



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO RODRIGUES FIALHO

**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO SUPERFICIAL DE POTÊNCIA DE UMA REDE  
SEM FIO NA BANDA DE 5,8 GHz NA REGIÃO DOS CAMPOS DE PETRÓLEO DO  
CANTO DO AMARO**

MOSSORÓ – RN

2019

BRUNO RODRIGUES FIALHO

**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO SUPERFICIAL DE POTÊNCIA DE UMA REDE SEM FIO NA BANDA DE 5,8 GHz NA REGIÃO DOS CAMPOS DE PETRÓLEO DO CANTO DO AMARO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Dr. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA

Co-orientador: Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA

MOSSORÓ – RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R438a Rodrigues Fialho, Bruno. Avaliação da distribuição superficial de potência de uma rede sem fio na banda de 5,8 GHz na região dos campos de petróleo do Canto do Amaro / Bruno Rodrigues Fialho. - 2019.  
117 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.

Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

1. Radiopropagação. 2. Desvanecimento. 3. Interpolação espacial. 4. Modelo Longley-Rice. I. Dionísio de Andrade, Humberto, orient. II. Souza Queiroz Júnior, Idalmir de, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

BRUNO RODRIGUES FIALHO

**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO SUPERFICIAL DE POTÊNCIA DE UMA REDE  
SEM FIO NA BANDA DE 5,8 GHz NA REGIÃO DOS CAMPOS DE PETRÓLEO DO  
CANTO DO AMARO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Defendida em: 20/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Mossoró, 20 de fevereiro de 2019.

---

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (Presidente e orientador, UFERSA)

---

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (Co-orientador, UFERSA)

---

Prof. Dr. José Lucas da Silva Paiva (examinador interno, UFERSA)

---

Prof. Dr. Jonathan Paulo Pinheiro Pereira (examinador externo, IFRN)

---

Bruno Rodrigues Fialho (discente)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela fé, força e saúde proporcionada para alcançar todos os meus objetivos e vencer os obstáculos que surgem em minha vida.

Aos meus pais, que me ensinaram a viver, buscando sempre me orientar nesta jornada de vida, com muita dedicação, carinho e amor. Obrigado pelos ensinamentos para que eu me tornasse o homem que sou hoje.

À minha esposa Valdeiza Dantas, pelo amor, incentivo, carinho, compreensão e confiança no dia a dia.

A meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Humberto Dionísio de Andrade, ao meu co-orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior e aos demais docentes do PPGEE, pela dedicação, comprometimento, orientações e ensinamentos vivenciados na universidade, que contribuíram para a realização deste trabalho e com minha experiência acadêmica.

Aos meus colegas de trabalho pelo apoio prestado, companheirismo, atenção e compartilhamento de conhecimentos que engrandecem minha experiência profissional.

Por fim, a todos que participaram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

*“Podemos encontrar exemplos das maiores doutrinas da ciência em jogos e ginástica, em viajar por terra e por água, em tempestades do ar e do mar, e onde há matéria em movimento”.*

James Clerk Maxwell

## RESUMO

As redes de comunicações sem fio nas faixas de frequências livres de licença, em geral, têm intensificado as pesquisas da comunidade acadêmica sobre o comportamento de propagação dos sinais eletromagnéticos e os interesses da indústria em implementar estas bandas nas soluções e dispositivos de telecomunicações. A crescente demanda por novos serviços de radiopropagação em diversos tipos de cenários justifica a grande importância em difundir procedimentos para predição de cobertura. Nesse contexto, o presente trabalho realiza uma análise de desvanecimento dos sinais eletromagnéticos de uma rede sem fio na banda de 5,8 GHz em uma região de campos petrolíferos da Bacia Potiguar, do estado do Rio Grande do Norte, chamada Canto do Amaro. Sendo assim objetiva avaliar o comportamento da distribuição superficial de potência e identificar as zonas de sombra no ambiente de estudo. Foram realizadas medições em campo, que fornecem as variáveis necessárias para os métodos de interpolação espacial, em seguida, a partir de ferramentas estatísticas foram comparadas com os resultados dos cálculos do modelo Longley-Rice. De posse dos dados coletados procede-se com o mapeamento e testes por validação cruzada das matrizes de interpolação geradas, para verificação e avaliação da acurácia dos métodos determinísticos e geoestatísticos. Os resultados demonstraram que o método de estimação por suavização *spline* e o da krigagem com modelo de variograma esférico apresentaram os menores desvios do erro médio quadrático e que os coeficientes de determinação e da correlação de Pearson são maiores entre métodos com erros de estimação inferiores. Portanto, as ferramentas estatísticas e a análise exploratória dos dados possibilitam comparar os resultados simulados com medidos para avaliar a cobertura do sistema de rede sem fio analisado e fornecer insumos para tomada de decisão da gestão de projetos.

**Palavras-chave:** Radiopropagação. Desvanecimento. Interpolação espacial. Modelo Longley-Rice.

## ABSTRACT

Licensed free-range wireless communications networks have generally been intensified as research into the behavior of electromagnetic signal advertisements and the industry's interest in implementing these bands in telecommunications solutions and devices. The demand for new radiopropagation services is a factor of great importance in different procedures for the coverage prediction. In this context, the present work presents a fading analysis of the electromagnetic signals of a 5.8 GHz wireless network in a region of oil fields of the Bacia Potiguar, in the state of Rio Grande do Norte, called Canto do Amaro. Thus, the objective of this study is to evaluate the superficial and identifiable behavior as a shadow zone in the study environment. Field measurements were obtained, which were the necessary variables for the spatial interpolation methods, then from comparative tools compared with the Longley-Rice model measurement instruments. In order to obtain and evaluate the accuracy of the deterministic and geostatistical methods, the data sought by the mapping and cross - validation tests of the generated interpolation matrices were used. The results showed that the bending estimation method and the kriging method with scanning model is smaller than the average deviations of the mean error and that the coefficients of determination and correlation of Pearson are higher among the methods with the errors of the same. Therefore, statistical tools and an exploratory analysis of the data made it possible to compare results and measurements to evaluate wireless coverage and provide inputs for decision-making.

**Keywords:** Radiopropagation. Fading. Spatial interpolation. Longley-Rice Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Onda Transversal Eletromagnética (TEM).....	22
Figura 2 – Modelo da Reflexão.....	27
Figura 3 – Representação Gráfica do Método das Imagens.....	29
Figura 4 – Princípio da Difração de Huygens.....	30
Figura 5 – Geometria do Modelo de Difração.....	31
Figura 6 – Ganho de Difração em Função do Parâmetro de Fresnel-Kirchoff.....	32
Figura 7 – Desvanecimento em Pequena e Larga Escala.....	35
Figura 8 – Curvas para Determinação da Atenuação.....	40
Figura 9 – Orientação da rua com Relação ao Enlace no modelo Walfisch-Ikegami.....	44
Figura 10 – Cenário para Cálculo com o Modelo Walfisch-Ikegami.....	44
Figura 11 – Representação da Geometria do Enlace do Modelo Longley-Rice.....	47
Figura 12 – Processo de Interpolação: amostras (cruzes) e estimativas (círculos).....	50
Figura 13 – Direções das Coordenadas Geográficas.....	52
Figura 14 – Formatos de Distribuição de Frequências.....	55
Figura 15 – Classificação do Grau de Curtose das Curvas de Distribuição.....	56
Figura 16 – Representação Gráfica do Histograma.....	57
Figura 17 – Representação do Diagrama de Caixa.....	58
Figura 18 – Análise de Assimetria com o uso de <i>boxplot</i> .....	58
Figura 19 – Funções de Probabilidade Acumulada.....	60
Figura 20 – Distribuição Normal.....	61
Figura 21 – Tipos de Pontos em uma Região de Análise.....	62
Figura 22 – Método da Triangulação Linear.....	63
Figura 23 – Esquema e Composição dos Semivariogramas Experimental e Teórico.....	67
Figura 24 – Exemplos de Modelos Teóricos para Ajuste de Semivariograma.....	68
Figura 25 – Fluxograma do Processo Metodológico Utilizado.....	71
Figura 26 – Mapa de Localização da Região de Análise.....	72
Figura 27 – Fotos dos Componentes da Estação base ou concentradora.....	73
Figura 28 – Foto da Sonda Terrestre de Manutenção de Poços.....	73
Figura 29 – Descrição do Sistema de Comunicação sem fio.....	74
Figura 30 – Parâmetros Associados aos Sistemas de Redes sem fio.....	75
Figura 31 – Reticulado de Amostragem Teórico.....	76
Figura 32 – Foto da Unidade Móvel de Recepção.....	77
Figura 33 – Materiais Utilizados para as Medições de Campo.....	78

