0	14.7	14.3	13.1	13.5	12.0
Erro RMS	10.0	14.8	14.5	13.6	23.0	17.9

Na análise do Rio de Janeiro, os modelos ponto a ponto tiveram o melhor desempenho com destaque para o modelo Deygout-Assis.

A presença das edificações nestes cálculos provocaram um aumento grande do erro para o modelo ponto-área do ITU, a recomendação P.1546.

6.1.5

São Paulo

Para a localidade de São Paulo, os dados foram comparados nas figuras 58 a 63 para os seis modelos de propagação.

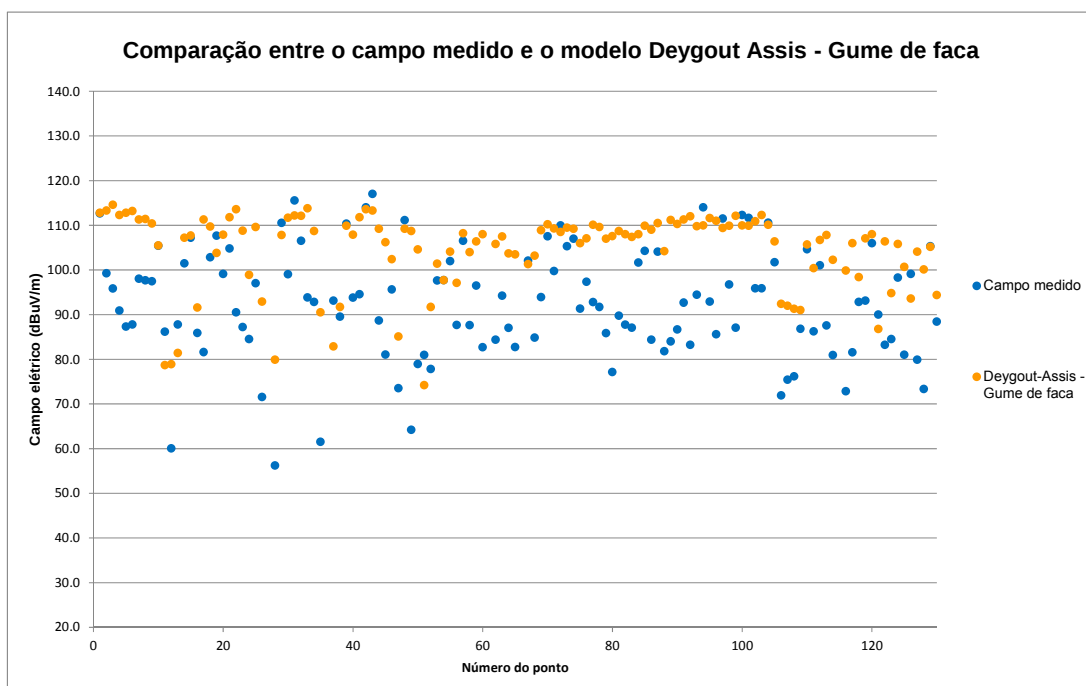


Figura 58 – Comparação entre o campo medido e o modelo Deygout-Assis - Gume de faca

