7 Análise dos Resultados

Após a coleta e aquisição dos dados, uma análise deve ser feita de modo a se compreender os mecanismos de propagação na região. Serão feitas análises da região como um todo. Entretanto, como nem toda a região de medida apresenta as mesmas características de urbanização será feita também uma análise por setorização, de acordo com os três setores já citados. Inicialmente, será feita a análise comparativa, observando-se os modelos propostos e como eles se adequam à região. Em seguida, será feito um exame estatístico para se caracterizar o comportamento estatístico das variações do sinal recebido. Por último, será feita uma análise de dependência do sinal recebido com a variação na altura da antena receptora. Ao final, serão definidos os limiares de recepção e o contorno de cobertura da região, com base nos resultados obtidos.

7.1. Seleção dos pontos

A antena transmissora apresenta 4º de abertura vertical. Isso significa que sua potência de transmissão cai à metade nessa direção vertical.

A fim de evitar deformações nos resultados é preciso assegurar que os pontos de medidas se encontrem na região de "iluminação" da antena transmissora. A Figura 31 apresenta a geometria desse problema, onde pode ser visto que a distância mínima recomendada para os pontos de medida é dada por:

$$d_{minimo} = h_{TX} \times \tan g(\theta_{1/2 \text{ potência}})$$
(7.1)



Figura 31: Distância mínima de cobertura

Sendo assim, a distância para um ângulo de abertura vertical inferior a 4º deve ser maior do que 1 km. Todos os pontos medidos com distâncias inferiores a essa serão descartados nas análises que se seguem.

7.2. Dependência com a distância

Antes de comparar os resultados medidos com os modelos ponto-área e o modelo ponto-a-ponto é necessário caracterizar a dependência do sinal medido com a distância. Para se determinar a atenuação do percurso foi utilizado o campo médio medido a 10 metros do solo, em dBµV/m, e subtraído do sinal efetivamente irradiado pela transmissora na direção do ponto de medida.

Os valores de atenuação obtidos foram plotados em gráficos com a distância em escala logarítmica e uma reta de melhor ajuste do tipo [y=a+b*log10(x)] foi estimada. Para isso foi desenvolvido um programa em MATLAB, apresentado no Anexo A, que usa dois arquivos de entrada; um com os valores associados às medidas (radial, distância, campo médio e desvio padrão em torno da média para cada ponto de medida) e o outro associado ao ganho da antena transmissora para todos os azimutes de 10º em 10º. Com esse programa é possível obter o gráfico e a reta de atenuação para cada radial ou para uma seqüência de radiais definida pelas radiais inicial e final.

Os resultados obtidos para a região como um todo e para cada setor são mostrados nas Figuras 32 a 35. Nestas figuras, os círculos cheios (•) representam a atenuação de propagação medida em dB. A atenuação do espaço livre em cada situação consta nos gráficos apenas para caráter comparativo, como uma reta de referência.

As retas de melhor ajuste para cada caso, válidas somente para distâncias maiores ou iguais a 1 km, são:

Região como um todo: $L(dB) = 100,7 + 34,6 \log(d_{km})$ Setor Jacarepaguá: $L(dB) = 90.8 + 46,1 \log(d_{km})$ Setor Barra da Tijuca: $L(dB) = 100,1 + 34,6 \log(d_{km})$

Setor Recreio dos Bandeirantes: $L(dB) = 106,2 + 23,9 \log(d_{km})$

Essas retas podem ser interpretadas por um fator de atenuação inicial (L₀) e por um outro fator de atenuação com a distância (γ) como visto na expressão abaixo:

$$L = L_0 + \gamma \log_{10}(d_{Km})$$
(7.2)



Figura 32: Atenuação por percurso - Região como um todo



Figura 33: Atenuação por percurso - Setor Jacarepaguá



Figura 34: Atenuação por percurso - Setor Barra da Tijuca



Figura 35: Atenuação por percurso - Setor Recreio dos Bandeirantes

Os gráficos das Figuras 32 a 35 mostram a existência nítida de três curvas de atenuação por percurso com inclinações e atenuações iniciais distintas.

O primeiro setor, Jacarepaguá, com fator de atenuação (γ) de aproximadamente 45 apresenta a curva de maior inclinação. Por sua vez, sua atenuação inicial é a menor.

Essa sub-região, como já mencionado no capítulo anterior, não apresenta obstáculos de urbanização próximos ao transmissor, caracterizando seus primeiros 4 quilômetros por uma área bem descampada e com visada entre transmissor e receptor. Entretanto, nos perímetros maiores, pode-se observar nas Figuras 24 e 25 do capítulo 6 a formação de montanhas e irregularidades no terreno, além da presença de uma densa urbanização caracterizada, em sua maioria, por residências com até três andares e prédios baixos e médios com até 8 andares que provocam a perda de visada entre transmissor e receptor e, por conseqüência, atenuações mais fortes.

O setor da Barra da Tijuca apresenta um relevo mais suave, praticamente plano em toda sua extensão. Como observado na Figura 27 do capítulo 6, poucas construções com alturas elevadas estão presentes nos primeiros três quilômetros dessa sub-região, por outro lado, nas extensões seguintes, pode-se ver a presença de conjuntos bem espaçados um do outro formados por grandes edificações intercalados por conjuntos de casas e edifícios menores.

Essas características dão ao comportamento do sinal atenuações mais brandas nos primeiros quilômetros e um fator de atenuação com a distância em torno de 35.

O setor do Recreio dos Bandeirantes é o que apresenta atenuação inicial maior, pois há a presença de grandes construções nos primeiros 2 quilômetros, como visto na Figura 29 do capitulo 6. Esses prédios formam uma espécie de barreira para o sinal propagante nessas direções.

O fator de atenuação com a distância de aproximadamente 26 é o menor dentre os três setores. Esse valor indica um acréscimo suave das atenuações com a distância devido ao fato dessa sub-região se caracterizar por um relevo muito plano, assim como o da Barra da Tijuca, porém com a presença de construções de menor porte após os 2 quilômetros iniciais.