Figura 34 – Ferramenta <i>Grid Data</i> . .....	79
Figura 35 – Procedimento de Ajuste do Modelo de Semivariograma.....	80
Figura 36 – Matriz de Interpolação com Semivariograma Gaussiano. ....	81
Figura 37 – Método de Coleta dos Dados no <i>Radio Mobile</i> <sup>®</sup> . ....	83
Figura 38 – Histograma com Sobreposição da fdp das Medições em Campo. ....	86
Figura 39 - Histograma com Sobreposição da fdp do Modelo Longley-Rice.....	87
Figura 40 – Diagramas de Caixa dos Dados Coletados.....	88
Figura 41 – Representação Gráfica da Correlação de Pearson.....	88
Figura 42 – Mapeamento com uso da Média Móvel. ....	89
Figura 43 – Mapeamento com uso da Estimativa por Vizinhança. ....	90
Figura 44 – Mapeamento com uso da Triangulação Linear. ....	91
Figura 45 – Mapeamento com uso do Inverso da Distância Ponderada.....	91
Figura 46 – Mapeamento com uso da Estimação por Suavização de Superfícies.....	92
Figura 47 – Correlação Linear entre Estimativas por Vizinhança.....	94
Figura 48 – Correlação Linear entre Método <i>Spline</i> e Triangulação Linear. ....	94
Figura 49 – Modelos de Variogramas Ajustados. ....	96
Figura 50 – Comparação entre Resíduos dos Modelos de Variograma. ....	97
Figura 51 – Comparação entre Matrizes de Interpolação da Krigagem. ....	98
Figura 52 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Esférico. ....	99
Figura 53 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Exponencial.....	99
Figura 54 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Gaussiano. ....	100
Figura 55 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Linear. ....	100
Figura 56 – Mapeamento com Parâmetros de Recepção da Medição em Campo. ....	101
Figura 57 – Mapeamento com Parâmetros de Recepção das Sondas.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Faixas de Frequências do Espectro Eletromagnético. ....	25
Tabela 2 – Descrição dos Parâmetros da Equação do Modelo da Reflexão.....	27
Tabela 3 – Descrição das Variáveis da Equação do Modelo Hata. ....	41
Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros da Equação do Modelo COST-231. ....	42
Tabela 5 – Descrição das Regiões de Atenuação do Modelo Longley-Rice.....	46
Tabela 6 – Variáveis do Cálculo da $W_{ref}$ para o Modelo Longley-Rice. ....	47
Tabela 7 – Valores Típicos de $\Delta h$ .....	48
Tabela 8 – Refratividade de Superfície em Relação ao Clima. ....	49
Tabela 9 – Parâmetros do Modelo Longley-Rice. ....	49
Tabela 10 – Representação dos Sistemas de Coordenadas Geográficas. ....	52
Tabela 11 – Vantagens e Desvantagens do método IDP. ....	64
Tabela 12 – Vantagens e Desvantagens da técnica <i>spline</i> .....	65
Tabela 13 – Parâmetros do Semivariograma Teórico. ....	67
Tabela 14 – Métodos Estatísticos para Validação Cruzada dos Dados. ....	70
Tabela 15 – Descrição dos Componentes do Sistema de Comunicação sem fio. ....	75
Tabela 16 – Dados de Entrada da Região em Análise.....	82
Tabela 17 – Dados de Entrada dos Sistemas de Transmissão e Medição. ....	83
Tabela 18 – Parâmetros Auxiliares das Medições em Campo. ....	85
Tabela 19 – Parâmetros de Construção do Histograma das Medições em Campo. ....	85
Tabela 20 – Parâmetros do Histograma e fdp do Modelo Longley-Rice. ....	86
Tabela 21 – Medidas Separatrizes. ....	87
Tabela 22 – Comparação entre Métodos Determinísticos Locais. ....	93
Tabela 23 – Comparação entre Modelos de Variograma. ....	95
Tabela 24 – Parâmetros dos Variogramas Ajustados. ....	97
Tabela 25 – Medidas Separatrizes para Análise dos Resíduos.....	97

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

$\vec{D}$  – Densidade de fluxo elétrico

$E_0$  – Campo elétrico no espaço livre

$E_s$  – Campo elétrico na forma fasorial

$E_{x0}$  – Campo elétrico da coordenada x no espaço livre

$h_r$  – Altura do receptor

$H_s$  – Campo magnético na forma fasorial

$h_t$  – Altura do transmissor

$h_c$  – Altura crítica de protuberâncias devido ao fenômeno da dispersão

$\vec{P}$  – Vetor de Poynting

$P_{LOS}(dB)$  – Perda de propagação pelo modelo da reflexão no solo em dB

$P_{z,méd}$  – Potência média radiada na coordenada z

$\bar{X}$  – Média aritmética

$I_0$  – Função de Bessel do primeiro tipo e ordem zero.

$k_0$  – Número de onda no espaço livre

A – Alcance

$A_e$  – Área efetiva de uma antena

AS – Coeficiente de assimetria de Pearson

C – Contribuição C

c – Velocidade da luz no espaço livre

$C_0$  – Efeito pepita

CV – Coeficiente de variação

d – Distância

D – Maior dimensão linear

$d_{ff}$  – Distância de Fraunhofer

E – Campo elétrico

$E_g$  – Campo elétrico refletido no solo

$E_i$  – Campo elétrico incidente no solo

$E_{LOS}$  – Campo elétrico da linha de visada direta

$E_r$  – Campo elétrico total refletido no solo

$E_t$  – Campo Elétrico transmitido

$E_{TOT}$  – Campo Elétrico total no receptor  
 $E_x$  – Campo elétrico na coordenada  $x$   
 $E_{xs}$  – Campo elétrico na forma fasorial na coordenada  $x$   
 $f$  – Frequência  
 $F(v)$  – Integral de Fresnel complexa  
 $G_d(\text{dB})$  – Ganho de difração de um gume de faca  
 $G_M$  – Ganho máximo de uma antena  
 $G_R$  – Ganho máximo de uma antena receptora  
 $G_T$  – Ganho máximo de uma antena transmissora  
 $H$  – Campo magnético  
 $h$  - Lag  
 $H_c(P)$  – Altura corrigida de um objeto  $P$  devido ao fenômeno da refração  
 $H_y$  – Campo magnético na coordenada  $y$   
 $H_{ys}$  – Campo magnético na forma fasorial na coordenada  $y$   
 $J$  – Densidade de corrente  
 $K$  – Coeficiente troposférico de refração  
 $k$  – Coeficiente de curvatura  
 $L$  – Perda de propagação de Friis  
 $L_{dB}$  – Perda de propagação de Friis em dB  
 $L_{FSL\text{ dB}}$  – Perda de propagação de Friis no espaço livre em dB  
 $M$  – Massa da Terra  
 $m$  – Massa de um corpo genérico  
 $M_d$  – Mediana  
 $M_o$  – Moda  
 $P$  – Potência  
 $P_R$  – Potência recebida  
 $P_T$  – Potência transmitida  
 $S$  – Densidade de potência média  
 $s$  – Desvio padrão  
 $T$  – Período de uma onda  
 $t$  – Tempo  
 $v$  – Parâmetro de difração de Fresnel  
 $\text{Var}$  – Variância  
 $Z^*$  – Valor estimado

## ***Letras Gregas***

$\eta_0$  – Impedância intrínseca do espaço livre

$\epsilon_0$  – Permissividade elétrica do vácuo

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética do vácuo

$\Gamma_{\perp}$  – Coeficiente de reflexão para refletor perfeito

$\sigma_h$  – Desvio padrão da altura da superfície sobre a altura média da superfície