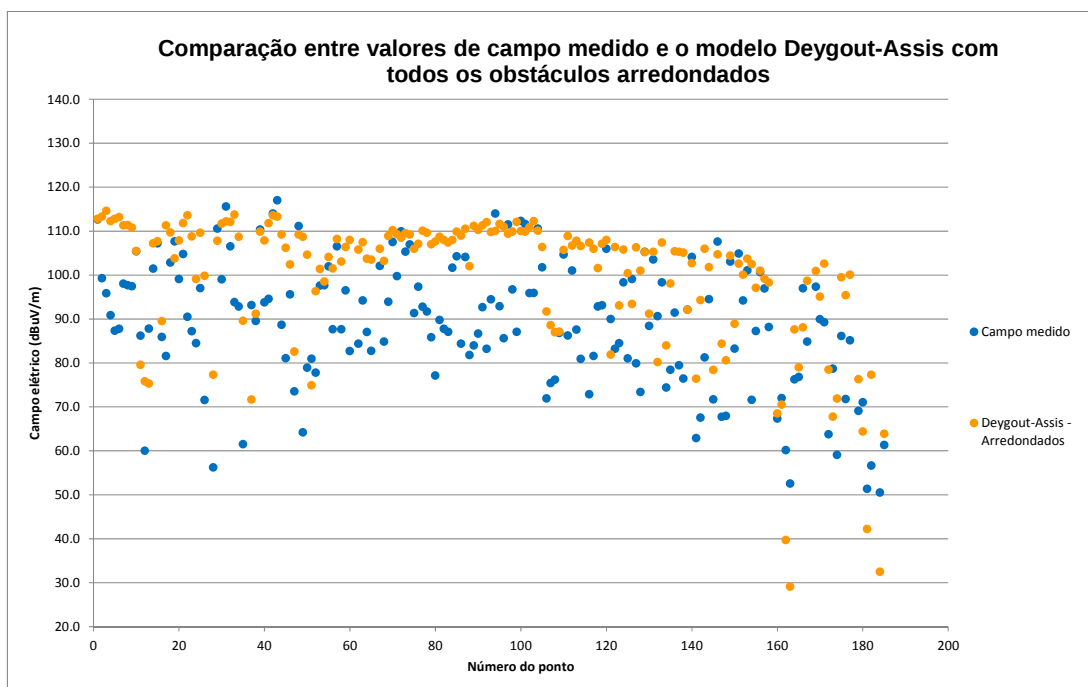


Figura 59 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - obstáculos arredondados