A equação ajustada de atenuação por percurso para todos os pontos tende a ser uma suavização das equações de cada setor. Por isso, L₀ e γ para essa equação são valores intermediários aos encontrados para os setores.

7.3. Modelos ponto-área

Os modelos ponto-área propostos e apresentados no capitulo 4 são os seguintes:

Okumura-Hata Ibrahim-Parsons Walfish-Bertoni

ITU-R p.1546

Esses modelos permitem o cálculo de cobertura de área usando a dependência com a distância e o tipo de urbanização. Além de serem funções da distância, são dependentes também de fatores constantes como freqüência, altura das antenas, tamanho da cidade e grau de urbanização, altura média dos prédios, espaçamento entre prédios, dentre outros parâmetros.

Com exceção do modelo ITU-R p.1546, que apresenta o resultado por meio curvas de campo elétrico versus distâncias, os demais modelos apresentam formulações para a perda de propagação expressas por equações de retas. Desse modo, para facilitar a comparação entre os modelos e as medidas, foram analisadas as equações de atenuação por percurso características de cada modelo descritas no capitulo 4 e comparada com as equações de ajuste com bases nas medidas de campo.

O programa utilizado foi o descrito no Anexo A. Com esse programa podem ser plotados os valores de atenuação obtidos nas medidas assim como as curvas de atenuação previstas para cada modelo ponto-área, com exceção do modelo ITU-R p.1546.

Cada modelo formula suas equações levando em consideração parâmetros próprios. Para o modelo Okumura-Hata, o parâmetro que descreve a característica do relevo é a altura média do terreno. Esse parâmetro foi obtido com base nas cartas topográficas digitalizadas de toda a região pelo uso do programa ArcInfo.

Os valores para os parâmetros como grau de urbanização, altura média dos prédios e espaçamento entre prédios, apresentados no capitulo 4 para os modelos de Ibrahim-Parsons e Walfish-Bertoni foram estipulados por meio de observações dos tipos de construções nas regiões de medidas assim como observações dos mapas das localidades. Esses parâmetros são mais subjetivos ficando para o usuário estipular valores que descrevam da melhor maneira possível os ambientes.

A Tabelas 7 apresenta os valores estipulados para os parâmetros dos modelos Okumura-Hata, Ibrahim-Parsons e Walfish-Bertoni utilizados nas simulações feitas para a região em geral e para cada setorização.

Parâmetros	Geral	Setor Jacarepaguá	Setor Barra da Tijuca	Setor Recreio dos Bandeirantes			
	Okumura-Hata						
Altura efetiva	54,0 m	53,4 m	73,8 m	67,7 m			
Tamanho da cidade	grande	grande	grande	grande			
Tipo de urbanização	suburbana	suburbana	suburbana	suburbana			
	Ibrahim-Parsons						
Fator de altura relativa - H	0 m	-4 m	2 m	2 m			
Fator de uso (%)	50	60	55	40			
Grau de Urbanização (%)	30	30	60	30			
Walfish-Bartoni							
Altura média dos predios	25 m	15 m	70 m	15 m			
Espaçamento entre prédios	40 m	30 m	40 m	40 m			

Tabela 7: Valores dos parâmetros de simulação dos modelos Okumura-Hata, Ibrahim-Parsons e Walfish-Bertoni.

As expressões matemáticas resultantes para os modelos Okumura-Hata e Ibrahim-Parsons são apresentadas nas Tabelas 8 e 9 abaixo:

Setor	Okumura-Hata
Geral	$L = 99,5 + 33,5 \log_{10}(d_{Km})$
Setor Jacarepaguá	$L = 99,5 + 33,6 \log_{10}(d_{Km})$
Setor Barra da Tijuca	$L = 97,6 + 32,7 \log_{10}(d_{Km})$
Setor Recreio dos Bandeirantes	$L = 98,1 + 32,9 \log_{10}(d_{Km})$

Tabela 8: Expressões matemáticas para os modelos Okumura-Hata

Satar	Ibrahim-Parsons			
56101	Empirico	Semi empírico		
Geral	$L = 109,3 + 49,6 \log_{10}(d_{Km})$	$L = 108,1 + 40 \log_{10}(d_{Km})$		
Setor Jacarepaguá	$L = 113,5 + 49,6 \log_{10}(d_{Km})$	$L = 111,3 + 40 \log_{10}(d_{Km})$		
Setor Barra da Tijuca	$L = 109,9 + 49,6 \log_{10}(d_{Km})$	$L = 108,3 + 40 \log_{10}(d_{Km})$		
Setor Recreio dos Bandeirantes	$L = 105,9 + 49,6 \log_{10}(d_{Km})$	$L = 105.6 + 40 \log_{10}(d_{Km})$		

Tabela 9: Expressões matemáticas para os modelos Ibrahim-Parsons

Os resultados para os Modelos Ohumura-Hata, Ibrahim-Parsons e Walfish-Bertoni são apresentados graficamente nas Figuras 36 a 38.

Para utilizar o modelo ITU-R p.1546 foram levantadas as alturas médias do relevo para cada radial. O campo elétrico teórico, em dBµV/m, excedido em 50% e 10% do tempo foi calculado pelo método de interpolações descrito na seção 4 do capítulo 4, implementado em uma planilha em programa EXCEL.

Seus resultados estão apresentados de forma gráfica na Figura 39 onde os (x) representam os valores do campo elétrico excedido 50% do tempo teórico em 50% das localidades e (•) os valores de campo elétrico mediano medido para cada ponto.