$\Delta$  – Variação ou diferença entre parâmetros

$\alpha$  – Constante de atenuação

$\beta$  – Constante de fase da onda

$\gamma(h)$  – Semivariância

$\eta$  – Impedância intrínseca

$\theta$  – Constante de fase de uma onda genérica

$\theta_i$  – Ângulo de incidência no solo

$\theta_o$  – Ângulo de reflexão no solo

$\lambda$  – Comprimento de onda

$\lambda_i$  – Peso de interpolação na posição  $i$

$\mu$  – Média

$\rho_s$  – Fator de dispersão

$\sigma$  – Desvio padrão

$\phi$  – Diferença de Fase numa onda

$\omega$  – Frequência angular

$\Gamma$  – Coeficiente de reflexão

$\gamma$  – Constante de propagação

## ***Siglas***

ANP – Agência Nacional do Petróleo

*BLUE* – *Best Linear Unbiased Estimate*

*COST* – *Cooperation in the Field of Scientific and Technical*

*EURO-COST* – *European Cooperative for Scientific and Technical*

FDP – Função Densidade de Probabilidade

GMS – Graus, Minutos e Segundos

*GPS – Global Positioning System*

*IDP – Inverso da Distância Ponderada*

*IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers*

*LAN – Local Area Network*

*LOS – Line of Sight*

*MAE – Mean Absolute Error*

*NLOS – No Line of Sight*

*PoE – Power Over Ethernet*

*RCS – Radar Cross Section*

*RMSE – Root Mean Square Error*

*RSSI – Received Signal Strength Indicator*

*TEM – Transversal Eletromagnética*

*UTM – Universal Transversa de Mercator*

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	ONDAS ELETROMAGNÉTICAS .....	20
2.1.1	<b>Teorema de Poynting .....</b>	<b>22</b>
2.1.2	<b>Faixas de Frequências do Espectro Eletromagnético.....</b>	<b>25</b>
2.2	MECANISMOS DA PROPAGAÇÃO .....	26
2.2.1	<b>Reflexão .....</b>	<b>26</b>
2.2.2	<b>Difração .....</b>	<b>30</b>
2.2.3	<b>Dispersão .....</b>	<b>33</b>
2.3	MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	34
2.3.1	<b>Propagação no Espaço Livre .....</b>	<b>37</b>
2.3.2	<b>Okumura .....</b>	<b>39</b>
2.3.3	<b>Hata.....</b>	<b>40</b>
2.3.4	<b>COST 231 .....</b>	<b>42</b>
2.3.5	<b>Walfisch-Ikegami.....</b>	<b>42</b>
2.3.6	<b>Longley-Rice .....</b>	<b>45</b>
2.4	GEOESTATÍSTICA APLICADA.....	50
2.4.1	<b>Sistemas de Coordenadas Geográficas .....</b>	<b>51</b>
2.4.2	<b>Estatística Descritiva Clássica .....</b>	<b>52</b>
2.4.2.1	Medidas Descritivas .....	53
2.4.2.2	Representação Gráfica de Dados.....	57
2.4.3	<b>Distribuição de Probabilidade.....</b>	<b>59</b>
2.4.3.1	Função de Probabilidade .....	59
2.4.3.2	Distribuição Normal Padrão.....	61

<b>2.4.4</b>	<b>Interpolação Espacial.....</b>	<b>62</b>
2.4.4.1	Modelos Determinísticos Locais.....	63
<b>2.4.5</b>	<b>Modelagem Geoestatística .....</b>	<b>65</b>
2.4.5.1	Semivariograma .....	66
2.4.5.2	Krigagem Ordinária.....	69
<b>2.4.6</b>	<b>Validação Cruzada .....</b>	<b>69</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>71</b>
3.1	MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL .....	79
3.2	MÉTODO DE CÁLCULO DO MODELO LONGLEY-RICE .....	82
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>84</b>
4.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS .....	84
4.1.1	Análise da Distribuição de Frequências e Probabilidade .....	84
4.1.2	Análise de Dispersão e Correlação.....	87
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS .....	89
4.2.1	Mapas de Contorno Superficial e Vetorial.....	89
4.2.2	Análise Comparativa por Validação Cruzada.....	93
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS .....	95
4.3.1	Análise Estrutural de Correlação Espacial.....	95
4.3.2	Mapas de Contorno Superficial e Vetorial.....	99
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO LONGLEY-RICE .....	101
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – TABULAÇÃO DOS DADOS COLETADOS .....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS DA FDP: SITE SURVEY .....</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS DA FDP: LONGLEY-RICE.....</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações sem fio foram desenvolvidos a partir de estudos, técnicas e modelos fundamentados em fenômenos físicos da óptica geométrica, alguns deles incluem tratamentos estatísticos e empíricos para prever o comportamento de desvanecimento do sinal eletromagnético em ambientes específicos (RAPPAPORT, 2009). Por consequência, as tecnologias empregadas nesses sistemas proporcionam uma crescente otimização na qualidade dos serviços, em virtude do aumento das pesquisas na área da engenharia de rádio.

Estas pesquisas objetivam tratar oportunidades de melhorias em elementos de radiopropagação existentes nos padrões de rede sem fio como, por exemplo, as encontradas na arquitetura IEEE 802.15.4, responsável por prover conectividade em soluções corporativas e industriais (DAEHYUN; JINGUE; YOUNGLOK, 2016). Dessa forma o cálculo de radioenlace parte da premissa, de que a predição de cobertura dos sistemas de rádio deve considerar os mecanismos e parâmetros da teoria eletromagnética, dado que os modelos de propagação apoiam a tomada de decisão na análise de sistemas de telecomunicações (SEYBOLD, 2005).

Comumente utilizado em projetos, os modelos de propagação representam uma forma de cálculo de radioenlace de vasta aplicação, pois implementam características e parâmetros para determinação do nível de sinal recebido de equipamentos de transmissão. Aliado a isto, esses modelos foram construídos em conjunto com medições de campo para ajustes de desvios entre valores medidos e calculados, portanto estes métodos são responsáveis pelo dimensionamento e suporte para análises da área de cobertura de sistemas de comunicações sem fio (CHIEN, 2002).

Em paralelo, os métodos de interpolação espacial objetivam demonstrar o comportamento da distribuição superficial de uma certa variável aleatória, considerando as distâncias entre valores de pontos amostrados e estimados dentro de uma região, na qual normalmente são utilizadas as coordenadas geográficas destes pontos para a realização dos cálculos (SANTANA et al., 2017).

Os métodos de interpolação espacial são classificados em: determinísticos ou geoestatísticos. Os métodos determinísticos realizam a interpolação por meio da ponderação e tratamento estatístico, a partir de medições da variável em análise e da distância entre os pontos. São métodos numéricos mais simples em relação aos métodos geoestatísticos, que examinam a teoria das variáveis regionalizadas e tratam a correlação espacial dos dados na determinação de valores estimados (MATHERON, 1962 apud REICHARDT, TIMM, 2016).

Portanto, o presente trabalho compreende uma análise para avaliar a tendência de desvanecimento da potência das ondas eletromagnéticas radiadas pelo sistema em estudo, com o uso de técnicas de previsão de cobertura. Neste sistema, frequentemente estações móveis apresentam falhas de comunicações de dados e voz, o que podem comprometer a operação dos poços de produção de petróleo.

Para a realização do projeto será realizada uma fundamentação teórica, abordada no capítulo 2, sobre conceitos, mecanismos e modelos de propagação das ondas eletromagnéticas, assim como os princípios dos sistemas de comunicação sem fio baseados no protocolo de rede IEEE 802.11 e complementando os conteúdos uma apresentação da teoria da geoestatística aplicada.

Após a revisão teórica, serão apresentados no capítulo 3, os materiais e métodos de desenvolvimento do trabalho. Posteriormente, no capítulo 4, os resultados da metodologia empregada, e por fim, no capítulo 5 as considerações finais de todo procedimento empregado.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo do comportamento da distribuição superficial de potência na banda de frequência de 5,8 GHz em um sistema de rede sem fio instalado em uma região de campos petrolíferos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A seguir são apresentados os objetivos específicos para cumprir o objetivo geral:

- Analisar sistemas, ambientes e processos da região analisada;
- Realizar medições em campo e avaliar os dados com o uso de métodos de interpolação espacial;
- Simular a área de cobertura do sistema de rede sem fio com os cálculos do modelo Longley-Rice e avaliar os resultados com ferramentas estatísticas;
- Comparar os resultados simulados e medidos em campo e identificar as zonas de sombra do mapa geográfico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A teoria fundamental de propagação das ondas planas representa uma das aplicações mais simples das equações de Maxwell, contudo é por meio dela que a energia se propaga. As soluções das equações de Maxwell abrangem as condições de espaço livre, os dielétricos perfeitos ou com perdas e os materiais bons condutores (SADIKU, 2004).