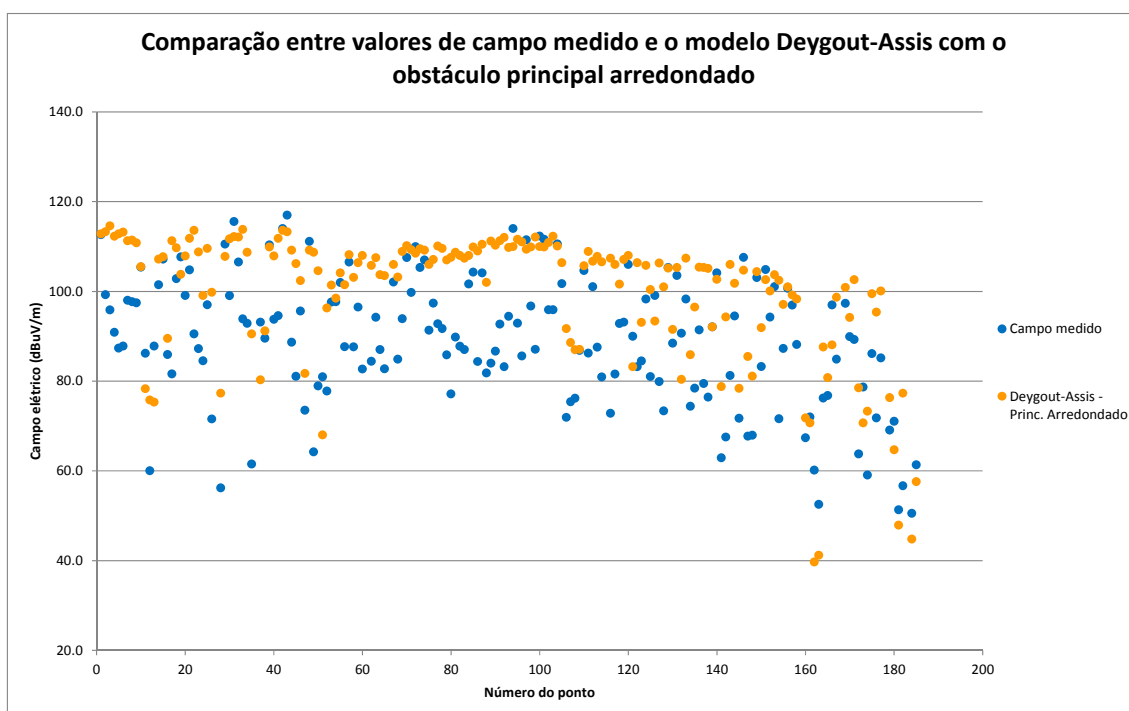


Figura 60 – Comparação entre o medido e o modelo Deygout-Assis - principal arredondado