Figura 36: Comparação com o modelo Okumura-Hata



Figura 36: Comparação com o modelo Okumura-Hata





Figura 37: Comparação com o modelo Ibrahim-Parsons



Figura 37: Comparação com o modelo Ibrahim-Parsons



Figura 38: Comparação com o modelo Walfish-Bertoni



Figura 38: Comparação com o modelo Walfish-Bertoni



Figura 39: Comparação com o modelo ITU-R p.1546



Figura 39: Comparação com o modelo ITU-R p.1546

Uma maneira de fazer uma comparação quantitativa é analisando as estatísticas do erro para cada modelo em relação aos valores medidos. O erro (e) e o erro absoluto (E), entre as previsões são calculados, para cada ponto, por:

$$e_i = Ep_i - Em_i$$

$$E_i = Ep_1 - Em_i$$
(7.3)

Onde Ep_i é o campo elétrico previsto por um determinado modelo e Em_i é o campo médio para cada ponto. O erro médio e o erro médio absoluto são calculados a partir da eq. (7.3) por:

$$\langle e \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e_i$$

$$\langle E \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} E_i$$
(7.4)

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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^{N} E_i^2 - N \langle E \rangle^2 \right)}$$
(7.5)

O erro RMS é uma associação dos dois parâmetros anteriores. Assim, usando as eq. (7.4) e (7.5), tem-se:

$$E_{RMS} = \sqrt{\langle E \rangle^2 + \sigma^2} \tag{7.6}$$

Os valores obtidos para o erro médio, erro médio absoluto, desvio padrão absoluto e erro RMS para todas as análises de setorização são apresentados nas Tabelas 10 a 13.

Geral						
Modelos	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS		
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)		
Regressão Linear	-	9,27	6,76	11,47		
Okumura-Hata	1,91	9,23	7,07	11,63		
Ibrahim-Parsons Empírico	17,70	19,40	9,84	21,75		
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-10,70	13,80	7,67	15,79		
Walfish-Bertoni	-16,24	17,68	9,25	19,95		
ITU-R 1546	7,31	10,32	8,60	13,43		

Tabela 10: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para a região em geral.

Setor Jacarepaguá					
Madalaa	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS	
Middelos	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	
Regressão Linear	-	8,36	7,47	11,22	
Okumura-Hata	1,05	9,35	7,21	11,81	
Ibrahim-Parsons Empírico	-25,46	25,47	11,30	27,87	
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-15,75	17,15	9,11	19,43	
Walfish-Bertoni	-9,47	12,90	7,27	14,81	
ITU-R 1546	5,04	9,11	7,34	11,70	

Tabela 11: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o setor

Jacarepaguá

Setor Barra da Tijuca						
Madalas	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS		
Modelos	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)		
Regressão Linear	-	7,88	5,20	9,44		
Okumura-Hata	3,72	8,37	5,79	10,18		
Ibrahim-Parsons Empírico	-19,77	20,86	8,62	22,57		
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-11,89	13,50	7,25	15,33		
Walfish-Bertoni	-21,97	22,03	9,51	23,99		
ITU-R 1546	8,73	10,52	8,35	13,43		

Tabela 12: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o Setor Barra da Tijuca

Setor Recreio dos Bandeirantes						
Modelos	Erro Médio (dB)	Erro Absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro RMS (dB)		
Regressão Linear	-	10,41	6,35	12,19		
Okumura-Hata	3,56	10,78	7,22	12,98		
Ibrahim-Parsons Empírico	-12,25	15,25	11,55	19,13		
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-7,55	11,95	9,26	15,12		
Walfish-Bertoni	-4,73	11,19	8,04	13,78		
ITU-R 1546	6,81	11,70	8,07	14,21		

Tabela 13: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o Setor Recreio

dos Bandeirantes

Os resultados podem ser visualizados graficamente nas Figuras 40 a 43 que mostram a comparação entre os valores dos campos elétricos previstos pelos modelos e os medidos através de curvas de dispersão.

Figura 40: Curvas de dispersão para toda a região

Figura 41: Curvas de dispersão para o setor Jacarepaguá

Figura 42: Curvas de dispersão para o setor Barra da Tijuca

Figura 43: Curvas de dispersão para o setor Recreio dos Bandeirantes

Das Tabelas 10 a 13 e da observação dos gráficos de dispersão pode-se perceber que os modelos Okumura-Hata e ITU-R p.1546 foram os únicos que obtiveram erros médios com valores positivos. Isso indica que esses modelos são otimistas com relação aos valores medidos, apresentando, em média, campos elétricos estimados maiores que os medidos.

O modelo Okumura-Hata, seguido pelo modelo ITU-R p.1546, foram os que resultaram em menores erros médios absolutos, para ambas as regiões, demonstrando serem os mais adequados dentre os modelos testados para caracterizar o comportamento do sinal nessas regiões.

O modelo Ibrahim-Parsons Empírico apresentou maior erro médio em ambos os setores. Esse modelo foi ajustado empiricamente às medidas na cidade de Londres com características urbanas bem diferentes a dos ambientes das medidas desse trabalho. Isso explica o fato de certos modelos se adaptarem bem em uma determinada região e não apresentarem bom desempenho em outras.

Os valores altos de desvio padrão encontrado para os erros absolutos nas regressões lineares indicam a forte presença de obstruções para o sinal. Essas obstruções provocam diferenças nos níveis dos campos elétricos medidos em pontos equidistantes ao transmissor. Sendo assim, era de se esperar que os valores de erros absolutos e de desvios padrão para aos modelos fossem dessa ordem ou maiores.

Os parâmetros de simulação dos modelos Ibrahim-Parsons e Walfish-Bertoni, como já mencionado anteriormente, são de natureza subjetiva e intuitiva. Com a finalidade de investigar a influência desses parâmetros nos resultados finais, foram feitas várias simulações para um conjunto de parâmetros e verificado o comportamento do erro médio resultante. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados encontrados.