Considerando um meio livre de cargas e sem perdas, para modelagem do comportamento da propagação das ondas, caso ideal, em que a solução se torna mais simples, as equações de Maxwell são escritas em termos de  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  somente como (POZAR, 1998):

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4)$$

As equações (1) e (2) apresentam uma interdependência, a partir da interpretação de (1) verifica-se que se o campo elétrico  $\vec{E}$  variar com o tempo em determinado ponto, o campo magnético  $\vec{H}$  tem rotacional neste ponto, e forma-se um anel fechado envolvendo a variação do campo elétrico. Da mesma forma enquanto  $\vec{E}$  varia com o tempo, então  $\vec{H}$  também irá variar com o tempo. A equação (2) estabelece que a variação de  $\vec{H}$  produz um campo elétrico que forma anéis fechados em torno das linhas de campo  $\vec{H}$  (BUCK; HAYT Jr., 2003).

Tomando a componente do campo elétrico  $\vec{E}_x$ , a expressão é uma função dada por:

$$\vec{E}_x = E(x, y, z) \cos(\omega t + \theta) \quad (5)$$

Derivando (5) com relação ao tempo é obtido:

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [E(x, y, z) \cos(\omega t + \theta)] = -\omega E(x, y, z) \text{sen}(\omega t + \theta) = \text{Re} [j\omega E_x e^{j\omega t}] \quad (6)$$

Na equação (6)  $\text{Re}$  significa que se considera apenas a parte real da expressão e tanto  $E_{xs}$  como  $H_{ys}$  são grandezas complexas. Aplicando esta notação às equações (1) e (2) são obtidas as relações correspondentes em termos de vetores-fasores (POZAR, 1998):

$$\nabla \times \vec{H}_s = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = j\omega\epsilon_0 \vec{E}_s \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{E}_s = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -j\omega\mu_0 \vec{H}_s \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}_s = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}_s = 0 \quad (10)$$

De posse destes resultados, a equação da onda em regime permanente é facilmente obtida por meio da aplicação do método a seguir, considerando coordenadas retangulares (BUCK; HAYT Jr., 2003):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}_s = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}_s) - \nabla^2 \vec{E}_s = -j\omega\mu_0 \nabla \times \vec{H}_s = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \vec{E}_s = -\nabla^2 \vec{E}_s \quad (11)$$

Outra forma de escrever a equação da onda é como função do termo  $k_0$ , chamado número de onda, definido como (POZAR, 1998):

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (12)$$

$$\nabla^2 \vec{E}_s = -k_0^2 \vec{E}_s \quad (13)$$

A equação (13) é conhecida como a equação vetorial de Helmholtz. O termo  $\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , contido em  $k_0$ , tem o valor aproximado de  $1/(3 \times 10^8)$  s/m, que é o inverso de  $c$ , a velocidade da luz no espaço livre (SADIKU, 2004):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,998 \times 10^8 \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (14)$$

Então,  $k_0$  pode ser reescrito como  $k_0 = \omega/c$ , desta forma, para um período da onda,  $k_0 \lambda = 2\pi$ , resulta em (COLLIN, 1992):

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_0} = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (15)$$

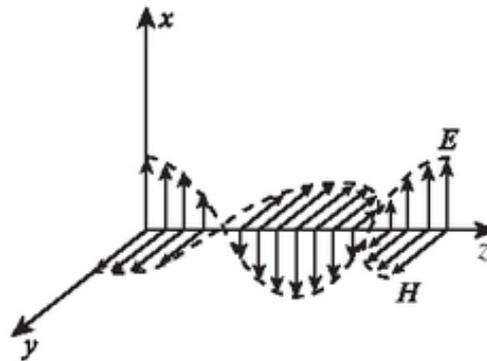
A razão entre o campo  $E_x$  e o campo  $H_y$  é proporcional à razão entre a permeabilidade e a permissividade, denominada impedância intrínseca (NOTAROS, 2012):

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \eta_0 \quad (16)$$

A impedância intrínseca do espaço livre tem dimensões em ohms e tem o valor igual a  $377$  ou  $120\pi \Omega$ . Por causa deste valor uniforme ao longo de qualquer plano, sendo  $z$  constante, esta onda é chamada de onda plana uniforme (NOTAROS, 2012).

Os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares à direção de propagação ou ambos pertencem a um plano transversal à direção de propagação, por isso é dita como uma onda eletromagnética transversal ou uma onda TEM (POZAR, 1998). A Figura 1 mostra o modo pelo qual os campos elétricos e magnéticos variam no espaço na onda TEM:

Figura 1 – Onda Transversal Eletromagnética (TEM).



Fonte: Quevedo e Lodi (2010).

### 2.1.1 Teorema de Poynting

O teorema de Poynting foi desenvolvido em 1884 pelo físico inglês John H. Poynting, este postulado é necessário para calcular a potência de uma onda plana uniforme. Este teorema se inicia com a equação de Maxwell a seguir que exprime a relação entre o rotacional do campo magnético  $H$  e a densidade de corrente superficial com a variação da densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  (POZAR, 1998; REITZ et al., 1980):

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (17)$$

Realizando o produto escalar de (17) com  $E$ , em ambos os lados da equação:

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (18)$$

e fazendo o uso da identidade vetorial:

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} + \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} \quad (19)$$

Encontra-se:

$$\vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) \quad (20)$$

Logo:

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \epsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (21)$$

Porém:

$$\epsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\epsilon}{2} \frac{\partial \vec{E}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} \right) \quad (22)$$

e,

$$\mu \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) \quad (23)$$

Assim,

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) \quad (24)$$

Em seguida integrando em um volume,

$$-\int_{vol} \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) dv = \int_{vol} \vec{J} \cdot \vec{E} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_{vol} \left( \frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) dv \quad (25)$$

e aplicando o teorema da divergência é obtido:

$$-\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \int_{vol} \vec{J} \cdot \vec{E} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_{vol} \left( \frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) dv \quad (26)$$

Considerando que dentro do volume não há fontes, então a primeira integral do lado direito é a potência ôhmica total (instantânea) dissipada, caso haja fonte dentro do volume, então o resultado da integração através do volume da fonte será positivo se a potência estiver sendo entregue para a fonte, mas será negativa se a potência estiver sendo entregue pela fonte (BUCK; HAYT Jr., 2003).

A soma das expressões do lado direito consiste da potência total que flui para dentro do volume de integração, desta forma o lado esquerdo é a potência total que flui para fora do volume de integração dada pela equação (LODI; QUEVEDO, 2010):

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad (27)$$

Em que a integral (27) é calculada sobre a superfície fechada que envolve o volume. O produto vetorial  $\vec{E} \times \vec{H}$  é chamado vetor de Poynting  $\vec{P}$ , que define a densidade de potência instantânea, medida em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ), de acordo com a expressão (SADIKU, 2004):

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (28)$$

Sendo assim, a integração do vetor de Poynting sobre uma superfície fechada fornece a potência total que atravessa a superfície para fora da mesma e a direção do vetor  $\vec{P}$  indica a direção do fluxo de potência instantânea em determinado ponto, que se encontra na mesma direção de propagação  $+z$  associada às componentes de campo  $\vec{E}_x$  e  $\vec{H}_y$ . Desta forma a relação entre os campos elétrico  $\vec{E}_x$  e magnético  $\vec{H}_y$  com a densidade de potência radiada na direção  $z$  é expressa por (REITZ et al., 1980):

$$E_x \hat{a}_x \times H_y \hat{a}_y = P_z \hat{a}_z \quad (29)$$

Para um meio sem perdas, os campos  $E_x$  e  $H_y$  são dados por:

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - \beta z) \quad (30)$$

$$H_y = \frac{E_{x0}}{\eta} \cos(\omega t - \beta z) \quad (31)$$

Logo,

$$P_z = \frac{E_{x0}^2}{\eta} \cos^2(\omega t - \beta z) \quad (32)$$

Para encontrar a densidade de potência média no tempo a equação (32) é integrada ao longo de um ciclo completo e dividida pelo período  $T = 1/f$ ,

$$\begin{aligned} P_{z,méd} &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{E_{x0}^2}{\eta} \cos^2(\omega t - \beta z) dt = \frac{1}{2T} \frac{E_{x0}^2}{\eta} \int_0^T [1 + \cos(2\omega t - 2\beta z)] dt = \\ &= \frac{1}{2T} \frac{E_{x0}^2}{\eta} \left[ t + \frac{1}{2\omega} \text{sen}(2\omega t - 2\beta z) \right]_0^T \end{aligned} \quad (33)$$

Logo, a potência média que flui através de qualquer área  $S$  normal ao eixo  $z$  é:

$$P_{z,méd} = \frac{1}{2} \frac{E_{x0}^2}{\eta} W / m^2 \quad (34)$$

## 2.1.2 Faixas de Frequências do Espectro Eletromagnético

A transmissão de informações entre dispositivos eletrônicos em sistemas de telecomunicações pode ser realizada por um meio guiado (cabos e fibras ópticas) ou não-guiado (ondas de rádio). Na transmissão por ondas de rádio, o sinal é modulado, amplificado e transmitido por uma antena (HAYKIN, 2001).

Esses sistemas operam em determinadas faixas de frequências regulamentadas ou livres de licença para fornecer serviços e aplicações para usuários. Assim sendo existem diversas faixas de frequências no espectro eletromagnético utilizadas nas telecomunicações conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais Faixas de Frequências do Espectro Eletromagnético.

<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Significado</b>	<b>Aplicações e comprimento de onda</b>	<b>Comprimento de onda</b>
<b>ELF 30 - 300 Hz</b>	Frequências extremamente baixas	Macroondas para comunicações submarinas.	
<b>VF 300 - 3 kHz</b>	Frequências de voz	Voz, Telefonia analógica.	
<b>VLF 3 - 30 kHz</b>	Frequências muito baixas	Navegação, Telegrafia (Miriamétricas).	$10^8 - 10^4$ m
<b>LF 30 - 300 kHz</b>	Frequências baixas	Comunicação por linhas de potência (Quilométricas).	$10^4 - 10^3$ m
<b>MF 300k - 3 MHz</b>	Frequências médias	Radiodifusão AM, comunicação móvel, radioamador (Hectométricas).	$10^3 - 10^2$ m
<b>HF 3 - 30 MHz</b>	Frequências altas	Comercial, militar, Telefone rádiomóvel e faixa-cidadão (Decimétricas).	$10^2 - 10^1$ m
<b>VHF 30 - 300 MHz</b>	Frequências muito altas	TV e FM, Controle de tráfego aéreo (Métricas).	$10 - 1$ m
<b>UHF 300 - 3 GHz</b>	Frequências ultra altas	TV, Comunicação militar via satélite, Radar de aeroporto (Decimétricas).	$100 - 10$ cm
<b>SHF 3 - 30 GHz</b>	Frequências super altas	Satélites, Comunicações espaciais, Microondas (Centimétricas).	$10 - 1$ cm
<b>EHF 30 - 300 GHz</b>	Frequências extremamente altas	Radioastronomia, Radar de pouso, Rádio-altímetro (Milimétricas).	$10 - 1$ mm
<b>OF 300-300 THz</b>	Frequências ópticas	Comunicações ópticas: Infravermelho e Luz visível (Decamilimétricas).	$\mu$ m

Fonte: Adaptado de Tanenbaum (2003).

## 2.2 MECANISMOS DA PROPAGAÇÃO

Este capítulo aborda os principais conceitos existentes nos mecanismos de propagação na região da troposfera. Estes mecanismos compreendem os fenômenos da reflexão, difração e dispersão, visto que os modelos de previsão de cobertura analisados neste trabalho se aplicam a sistemas de radioenlace com alturas limitadas a essa faixa da atmosfera.

Os mecanismos da propagação eletromagnética fornecem o embasamento teórico para entendimento dos modelos de perda na propagação em larga escala que usam a combinação de cálculos baseados em princípios da ótica geométrica.

### 2.2.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética em propagação colide com um objeto que possui dimensões muito maiores do que o comprimento de onda do sinal transmitido. Estes fenômenos ocorrem principalmente quando a onda eletromagnética encontra superfícies da terra, prédios e paredes, ou seja, obstáculos em geral (RIBEIRO, 2004).

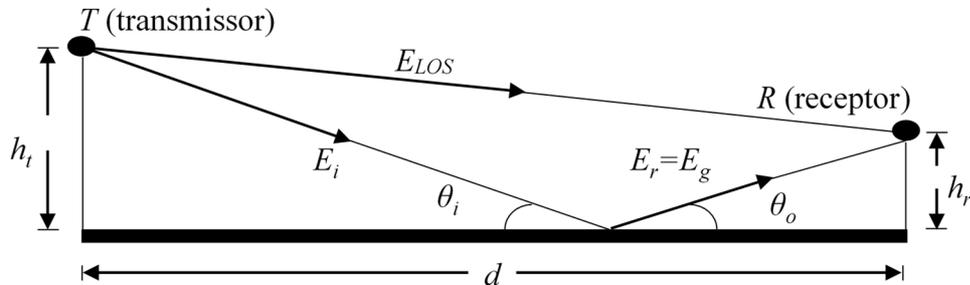
Quando uma onda de rádio que se propaga em um meio encontra outro material com propriedades elétricas diferentes, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. Se o outro material for um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida e propagada para o segundo meio e parte é refletida para o primeiro meio, da mesma forma se o segundo material for um condutor perfeito, então toda a energia incidente é refletida de volta para o primeiro meio sem perda (NOTAROS, 2012).

Em um canal de comunicação sem fio, raramente existe um único caminho direto entre transmissor e receptor (T-R), desta forma o modelo de propagação no espaço livre torna-se impreciso. O modelo de reflexão, baseado na ótica geométrica, considera o caminho direto e um caminho refletivo no solo entre T-R (CHIEN, 2002).

Esse modelo é considerado mais preciso que o modelo de propagação no espaço livre, sendo utilizado para prever a intensidade do sinal em larga escala em sistemas de rádio móvel que utilizam torres altas (altura maior que 50 metros) e de canais de microcélula com linha de visada direta em ambientes urbanos (RIBEIRO, 2004).

A Figura 2 mostra um esquema do modelo com as variáveis consideradas na reflexão e a Tabela 2 descreve cada parâmetro:

Figura 2 – Modelo da Reflexão.



Fonte: Adaptado de Rappaport (2009).

Tabela 2 – Descrição dos Parâmetros da Equação do Modelo da Reflexão.

Parâmetro	Descrição
$h_t$	Altura da antena Tx
$h_r$	Altura da antena Rx
$E_i$	Campo $E$ incidente
$\theta_i$	Ângulo de incidência
$E_r = E_g$	Componente refletida

Fonte: Adaptado de Rappaport (2009).