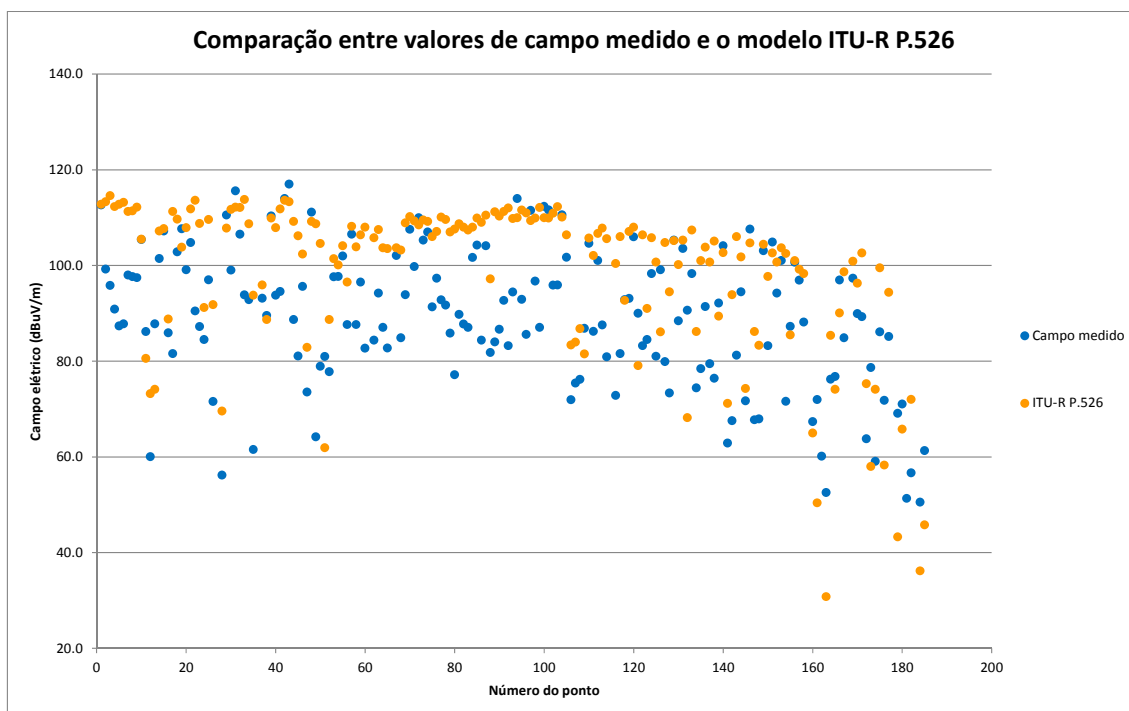


Figura 61 – Comparação entre o medido e o modelo ITU-R P.526

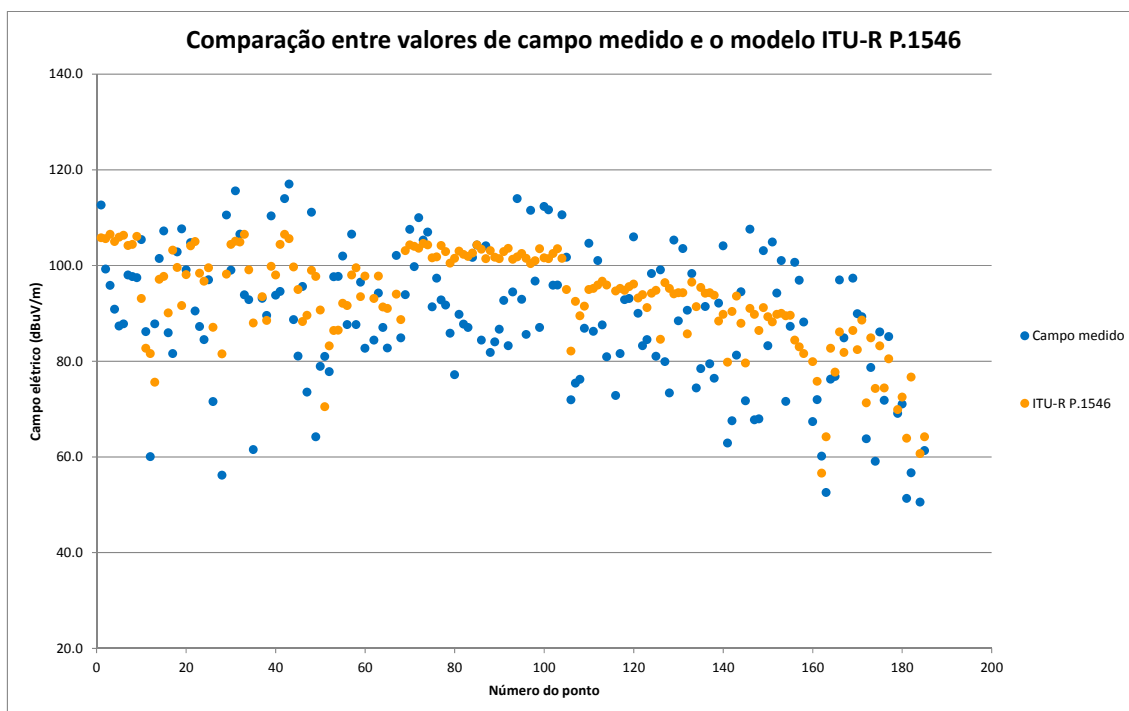


Figura 62 – Comparação entre o campo medido e o modelo ITU-R P.1546

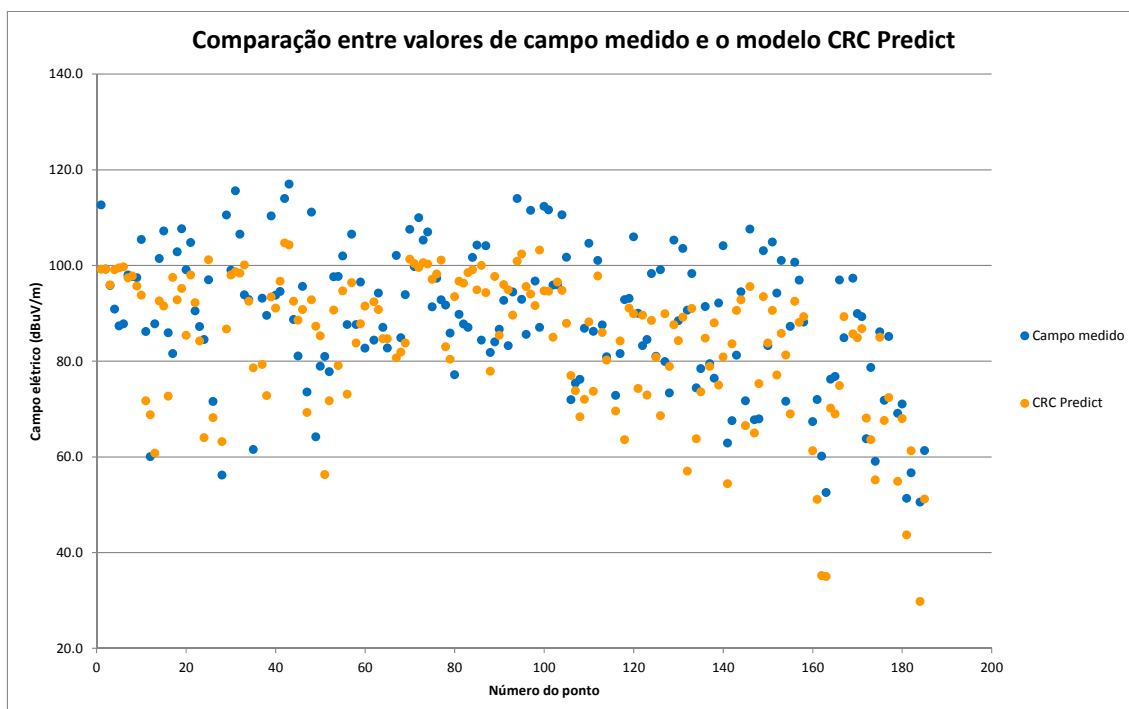


Figura 63 – Comparação entre o campo medido e o modelo CRC-Predict