Erro médio Ibrahim-Parsons									
					Gera	l			
		Empírico	D			9	Semi-Empíri	со	
		L (%)				L (%)	
h (m)	40	50	60	70	h (m)	40	50	60	70
0	-15,08	-17,73	-20,38	-23,03	0	-8,89	-10,69	-12,49	-14,29
3	-14,64	-16,62	-19,27	-21,92	3	-7,87	-9,67	-11,47	-13,27
5	-13,23	-15,88	-18,53	-21,18	5	-7,19	-8,99	-10,79	-12,59
7	-12,49	-15,14	-17,79	-20,44	7	-6,51	-8,31	-10,11	-11,91
9	-11,74	-14,39	-17,04	-19,96	9	-5,83	-7,63	-9,43	-11,23
11	-11,00	-13,65	-16,30	-18,94	11	-5,15	-6,95	-8,75	-10,55
13	-10,26	-12,91	-15,56	-18,21	13	-4,47	-6,27	-8,07	-9,87
15	-9,95	-12,17	-14,81	-17,47	15	-3,52	-5,59	-7,39	-9,19
				Se	etor Jacar	epaguá			
		L (%)				L (%)	
h (m)	40	50	60	70	h (m)	40	50	60	70
-8	-21,64	-24,3	-26,95	-29,6	-8	-13,51	-15,31	-17,11	-18,91
-6	-20,9	-23,55	-26,2	-28,85	-6	-12,83	-14,63	-16,43	-19,23
-4	-20,16	-22,81	-25,46	-28,11	-4	-12,15	-13,95	-15,75	-17,55
-2	-19,42	-22,07	-24,72	-27,37	-2	-11,47	-13,27	-15,07	-16,87
0	-18,68	-21,33	-23,98	-26,63	0	-10,79	-12,59	-14,39	-16,19
3	-17,57	-20,22	-22,87	-25,52	3	-9,77	-11,57	-13,37	-15,17
5	-16,82	-19,47	-22,69	-24,77	5	-9,09	-10,89	-12,69	-14,49
7	-16,08	-18,73	-21,38	-24,03	7	-8,41	-10,21	-12,01	-13,81
9	-15,4	-17,99	-20,64	-23,29	9	-7,73	-9,53	-11,33	-13,13
11	-14,57	-17,25	-19,9	22,547	11	-7,05	-8,85	-10,65	-12,45
				Set	or Barra o	da Tijuca			
		L (%)		• • •		L(%)	
h (m)	40	50	60	70	h (m)	40	50	60	70
0	-16,54	-19,19	-21,84	-24,49	0	-9,87	-11,67	-13,47	-15,27
2	-15,80	-18,45	-21,10	-23,75	2	-9,19	-10,99	-12,79	-14,59
4	-15,06	-1/,/1	-20,36	-23,01	4	-8,51	-10,31	-12,11	-13,91
6	-14,31	-16,96	-19,61	-22,26	6	97,83	-9,63	-11,43	-13,23
8	-13,57	-16,22	-18,87	-21,52	8	-7,15	-8,95	-10,75	-12,55
10	-12,83	-15,48	-18,13	-20,78	10	-6,47	-8,27	-10,07	-11,87
	1	I	<u>()</u>	Setor Re	creio dos	Bandeiran	ites	0()	
	40	L (%)	70		10	L (%)	70
n (m)	40	50	60	/0	n (m)	40	50	60	/0
	-8,08	-10,73	-13,23	-16,03	0	-4,63	-6,43	-8,23	-10,03
2	-7,34	-9,99	-12,64	-15,29	2	-3,95	-5,/5	-7,55	-9,35
4	-0,60	-9,25	-11,90	-14,55	4	-3,27	-5,07	-0,87	-ö,b/
6	-5,86	-8,51 -7 7	10.40	10,07	0 C	-2,59	-4,39	-0,19	-7,99
8	-5,12	-/,//	10,42	-13,07	8	-1,91	-3,/1	-5,51	-7,31
10	-4,37	-7,02	-9,67	-12,32	10	-1,23	-3,03	-4,83	-6,63

Tabela 14: Erros médios para o modelo Ibrahim-Parsons em função dos seus parâmetros de simulação

	Erro médio Walfish-Bertoni					
	Gaeral					
	h(m)					
d(m)	20	25	30	35		
30	-14,30	-18,39	-21,52	-24,23		
40	-12,04	-16,24	-19,49	-22,29		
50	-10,26	-14,52	-17,84	-20,71		
60	-8,79	-13,09	-16,45	-19,36		
	J	lacarepagu	á			
		h(m)			
d(m)	15	20	25	30		
20	-12,72	-19,12	-23,02	-26,01		
30	-9,47	-16,08	-20,20	-23,37		
40	-7,46	-13,83	-18,06	-21,34		
	Ba	arra da Tiju	са	- 		
		h(m)			
d(m)	30	40	50	60		
60	-17,42	-23,10	-28,90	-		
70	-16,22	-21,97	-27,83	-		
80	-15,17	-20,96	-26,87	-		
	Recreio	dos Band	eirantes			
		h(m)			
d (m)	15	20	25	30		
20	-10,32	-16,68	-20,53	-		
30	-7,07	-13,64	-17,71	-		
40	-4,73	-11,39	-15,56	-		
50	-2,91	-9,60	-13,84	-		

Tabela 15: Erro médio para o modelo Walfish-Bertoni em função dos seus parâmetros de simulação.

Pode-se perceber pelos valores descritos nas Tabelas 15 e 16 que a alteração desses dados interferem no erro, porém não de modo tão relevante que acarretem grandes problemas na escolha inadequada desses. Nenhuma mudança nesses parâmetros fez com que esses modelos se tornassem tão melhores do que um limiar.

Com o uso de bom censo e um pouco de conhecimento da região e de suas características pode-se estipular esses valores e utilizá-los sabendo-se que os erros nas suas escolhas não afetarão de modo tão grave os resultados obtidos.

7.4. Modelo ponto-a-ponto

O modelo ponto-a-ponto é o Modelo Deygout-Assis [18]. Esse modelo permite estimar o valor do campo elétrico recebido por meio do cálculo das

perdas causadas por obstáculos presentes no enlace ponto-a-ponto entre transmissor e receptor.

Para o cálculo dessas perdas, no entanto, é preciso ter informações precisas do relevo e também da urbanização para que se possam reconhecer os obstáculos e, por conseqüência, estimar de forma mais precisa o nível médio de campo elétrico recebido.

O software utilizado para extrair as informações do relevo foi o ArcInfo 8.1.2. Esse não é um software próprio para telecomunicações, sendo na verdade um GIS (Geographical Information System). Dada sua flexibilidade é possível criar novas layers, fazer contas com elas, simulando modelos de propagação. Para realizar as contas dos modelos de propagação, calcular a atenuação e campo recebido (modelo deygout-assis) é usado um programa em C chamado SISCAT. Quem faz a interface entre o usuário o SISCAT e o ArcInfo é um programa chamado SEC. O SEC roda em cima do ArcInfo e é composto de macros do ArcInfo.