A partir da Figura 2, são estabelecidas as equações do modelo para o valor do campo elétrico a uma distância  $d$  em relação a uma distância de referência  $d_0$  (PINHEIRO, 2006):

$$E(d, t) = \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \quad (d > d_0) \quad (35)$$

$\left|\frac{E_0 d_0}{d}\right|$  é o envelope do campo elétrico, a onda da componente direta se propaga por uma distância  $d'$  e a onda refletida por uma distância  $d''$ , então os campos elétricos das componentes direta e refletida podem ser expressos por (PINHEIRO, 2006):

$$E_{LOS}(d', t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d'}{c}\right)\right) \quad (36)$$

e,

$$E_g(d'', t) = \Gamma \frac{E_0 d_0}{d''} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d''}{c}\right)\right) \quad (37)$$

No cálculo de  $E_g$ , o termo  $\Gamma$  representa o coeficiente de reflexão para o solo, e aparece na equação devido às leis da reflexão nos dielétricos que estabelece as seguintes relações (RAPPAPORT, 2009):

$$\theta_i = \theta_o \quad (38)$$

$$E_g = \Gamma E_i \quad (39)$$

$$E_t = (1 + \Gamma)E_i \quad (40)$$

O campo elétrico total é o resultado da soma das componentes direta e refletida:

$$|E_{TOT}| = |E_{LOS} + E_g| \quad (41)$$

Sendo assim somando as expressões dos campos das componentes direta e refletida, o campo elétrico total é dado por (RAPPAPORT, 2009):

$$E_{TOT}(d, t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d'}{c}\right)\right) + (-1) \frac{E_0 d_0}{d''} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d''}{c}\right)\right) \quad (42)$$

O valor de  $\Gamma$  assume o valor  $(-1)$  devido à condição de polarização horizontal perfeita, em que o solo pode ser modelado como um refletor perfeito. Neste caso, a onda refletida apresenta um coeficiente de reflexão de magnitude unitária e  $180^\circ$  fora de fase com a onda incidente, isto ocorre quando o ângulo de incidência é de valor muito pequeno (incidência rasante). Uma simples demonstração pode ser feita por meio da lei de Snell, com o seguinte cálculo (NOTAROS, 2012):

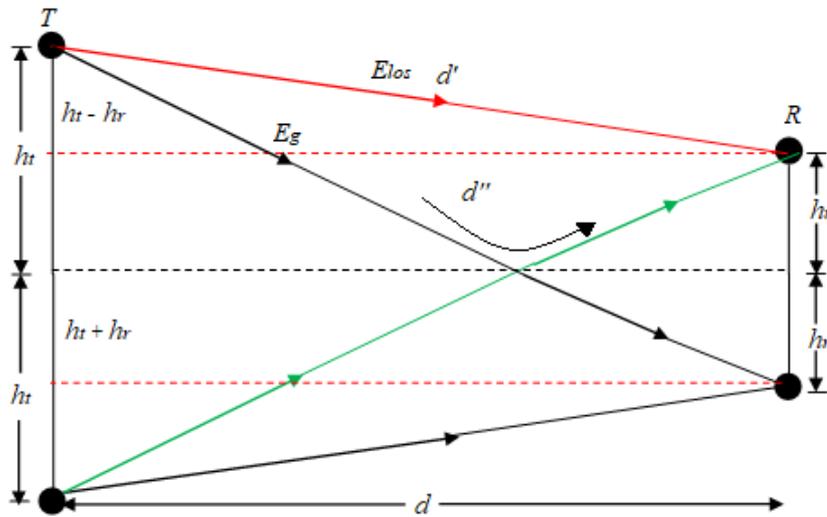
$$\Gamma_{\perp} = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} = \frac{-\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} = -1 \quad (43)$$

Normalizando a expressão do campo elétrico total em termos de  $\Delta$ , que é a diferença entre a distância percorrida pelo campo elétrico da linha de visada direta e os caminhos de reflexão no solo.

$$\Delta = d'' - d' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (44)$$

Esta expressão é encontrada pelo método das imagens que realiza um espelhamento da Figura 2 e com o uso do teorema de Pitágoras em dois triângulos, a relação entre as distâncias da linha de visada direta e os caminhos refletidos no solo são calculadas. A Figura 3 apresenta a geometria para demonstração do método das imagens (PINHEIRO, 2006):

Figura 3 – Representação Gráfica do Método das Imagens.



Fonte: Adaptado de Rappaport (2009).

Para um valor  $d$  muito grande, em comparação com  $h_t + h_r$ , o valor de  $\Delta$  pode ser simplificado e aproximado usando uma série de Taylor:

$$\Delta = d'' - d' \approx \frac{2h_t h_r}{d} \quad (45)$$

Quando  $\Delta$  é conhecido, a diferença de fase  $\theta_\Delta$  entre os dois componentes de campo e o atraso de tempo  $t_d$  entre a chegada dos dois componentes no receptor podem ser calculados por:

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{\Delta\omega_c}{c} e t_d = \frac{\Delta}{c} = \frac{\theta_\Delta}{2\pi f_c} \quad (46)$$

Quando  $d$  é muito grande,  $\Delta$  torna-se próximo de zero, então as distâncias  $d'$  e  $d''$  são bem próximas e as amplitudes de  $E_{LOS}$  e  $E_g$  são praticamente iguais e diferem apenas em fase. Logo, o valor do  $E_{TOT}$  para um tempo  $t = d''/c$  é:

$$|E_{TOT}(d)| = 2 \frac{E_0 d_0}{d} \text{sen} \left( \frac{\theta_\Delta}{2} \right) \quad (47)$$

Esta equação pode ser aproximada, visto que para as condições de contorno,  $\theta_\Delta \leq \pi$  e  $d \gg 0$ , o valor do  $|E_{TOT}(d)|$  cai assintoticamente de valor. Assim,  $\sin \left( \frac{\theta_\Delta}{2} \right) \approx \frac{\theta_\Delta}{2}$ , quando  $\frac{\theta_\Delta}{2} \approx \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} < 0,3 \text{ rad}$ , então para  $d > \frac{20\pi h_t h_r}{3\lambda} \approx \frac{20h_t h_r}{\lambda}$ , o campo  $E$  recebido pode ser aproximado para:

$$|E_{TOT}(d)| = 2 \frac{E_0 d_0}{d} \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \approx \frac{k}{d^2} \text{V/m} \quad (48)$$

A potência recebida a uma distância  $d$  do transmissor seguindo o modelo de reflexão no solo de dois raios é expressa por (CHIEN, 2002):

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (49)$$

De acordo com a equação da potência recebida pelo receptor, verifica-se que é independente da frequência e em grandes distâncias a potência diminui com a distância elevada à quarta potência, isto é, sofre um decaimento a uma taxa de 40 dB/grupo de dez. A perda de propagação do caminho para o modelo de reflexão expressa em dB assume a forma (RAPPAPORT, 2009):

$$P_{LOS} (dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (50)$$

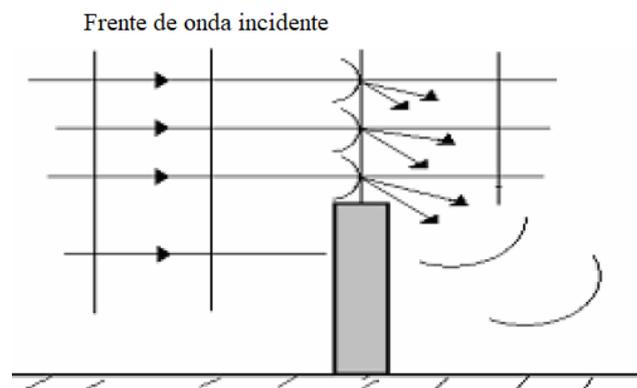
### 2.2.2 Difração

O fenômeno da difração ocorre quando uma onda propagante colide com uma obstrução imperfeita ou fenda, chamada ponto de difração, na qual existem irregularidades ou arestas no anteparo. Após esta colisão surgem novas frentes de onda no entorno da obstrução, que se propagam até o receptor mesmo sem linha de visada direta entre T-R. Em altas frequências, a difração, assim como a reflexão, depende da geometria do objeto, da amplitude, fase e polarização da onda incidente no ponto de difração (RIBEIRO, 2004).

O princípio de Huygens explica este mecanismo, que afirma que todos os pontos de uma frente de onda são fontes pontuais para a produção de ondas secundárias, e assim, por consequência, as ondas secundárias produzem uma nova frente de onda na direção de propagação (RIBEIRO, 2004).

A Figura 4 ilustra o princípio da difração de Huygens e como se comporta a produção de ondas secundárias. A área após o obstáculo sem cobertura de sinal da antena transmissora denomina-se zona de sombra.

Figura 4 – Princípio da Difração de Huygens.