A figura 64 mostra a comparação entre todos os modelos e as medidas realizadas.

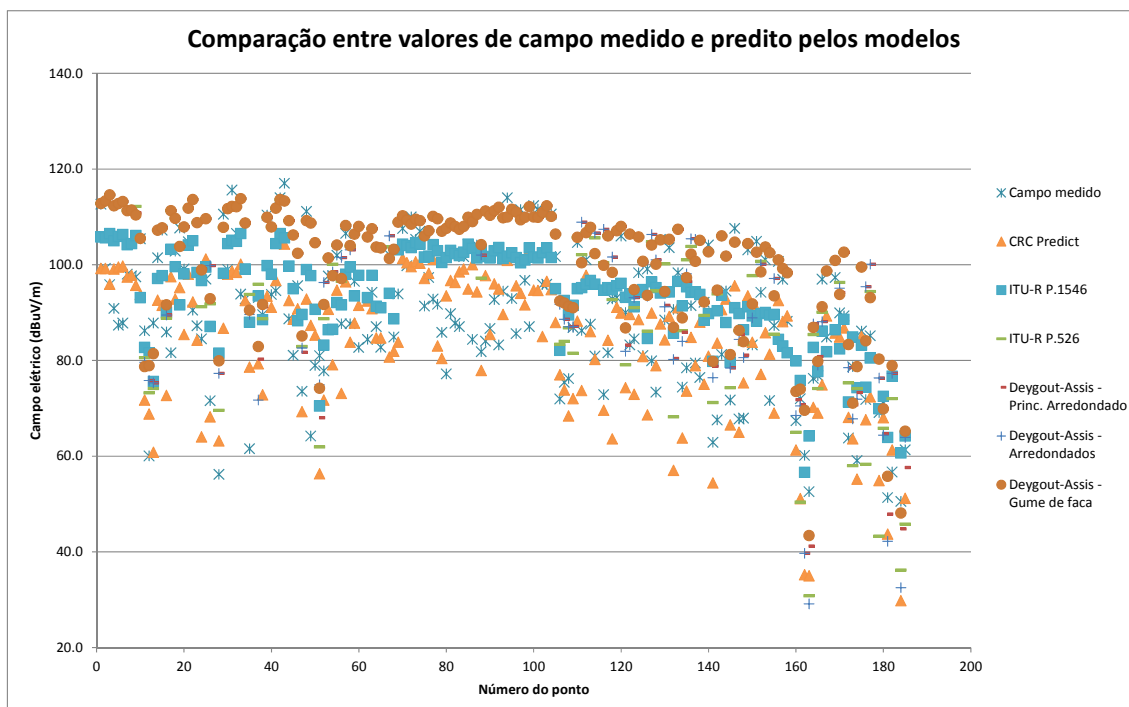


Figura 64 – Comparação entre o campo medido e os 6 modelos estudados

Como a observação visual entre o campo medido e o predito não permite comparar de forma objetiva os modelos estudados, os gráficos abaixo mostram o erro para cada modelo.