Dessa forma, a estrutura é a seguinte: O SEC lê do ArcInfo os dados do relevo da região para a qual se deseja estimar as coberturas e fornece os dados para o SISCAT. O SISCAT realiza o cálculo dos campos recebidos e retorna os dados pro SEC, que desenha a cobertura no ArcInfo.

A precisão com que se lê os dados e se realizam esses cálculos pode ser a que o usuário desejar. A utilizada nesse trabalho teve um padrão um pouco melhor do que a usada pela ANATEL em [25]. A amostragem do terreno foi de 250 em 250m.

As radiais são traçadas de 1 ° em 1 °. Para cada radial, começando por uma distância mínima, é aplicado o método de Deygout-Assis e calculado o nível médio do campo elétrico, em dBµV/m pra cada enlace ponto-a-ponto. Depois que o SISCAT realiza os cálculos o Arcinfo faz uma interpolação entre radiais e distâncias. Portanto para cada pixel são encontrados valores de campo elétrico diferentes.

Esses programas foram desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia da TV Globo. Os resultados obtidos por esse método foram cedidos para esse trabalho para estudos comparativos com as medidas de campo.

É evidente que esse procedimento leva em consideração os diagrama de irradiação vertical e horizontal da antena transmissora, calculando sempre a potência de transmissão de acordo com o ganho nas direções dos enlaces ponto-a-ponto.

20

10

0∟ 0,5

1

Os resultados encontrados estão plotados na Figura 44, onde (x) representam os valores de campo elétrico estimados pelo modelo Deygout-Assis e (•) os valores do campo médio medidos em cada ponto.

Figura 44: Comparação com o modelo Deygout-Assis

Distância [Km]

(b) Setor Jacarepaguá

5

10

15

Figura 44: Comparação com o modelo Deygout-Assis

Os valores obtidos para o erro médio, erro médio absoluto, desvio padrão absoluto e erro RMS com o modelo Deygout-Assis para todas as análises de setorização são apresentados nas Tabela 16.

Modelo Deygou-Assis						
Setores	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS		
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)		
Toda Região	14,6972	16,6469	10,8906	19,9928		
Jacarepaguá	12,0904	16,3026	9,7654	19,0037		
Barra da Tijuca	19,9048	19,9048	11,4084	22,9424		
Recreio dos Bandeirantes	17,9547	18,0408	12,3247	21,8488		

Tabela 16: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para ao modelo Deygout-Assis

Os resultados podem ser vistos graficamente na Figura 45, que mostra a comparação entre os valores dos campos elétricos previstos pelo modelo e os medidos através de curvas de dispersão.

Figura 45: Curvas de dispersão para o modelo Deygout-Assis

Pode-se perceber pelos valores de erro médio e pelas curvas de dispersão que os resultados encontrados pelo modelo Deygout-Assis são bastante otimistas com relação às medidas. Isso se deve, principalmente, ao fato dos cálculos das perdas pelo modelo terem sido realizados apenas por meio de informação do relevo do terreno. Isso ocorreu porque não foi possível obter informações de mapas digitalizados da região com informações sobre urbanização.

7.5. Variabilidade Temporal

A variação do nível de sinal recebida em uma recepção fixa está associada ao fenômeno do multipercurso, que provoca o chamado desvanecimento rápido. Quanto mais omini-direcional for a antena de recepção usada, mais ela é capaz de receber esses sinais oriundos de outros caminhos.

Dois são os principais agentes causadores dessa variação [26]. O primeiro deles é o deslocamento da unidade móvel, fato que não acontece com a recepção fixa. O segundo são as perturbações no ambiente, como por exemplo, tráfego de automóveis e movimentação de pessoas nas vizinhanças do receptor.

Para tentar descrever o comportamento estatístico dos sinais medidos foi desenvolvido um programa que gera o histograma da função cumulativa e da densidade de probabilidade das amostras (Anexo B).

Algumas tentativas de adequação entre as medidas e a distribuições de probabilidade Riciana [27] foram feitas. Sabe-se que essa distribuição tende a uma gaussiana quando a contribuição dos campos espalhados é muito baixa e o sinal tende a ser formado somente pela componente principal [28, 29].

Na maioria dos casos o ajuste da distribuição Riciana teórica e a medida não ocorreu. Isso sugere que o sinal não deve ser representado por uma distribuição Riciana.

Esse comportamento está associado à diretividade da antena de recepção usada, que tem 30° de abertura horizontal. A distribuição de Rice leva em consideração o fato do sinal espalhado poder chegar ao receptor em todas as direções, algo que não pode ser percebido com uma antena de alto ganho em uma direção.

Sendo assim, os resultado serão apresentados de forma qualitativa. Suas análises serão feitas somente nos três setores, tentando verificar as tendências de flutuação dos níveis de sinais recebidos nestes ambientes. A Figura 46 descreve o comportamento do nível médio do sinal com a distância em cada radial de cada setor. Os símbolos representam os valores de campo médio medidos em cada ponto. É nítido que o nível do sinal decresce com a distância, contudo esse comportamento pode ser diferente entre um ponto e outro. Isso se explica por algumas medidas terem sido feitas em regiões de sombras causadas por obstáculos, como construções ou morros. Na radial 20º do setor Jacarepaguá é onde pode ser encontrado os níveis mais baixos de sinal, causados por uma forte obstrução no quilômetro 4 devido a presença de um alto morro, que pode ser visto na Figura 25 do capítulo 6.