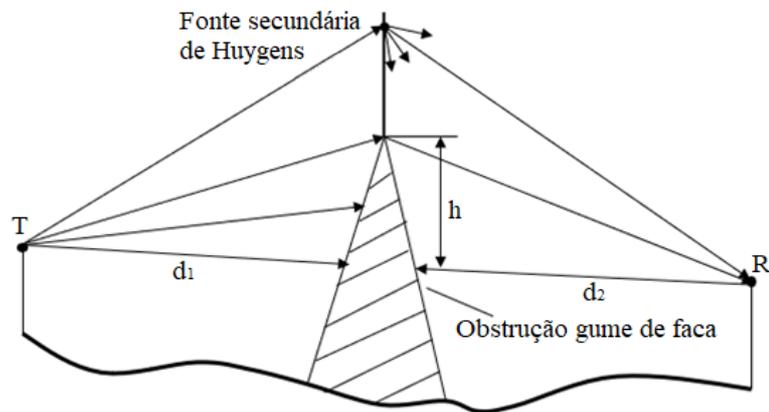


Fonte: Adaptado de Pinheiro (2006).

O modelo de difração, assim como o modelo de reflexão, realiza uma análise da perda de propagação entre T-R, mas neste caso para o fenômeno da difração. Geralmente, este processo é realizado de maneira teórica modificado por correções empíricas, visto que é uma tarefa difícil estimar a atenuação do sinal causada pela difração das ondas de rádio sobre relevo acidentado (RIBEIRO, 2004).

O modelo mais básico de difração ocorre quando o sinal transmitido encontra um objeto como uma montanha, em que no topo da obstrução existe uma “ponta ou gume de faca”. Neste caso, a perda de propagação por difração é estimada usando a solução de Fresnel clássica para o campo atrás de um gume de faca (VASCO, 2009). A Figura 5 ilustra a geometria da difração:

Figura 5 – Geometria do Modelo de Difração.



**Fonte:** Autoria Própria (2018).

A intensidade do campo elétrico no receptor é resultante da soma vetorial dos campos oriundos de todas as fontes de Huygens secundárias no plano acima do gume de faca. A intensidade do campo elétrico,  $E_d$ , de uma onda difratada em gume de faca é dada por (RAPPAPORT, 2009):

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right) dt \quad (51)$$

Nesta equação  $E_0$  é a intensidade de campo no espaço livre na linha de visada direta na ausência do solo e do gume de faca e  $F(v)$  é a integral de Fresnel complexa. Esta integral é uma função do parâmetro de difração Fresnel-Kirchoff que é dado por (VASCO, 2009):

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda d_1 d_2}} \quad (52)$$

Assim o ganho de difração devido à presença de um gume de faca é expresso por (WONG et al., 2009):

$$G_d(dB) = 20 \log |F(v)| \quad (53)$$

Para solução desta equação normalmente são utilizadas propriedades gráficas e métodos numéricos para calcular o ganho de difração, desta forma as aproximações de  $G_d(dB)$  em função de  $v$  são dadas por (RAPPAPORT, 2009):

$$G_d(dB) = 0; v \leq -1 \quad (54)$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0,5 - 0,62v); -1 \leq v \leq 0 \quad (55)$$

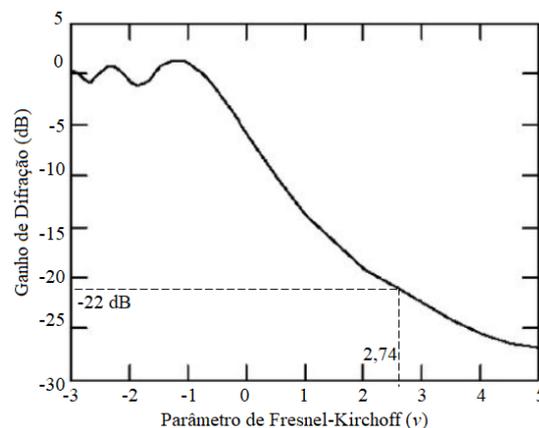
$$G_d(dB) = 20 \log(0,5 \exp(-0,95v)); 0 \leq v \leq 1 \quad (56)$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2}); 1 \leq v \leq 2,4 \quad (57)$$

$$G_d(dB) = 20 \log\left(\frac{0,225}{v}\right); v > 2,4 \quad (58)$$

Conforme observado na Figura 6, o Ganho de difração em função do parâmetro de Fresnel-Kirchoff é aproximadamente 22 dB, para  $v=2,74$ .

Figura 6 – Ganho de Difração em Função do Parâmetro de Fresnel-Kirchoff.



**Fonte:** Adaptado de Pinheiro (2006).

A norma do Ministério das Comunicações publicada no Diário Oficial da União 158 de 18 de agosto de 1994 estabelece que a não existência de obstruções deve considerar o elipsóide de Fresnel que limita 0,56 da primeira zona. A construção do perfil altimétrico corrigido deve ser caracterizado pela consideração do coeficiente troposférico de refração, adotando  $K = 4/3$  (PINHEIRO, 2006).

Na construção do perfil, a compensação se processa no valor das alturas dos diferentes pontos que devem ser corrigidos, desta forma para um ponto P do perfil a altura corrigida considerando o fenômeno da refração atmosférica é dada pela expressão (PINHEIRO, 2006):

$$H_c(P) = H(P) + 0,07843 \frac{D(P)[D - D(P)]}{K} \quad (59)$$

### 2.2.3 Dispersão

A dispersão é o fenômeno em que o sinal propagante encontra objetos com dimensões que são muito pequenas em comparação com o comprimento de onda do sinal, e na qual a densidade de obstáculos é grande considerando determinado volume. As superfícies ásperas, pequenos objetos no trajeto de comunicação entre T-R, folhagens, ou outras irregularidades provocam o efeito dispersivo nas ondas eletromagnéticas (LODI; QUEVEDO, 2010).

As ondas eletromagnéticas ao se propagarem sofrem com a influência do meio, uma das causas da energia transmitida ser espalhada em várias direções são as superfícies ásperas e objetos como postes e árvores. Estes objetos oferecem energia de rádio adicional para um receptor, desta forma em um cenário de radiopropagação, o nível de sinal no receptor normalmente é mais forte do que o previsto apenas pelos modelos de reflexão e difração (VASCO, 2009).

As superfícies planas apresentam um determinado grau de rugosidade ou aspereza, este grau é testado usando o critério de Rayleigh, que define uma altura crítica de protuberâncias da superfície para certo ângulo de incidência. A expressão a seguir modela este critério:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \text{sen} \theta_i} \quad (60)$$

Segundo o critério de Rayleigh, uma superfície é considerada lisa se a diferença entre a protuberância mínima e a máxima ( $h$ ) for menor que  $h_c$  e áspera se esta diferença for maior que  $h_c$ . Para superfícies ásperas o coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) deve ser multiplicado por um fator de perda de dispersão ( $\rho_s$ ), visto que o efeito dispersivo provoca uma diminuição da densidade de potência do campo refletido. O fator de perda de dispersão, criado por Ament, é expresso por (RAPPAPORT, 2009):

$$\rho_s = \exp \left[ -8 \left( \frac{\pi \sigma_h \text{sen} \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (61)$$

Foram realizados experimentos por Boithias que resultaram em uma melhor combinação com os valores medidos, desta forma a equação (61) foi modificada para:

$$\rho_s = \exp\left[-8\left(\frac{\pi\sigma_h \text{sen}\theta_i}{\lambda}\right)^2\right] I_0\left[8\left(\frac{\pi\sigma_h \text{sen}\theta_i}{\lambda}\right)^2\right] \quad (62)$$

Os campos refletidos para  $h > h_c$  podem ser solucionados para superfícies ásperas por meio do produto:

$$\Gamma_{\text{modificado}} = \rho_s \Gamma \quad (63)$$

No fenômeno da dispersão, o conhecimento dos aspectos físicos dos objetos que induzem à dispersão é importante para prever com precisão as intensidades do sinal recebido pelo receptor. A razão entre a densidade de potência do sinal disperso na direção do receptor e a densidade de potência da onda de rádio incidente no objeto de dispersão é definida como a seção cruzada de radar (RCS), e a unidade é em metros quadrados.

Para sistemas de rádio urbanos, os modelos baseados na equação de radar biestático calculam a potência recebida devido à dispersão no campo distante. Esta equação descreve a propagação de uma onda trafegando no espaço livre que se choca com um objeto dispersor distante do transmissor, e depois é direcionada para o receptor, dada por (RAPPAPORT, 2009):

$$P_r(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + 20\log(\lambda) + \text{RCS}[\text{dB.m}^2] - \\ - 30\log(4\pi) - 20\log d_T - 20\log d_R \quad (64)$$

Em que,  $d_T$  representa a distância entre o transmissor e o objeto dispersor e  $d_R$  a distância entre o receptor e o objeto dispersor.