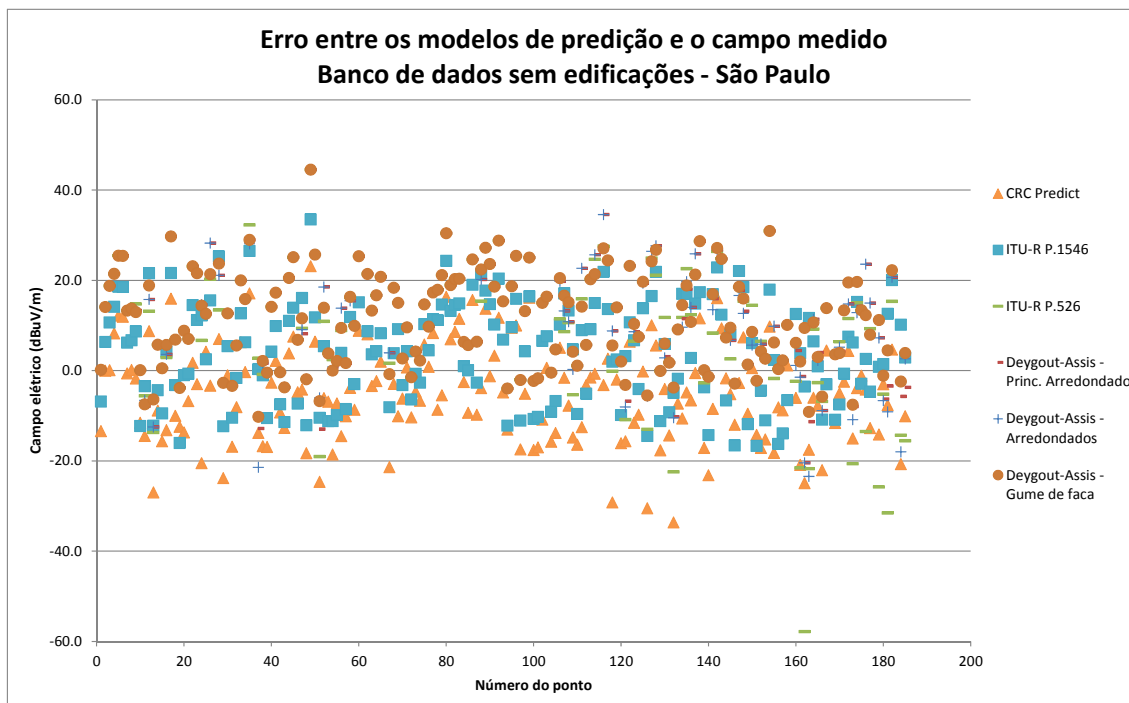


Figura 65 – Erro entre os modelos de propagação - Banco de dados sem edificações

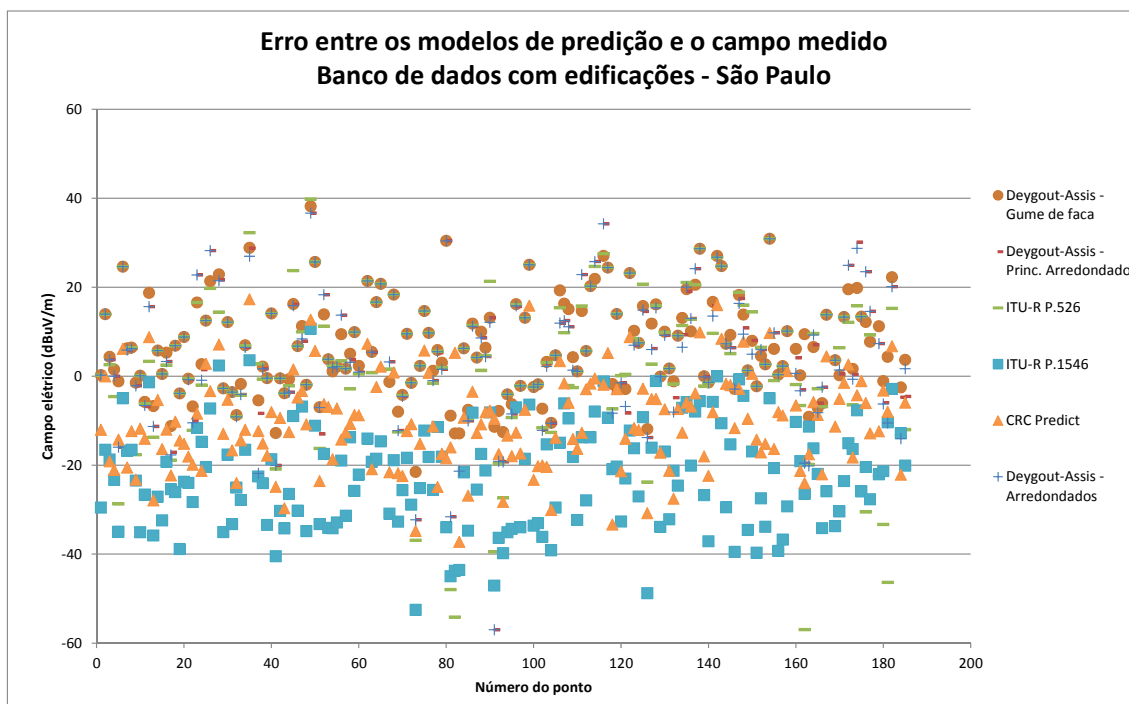


Figura 66 – Erro entre os modelos de propagação - Banco de dados com edificações

As tabelas 21 e 22 mostram os resultados de erro para cada modelo de propagação. Como nesta localidade também dispomos de banco de dados com edificações, apresentamos os cálculos de erro para as duas situações. A tabela 21 apresenta os erros com modelo de elevação sem edificações.

Tabela 21 – Comparação entre modelos de propagação em São Paulo – banco de dados sem edificações

Comparação entre os valores medidos e a predição de cada modelo para o São Paulo Banco de dados sem edificações						
	Deygout-Assis Gume de faca	Deygout-Assis Arredondados	Deygout-Assis Principal Arredondado	ITU-R P.526	ITU-R P.1546	CRC Predict
Erro médio (Módulo do erro)	12.3	12.8	12.6	13.0	10.0	9.7
Erro médio	11.1	10.4	10.7	8.7	4.1	-5.2
Desvio padrão do erro	10.4	11.8	11.3	13.6	11.1	10.7
Erro RMS	15.2	15.7	15.6	16.2	11.8	11.9

A tabela 22 apresenta os erros com modelo de elevação com edificações.

Tabela 22 – Comparação entre modelos de propagação em São Paulo - banco de dados com edificações

Comparação entre os valores medidos e a predição de cada modelo para o São Paulo Banco de dados com edificações						
	Deygout-Assis Gume de faca	Deygout-Assis Arredondados	Deygout-Assis Principal Arredondado	ITU-R P.526	ITU-R P.1546	CRC Predict
Erro médio (Módulo do erro)	9.6	10.9	10.8	12.2	22.1	12.4
Erro médio	6.5	4.7	5.0	2.1	-22.0	-10.2
Desvio padrão do erro	10.6	13.4	13.2	17.9	11.5	10.6
Erro RMS	12.4	14.2	14.1	18.0	24.8	14.7

Na cidade de São Paulo, que possui as menores HSNMT e variabilidade do terreno, como visto na tabela 17, o modelo da recomendação ITU-R P.1546 e do CRC Predict alcançaram melhores desempenhos quando as edificações não são consideradas nos cálculos.