(a) Setor Jacarepaguá

(b) Setor Barra da Tijuca

(c) Setor Recreio dos Bandeirantes

Figura 46: Comportamento do nível médio

7. Análise dos Resultados

A Figura 47 apresenta os valores de desvio padrão para cada ponto de medida (símbolos), que é o primeiro parâmetro que descreve o comportamento estatístico do sinal recebido. Os valores encontrados são baixos, sugerindo poucas variações. A maioria dos resultados é menor do que 1 dB, com máximas variações da ordem de 2 dB. Os valores mais altos de desvio padrão geralmente estão associados à níveis mais baixos de sinal, pois, dessa forma, o sinal está mais sujeito ao ruído térmico e aos poucos sinais oriundos de multipercurso que podem ser percebidos pela antena receptora.

(c) Setor Recreio dos Bandeirantes

Figura 47: Comportamento do desvio padrão

Com o intuito de verificar esse comportamento com mais detalhe seria necessário apresentar todas as funções de probabilidade para todos os pontos medidos, o que não seria muito oportuno. Desse modo, são apresentadas as

funções cumulativas de distribuição de probabilidade para os pontos mais característicos de cada radial em cada setor. Foram escolhidos um máximo de 6 pontos por radial para caracterizar o comportamento estatístico do sinal nesses setores. As variações do campo recebido foram normalizadas em relação às suas médias, de modo que fosse possível compará-las graficamente, tendo em vista que os níveis de sinais estão muito deslocados uns dos outros. Por exemplo, um ponto medido no início da radial pode estar com seu valor médio até 30 dB acima do valor médio do último ponto nessa radial, impossibilitando a visualização das variações em torno das médias. Esses resultados podem ser vistos nas Figuras 48 a 51.

Figura 48: Funções cumulativas para o setor Jacarepaguá

Figura 49: Funções cumulativas para o setor Barra da Tijuca

Figura 50: Funções cumulativas para o setor Recreio dos Bandeirantes (Radiais 240° a 270°)

(c) Radial 200°

Figura 51: Funções cumulativas para o setor Recreio dos Bandeirantes (Radiais 200° a 230°)

Os gráficos ilustrados nas Figuras 48 a 51 apresentam, em geral, curvas mais suaves para pontos mais distantes. Nos setores de Jacarepaguá e Barra da Tijuca esse comportamento é ainda mais verdadeiro onde as curvas para os pontos próximos são muito crescentes, identificando pouca variação. Esse comportamento reforça a idéia de que para campos mais fortes a variação é muito pequena, crescendo à medida que os sinais vão ficando mais fracos.

No setor Recreio dos Bandeirantes, os gráficos da cumulativa da distribuição de probabilidade apresentam em algumas de suas radiais, comportamento diferente, onde se vê curvas mais suaves em pontos próximos. Isso se explica pela presença, já mencionada, de construções de grande porte nos primeiros 2 quilômetros, prejudicando bastante a recepção do sinal e aumentando sua variabilidade.

7.6. Variação com a Altura

Na expectativa de se poder determinar o efeito da variação do nível de sinal com a altura da antena de recepção foram realizadas as medidas variandose sua altura entre 10m e 1,8m.

Pela literatura [30] espera-se sempre para o comportamento do sinal recebido uma perda com a redução da altura. Os modelos de cobertura apresentados no capitulo 4 assinalam essa tendência. Suas formulações para o cálculo da perda de propagação, de modo geral, também são funções da altura da antena receptora. Além disso, pode-se perceber que seus valores encontrados são maiores à medida que se assumem valores menores para a antena de recepção. Sendo assim, os campos recebidos estimados pelos modelos são menores à medida que se reduz a altura da antena receptora.

O fator de correção para a altura da antena receptora para os modelos propostos no capitulo 4 são:

Okumura-Hata:

Para cidades grandes é dado por:

 $a(hr) = 3.2(\log(11.75 \times h_r))^2 - 4.97$

- Modelo Ibrahim-Parson Empírico: $a(hr) = 8\log(h_r)$ Semiempírico: $a(hr) = 20\log(h_r \times h_r)$
- O modelo Walfish-Bertoni representa a perda por difração em uma série de prédios por:

7. Análise dos Resultados

$$Lms(dB) = 5\log\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 - (h - hr)^2\right) - 9\log d + 20\log\left(\tan g^{-1}\left(\frac{2(h - hr)}{d}\right)\right)$$

Por essa expressão percebe-se que a variação do campo em função da altura da antena receptora é dependente dos parâmetros h (altura média dos prédios) e d (distância entre prédios). Para se determinar o ganho com a altura teórica para esse modelo serão usados os parâmetros utilizados na simulação da região como um todo: h= 25 metros e d=40 metros.

 O Modelo ITU-R p.1546 só se aplica à altura de antena de recepção igual a 10 m. Porém, pela recomendação ITU-R p.370 [31] pode-se encontrar um fator de correção de altura em relação à recepção a 10 metros, derivado dos resultados encontrado pala ITU-R p.1546 dada por:

$$G_{altura}(dB) = \frac{c}{6} \left[20 \log\left(\frac{h_2}{10}\right) \right]$$
(7.7)

onde h_2 é a altura da antena receptora entre 1,5 e 40 metros e c um fator em função da urbanização e igual a 6 para regiões suburbanas.

A perda por redução de altura Lr prática é calculada por:

$$L_r = E(10) - E(1,8) \tag{7.8}$$

Onde E(10) e E(1,8) são, respectivamente, os valores do campo médio medido a 10 e 1,8 metros de altura.

Os valores encontrados para o fator de correção para a altura da antena receptora para os modelos Okumura-hata, Ibtrahim-Parsons,, Walfish-Bertoni e ITU-R 370 são apresentados na Tabela 17.

Madalas	a(hr) (dB)				
Modelos	10 metros	1,8 metros	a(10) - a(1,8)		
Okumura hata	8,74	0,65	8,09		
Ibrahim-Parsons Empírico	8,00	2,04	5,96		
Ibrahim-Parsons Semi-empírico	56,90	42,01	14,89		
Walfish-Bertoni	4,27	0,87	3,39		
ITU-R 370	-	-	14,89		

Tabela 17: Fator de correção para a altura da antena receptora

Na prática foram observadas variações consideráveis nos valores medidos para as perdas por redução de altura. Todos os resultados encontrados na prática estão representados graficamente na Figura 52. Nota-se uma dispersão muito grande desses valores, dificultando bastante a caracterização desse fenômeno.