Porém ficou clara a melhoria na qualidade das predições quando as edificações estão presentes não só porque estatisticamente os erros diminuíram,

mas principalmente quando analisamos individualmente os pontos de medida. Para ilustrar, o ponto 21 está desenhado abaixo considerando o enlace sem e com as edificações, respectivamente, nas figuras 67 e 68.

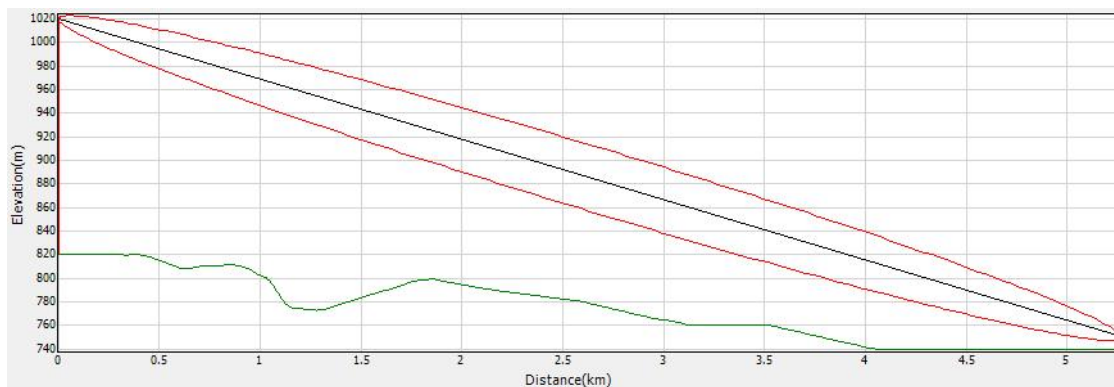


Figura 67 – Ponto 21 com relevo sem edificações

Observando a figura 67 chegamos a imaginar que o ponto tem visada com o transmissor e que a medida deveria ser igual ao cálculo teórico, porém as predições mostraram uma diferença de 7 dB.

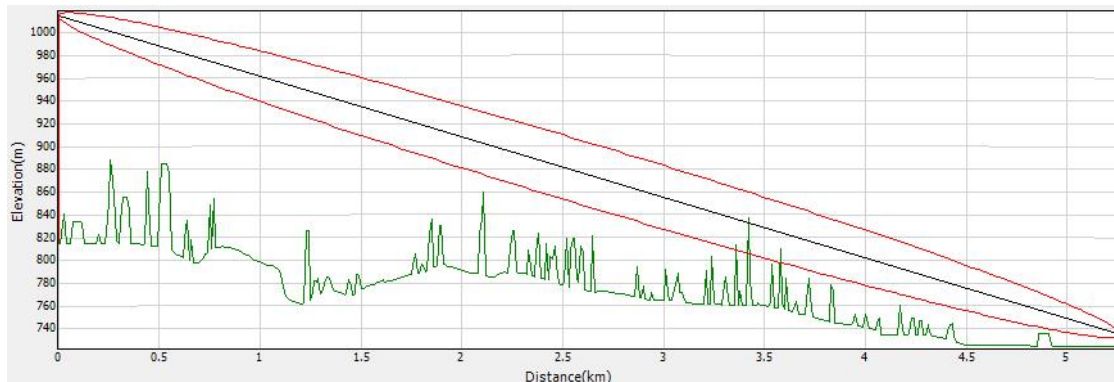


Figura 68 – Ponto 21 com relevo com edificações

Quando analisamos o ponto 21 com as edificações, vemos que o enlace não opera com visada direta e o erro entre o valor medido e o calculado pelos métodos ponto a ponto, como todas as variações do Deygout-Assis e a ITU-R P.526, fica menor que 1 dB.