A Figura 53 apresenta a contagem do número de ocorrência da perda do campo elétrico com a altura.

Figura 52: Variação do campo medido com a altura

Figura 53: Contagem do número de ocorrência da perda do Campo Elétrico com a redução de altura

Do total de 127 medidas, 22 apresentaram variações negativas, sinalizando ganhos ao invés de perdas com a redução da altura. Esses pontos representam comportamentos anômalos, que podem ser explicados em alguns casos por obstruções por copas de árvores ou por composição de fases entre raios refletidos no solo, que nessa região é bastante plano, ou sobre a água da lagoa.

A perda média encontrada com esse total de pontos foi de 6,8 dB com desvio padrão de 7,5 dB. Esse valor médio é mais próximo ao proposto pelo modelo Okumura-Hata e muito abaixo ao proposto pelo modelo de Ibrahim-Parsons Semi-Empírico e ao recomendado pela Recomendação ITU-R p.370. Para os modelo de Walfish-Beroni e Ibrahim-Parsons esse valor é um pouco superior, quando usados os parâmetros de simulação já citados. Esse valor médio para a perda encontrada experimentalmente é maior que a esperada pelo modelo WalfishBertoni em cerca de 3 dB.

Uma segunda análise proposta para caracterizar a variação com a altura para a região de teste é verificar o valor médio destas perdas descartando os valores negativos, que representam comportamentos imprevistos da propagação.

De acordo com essa hipótese é apresentado o número de ocorrência dessas variações, na Figura 54.

Figura 54: Contagem do número de ocorrência da perda do Campo Elétrico com a redução de altura (considerando somente os valores positivos)

115

A perda média encontrada com esse subtotal de 105 pontos foi de 7,9 dB com desvio padrão de 4,5 dB. Esse valor se aproxima ainda mais da perda com a altura proposta pelo modelo Okumura-Hata, mas não a ponto de representar mudanças significativas. Entretanto, essa análise fornece resultados melhores, pois apresenta um valor de desvio padrão menor que o da análise anterior, dando um resultado mais próximo ao previsto pelo modelo Okumura-Hata.

Com os valores de campos medidos a 1,8 metro são apresentados os resultados similares aos analisados com a recepção a 10 metros. Esse estudo tende a verificar a adequação dos modelos Okumura-Hata, Walfish-Bertoni e Ibrahim-Parsons a essa nova situação de recepção. Os resultados são apresentados nas Tabelas 18 a 21.

Geral						
Madalaa	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS		
Modelos	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)		
Regressão Linear	-	9,61	6,84	11,80		
Okumura-Hata	0,25	10,28	6,73	12,29		
Ibrahim-Parsons Empírico	17,70	18,58	10,55	21,36		
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-19,33	19,73	11,23	22,70		
Walfish-Bertoni	-13,35	14,73	10,14	17,88		

Tabela 18: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para toda a região (recepção a 1,8 m de altura)

Setor Jacarepaguá							
Modelos	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS			
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)			
Regressão Linear	-	8,99	6,40	11,04			
Okumura-Hata	1,65	10,83	6,76	12,76			
Ibrahim-Parsons Empírico	-22,74	22,74	11,24	25,36			
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-21,96	-12,96	11,96	25,01			
Walfish-Bertoni	-8,82	11,69	9,21	14,88			

Tabela 19: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o setor

Jacarepaguá (recepção a 1,8 m de altura)

Setor Barra da Tijuca							
Modeles	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS			
Modelos	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)			
Regressão Linear	-	8,38	6,54	10,63			
Okumura-Hata	1,85	9,14	6,51	11,22			
Ibrahim-Parsons Empírico	-20,24	20,82	9,78	23,01			
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-20,88	21,09	10,28	23,47			
Walfish-Bertoni	-17,89	18,22	10,05	20,80			

Tabela 20: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o setor Barra da

Tijuca (recepção a 1,8 m de altura)

Setor Recreio dos Bandeirantes							
Modelos	Erro Médio	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Erro RMS			
modelos	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)			
Regressão Linear	-	10,26	5,80	11,79			
Okumura-Hata	-0,67	10,28	5,82	11,81			
Ibrahim-Parsons Empírico	-15,03	16,35	11,19	19,81			
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	-18,70	19,07	11,58	22,31			
Walfish-Bertoni	-9,15	12,30	8,81	15,11			

Tabela 21: Erro médio, erro absoluto, desvio padrão e erro RMS para o setor Recreio dos Bandeirantes (recepção a 1,8 m de altura)

Esses resultados indicam comportamentos similares para os modelos, continuando a ser o Okumura-Hata o de melhor previsão para as medidas. Os valores encontrados para os desvios padrões são menores, sugerindo maior conformidade entre os pontos e a regressão linear.

7.7. Cobertura

Para o estudo de viabilidade técnica de canais de TV Digital, a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL define alguns aspectos no documento Planejamento de Canais de TV Digital [25]. Um desses aspectos define a intensidade de campo a ser utilizada para a definição de contornos ou áreas de serviço.

Duas configurações típicas de recepção são consideradas para se definir a Intensidade de Campo mínima para a recepção.

O modelo de infra-estrutura de recepção com antena externa adotado para fins de planejamento de canais é o de uma instalação típica em um ponto localizado na borda da área de serviço, consistindo de antena externa a 10 metros do solo, cabos e receptores de TV Digital. A intensidade de campo mínima para recepção com antena externa é indicada em [25] onde são apontados vários fatores tais como, margem frente ao ruído produzido pelo homem e ganho da antena de recepção. O valor da mínima intensidade de campo para o pior caso de modulação (COFDM 3/4) é de 47,31 dBµV/m.

Para recepção com antena interna, assumiu-se uma condição de instalação típica, com a antena posicionada 1,5 metro acima do segundo piso de um prédio. Trata-se do pior caso, em se tratando da altura da antena de recepção em relação ao solo. A intensidade de campo mínima para recepção com antena externa é proposta em [25], considerando-se fatores como margem frente ao ruído produzido pelo homem, margem por perda por penetração em edificações e margem por redução de altura da antena de recepção. O valor da

mínima intensidade de campo para o pior caso de modulação (COFDM 3/4) é de 64,31 dBµV/m.

Sendo assim, os limiares para recepção fixa externa e interna considerados nesse trabalho são, respectivamente, 48 dBµV/m e 65 dBµV/m.

Os modelos de propagação adotados para a estimativa de área de cobertura do sinal desejado pelo estudo de planejamento de canais de Tv Digital da ANATEL foram:

- Modelo Ponto-Área ITU-R p.1546 com as curvas de propagação para 50% das localidades e 50% do tempo com base em dados de relevo digitalizado com resolução de 30 segundos (900 m);
- Modelo Ponto-a-Ponto descrito na Recomendação ITU-R P.526 [15] com obstáculos modelados como gume-de-faca, utilizando como base de dados de relevo digitalizado com resolução de 30 segundos (900 metros);
- Modelo Ponto-a-Ponto Deygout-Assis considerando-se a curvatura dos obstáculos principais, utilizando como base de dados de relevo digitalizados com resolução de 1 segundo (30 metros).

Para estimativa da cobertura da região de medidas são apresentados nesse trabalho os limiares de cobertura para recepção externa e interna utilizando-se os modelos Ponto-Área ITU-R p.1546 e Ponta-a-Ponto Deygout-Assis (Figura 55) de acordo com o estudo da ANATEL.

Outro Modelo proposto nesse estudo para estimar os limiares de cobertura é o Okumura-Hata. Esse modelo demonstrou ser o melhor dentre os testados para caracterizar a atenuação por percurso do sinal na região.

Alem desses modelos, foram estimados esses limiares de cobertura levando-se em consideração a regressão linear para os valores de atenuação medidos.

Os resultado são mostrados na Tabela 22.

	ITU-R 1546		Okumura-Hata				Regrassão Linear			
Radiais			Toda Região		Setorização		Toda Região		Setorização	
	65 dBuv/m	48 dBuV/m	65 dBuv/m	48 dBuV/m	65 dBuv/m	48 dBuV/m	65 dBuv/m	48 dBuV/m	65 dBuv/m	48 dBuV/m
0	4,63	12,36	3,26	10,47	-	-	2,89	8,96	-	-
1	3,84	9,91	3,24	10,42	-	-	2,88	8,92	-	-
2	3,10	7,61	3,20	10,29	3,18	10,21	2,84	8,81	3,60	8,44
3	4,56	12,31	3,14	10,09	3,12	10,02	2,79	8,65	3,56	8,32
4	4,82	13,19	3,11	9,99	3,09	9,92	2,76	8,56	3,53	8,26
5	4,81	13,11	3,13	10,06	3,11	9,98	2,78	8,62	3,55	8,30
6	4,84	13,08	3,21	10,30	3,19	10,23	2,85	8,82	3,61	8,45
7	5,09	13,81	3,25	10,44	3,83	12,71	2,88	8,94	3,02	9,38
8	5,33	14,53	3,25	10,44	3,83	12,71	2,88	8,94	3,02	9,38
9	5,37	14,77	3,19	10,23	3,75	12,44	2,83	8,76	2,96	9,19
10	4,84	13,37	3,04	9,75	3,57	11,85	2,70	8,36	2,83	8,78
11	4,52	12,72	2,80	8,99	3,29	10,90	2,49	7,73	2,61	8,11
12	5,05	13,87	3,12	10,02	3,68	12,19	2,77	8,59	2,91	9,01
20	2,09	6,82	1,31	4,20	1,45	4,75	1,19	3,70	0,76	3,93
21	2,27	7,32	1,41	4,54	1,57	5,14	1,29	3,99	0,85	4,38
22	2,83	8,83	1,74	5,60	1,94	6,37	1,58	4,89	1,14	5,89
23	3,48	10,46	2,13	6,83	2,37	7,80	1,91	5,92	1,51	7,78
24	4,13	12,02	2,47	7,95	2,77	9,10	2,21	6,86	1,87	9,62
25	4,33	12,11	2,80	8,99	3,14	10,33	2,49	7,73	2,22	11,45
26	4,62	12,67	3,04	9,75	3,41	11,22	2,70	8,36	2,49	12,84
27	4,81	13,04	3,19	10,23	3,58	11,78	2,83	8,76	2,66	13,73
28	4,88	13,17	3,25	10,44	-	-	2,88	8,93	-	-
29	4,69	12,56	3,25	10,44	-	-	2,88	8,94	-	-
30	4,65	12,62	3,14	10,08	-	-	2,79	8,63	-	-
31	3,51	9,00	3,13	10,06	-	-	2,78	8,62	-	-
32	4,70	12,80	3,11	9,99	-	-	2,76	8,56	-	-
33	4,70	12,75	3,14	10,09	-	-	2,79	8,65	-	-
34	4,56	12,22	3,20	10,28	-	-	2,84	8,80	-	-
35	4,89	13,21	3,24	10,42	-	-	2,88	8,92	-	-

Tabela 22: Limiares de cobertura especificados pelos modelos ITU-R p.1546, Okumura-Hata e pelas regressões lineares das medidas

A cobertura prevista pelo modelo Deygout-Assis está ilustrada na Figura

Figura 55: Cobertura prevista pelo modelo Deygout-Assis

Como a simulação computacional para o modelo Deygout-Assis foi feita sem dados de urbanização da região, os limiares de cobertura tendem a ser bastante otimistas, principalmente nos setores da Barra da Tijuca e do Recreio dos Bandeirantes, onde o relevo é muito plano. Esses resultados indicam cobertura de sinal com recepção interna para toda região, o que não condiz com a realidade das medidas.

As regiões com recepção abaixo de 48 dBµV/m estão associadas a presença de morros, onde o modelo prevê perdas consideráveis por obstrução.

Note que a cobertura prevista com recepção interna, tanto para os modelos Okumura-Hata quanto para o ITU-R p.1546, são mais severas com distâncias em torno de 3 e 4 km, respectivamente. Esses resultados refletem melhor o comportamento do sinal testado.