### 2.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

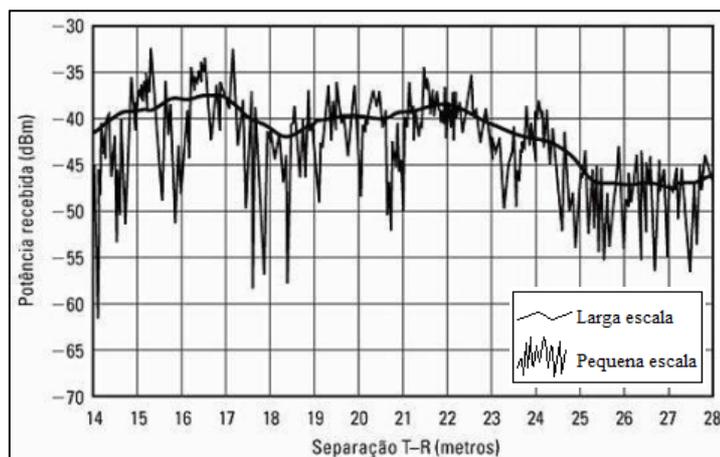
Os projetos de sistemas de radioenlace são responsáveis por caracterizar o comportamento da propagação dos sinais eletromagnéticos no espaço livre. Nestes sistemas, o canal de transmissão via rádio impõe limitações para o desempenho da comunicação sem fio. Desta forma, a modelagem deste canal, historicamente, tem sido realizada de forma estatística, a partir de bases de medições específicas para a região de estudo. Existe muita dificuldade em caracterizar um canal de comunicação sem fio, por causa dos diversos fenômenos aleatórios que compõem um meio de propagação (NOGUEIRA, 2008).

Os pesquisadores desenvolveram modelos de propagação para determinados ambientes, por causa disto o cenário analisado é o mais adequado. Os principais fatores que alteram de

modo significativo o comportamento onda propagante e os resultados obtidos pelo modelo aplicado são: os tipos de solo, vegetação, condições climáticas e perfil topográfico do terreno (BARRETO, 2013).

Os estudos em radiopropagação objetivam calcular a densidade média de potência do sinal para uma grande distância de separação entre T-R e são chamados modelos de propagação em larga escala ou desvanecimento em larga escala. Em contrapartida, os modelos de propagação que se caracterizam por analisar flutuações rápidas da intensidade do sinal recebido para distâncias muito curtas ou em pequenos intervalos de tempo são chamados desvanecimento em pequena escala ou modelos de atenuação (DAEHYUN; JINGU; YOUNGLOK, 2016). Para ilustrar esta diferença, a Figura 7 realiza uma comparação entre os dois tipos de desvanecimentos:

Figura 7 – Desvanecimento em Pequena e Larga Escala.



**Fonte:** Adaptado de Rappaport (2009).

Os sinais transmitidos em meios não guiados podem trafegar da origem ao destino de diversas maneiras: propagação terrestre, propagação ionosférica e propagação em linha de visada. Na propagação terrestre as ondas de rádio trafegam pela parte mais baixa da atmosfera, próximo à Terra, em baixas frequências (< 2 MHz). Na propagação ionosférica, as ondas de rádio são radiadas para cima atingindo a ionosfera e refletidas para a Terra (2 – 30 MHz) (TANENBAUM, 2003).

Na propagação em linha de visada ocorre a comunicação direta entre transmissor e receptor em frequências mais altas (> 30 MHz), neste caso a curvatura da Terra não influencia na propagação, mas há necessidade de dimensionar alturas e distâncias entre antenas (TANENBAUM, 2003).

Conforme dito, os modelos de propagação em pequena escala analisam as variações rápidas de amplitude, fase ou atrasos de caminhos múltiplos de um sinal de rádio recebido em um curto período de tempo ou distância. Enquanto que os modelos de propagação em larga escala são caracterizados por pequenas variações da intensidade média do sinal à medida que a estação móvel se afasta do transmissor (LIM et. al, 2016).

Os modelos de predição da perda de propagação em um canal de comunicação objetiva estimar a densidade de potência média em determinado ponto de recepção, levando-se em consideração a interação da onda eletromagnética com as características de uma determinada região. São boas ferramentas para projetos de cobertura e para cálculo de enlaces em geral, mas para obtenção de valores precisos, é necessário estudar detalhadamente o cenário com grande quantidade de medições e não se fundamentar apenas nos modelos existentes (PEREIRA, 2007).

Os modelos de radiopropagação se classificam conforme a seguir (MARTINS, 2006):

- Modelos Determinísticos ou Físicos: baseados em uma análise matemática, em que métodos numéricos podem ser usados para modelagem do processo de propagação da onda.
- Modelos Empíricos ou Estatísticos: baseados em equações e gráficos obtidos a partir de medições realizadas em campo dentro da região de estudo.

O presente trabalho irá tratar os principais mecanismos de desvanecimento em larga escala. O cenário analisado representa um sistema de comunicação regido por modelos de propagação em ambientes externos, na qual devem ser consideradas as imperfeições do canal de transmissão, as dimensões das variáveis do processo, distâncias e alturas de antenas tanto do transmissor quanto do receptor. Estes projetos exigem análises para campos distantes, que se caracterizam pela variação da intensidade média de sinal pequena na linha de visada direta entre transmissor e receptor.

Serão apresentados os principais modelos de propagação para ambientes no exterior encontrados na literatura clássica, em que alguns se destacam e abrangem determinadas faixas de frequências e sistemas de telecomunicações específicos: Modelo de propagação no espaço livre, Modelo Okumura, Modelo Okumura-Hata ou Hata, Modelo COST 231, Modelo Walfish-Ikegami e Modelo Longley-Rice.

### 2.3.1 Propagação no Espaço Livre

No modelo de propagação no espaço livre o ganho máximo de uma antena na linha de visada direta é fornecido pela equação (LODI; QUEVEDO, 2010):

$$G_M = \frac{S}{P_T} \quad (65)$$

Em que o ganho máximo de uma antena é a razão entre a densidade de potência na direção de máxima irradiação ( $S$ ) e a densidade de potência transmitida de forma isotrópica ( $P_T$ ) (irradiação uniforme de energia em todas as direções).

A área efetiva de recepção de uma antena é dada pela expressão:

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (66)$$

Em que  $G_R$  é o ganho máximo da antena receptora e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal recebido. A relação entre o valor médio da densidade de potência média e o campo elétrico recebido, para campos distantes, é estabelecida pela equação (WONG et. al, 2009):

$$S = \frac{E^2}{\eta} \quad (67)$$

Em (67) a variável  $S$  é a densidade de potência média [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], que é função do módulo do campo elétrico  $E$  [ $\text{V}/\text{m}$ ] e da impedância intrínseca do meio  $\eta$  [ $\Omega$ ]. No espaço livre ( $\eta_0$ ) assume o valor de  $120\pi \approx 377 \Omega$  (NOTAROS, 2012). Outra equação relaciona a densidade de potência com a distância para uma antena isotrópica (WONG et. al, 2009):

$$S = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (68)$$

Em que  $P_T$  representa a potência transmitida, desta forma para uma antena de ganho  $G_T$ , a equação gerada tem a forma:

$$S = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (69)$$

Em seguida as equações (67) e (69) são igualadas, para encontrar a expressão do campo elétrico (70):

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \therefore E = \frac{\sqrt{30P_T G_T}}{d} [V/m] \quad (70)$$

A potência recebida será o resultado da multiplicação entre (66) e (70) (WONG et. al, 2009):

$$P_R = SA_e = \frac{E^2}{120\pi} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} = \left(\frac{E\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{G_R}{120\pi} [W] \quad (71)$$

O modelo de propagação no espaço livre é a situação mais simples para o canal de transmissão, segundo a qual entre T-R o meio está livre de obstruções e de reflexões em qualquer direção (SEYBOLD, 2005).

Em estudos de radiopropagação, comumente são utilizados modelos para realizar uma estimativa da potência média recebida em função da onda eletromagnética com o meio. O modelo de Friis somente é válido para distâncias que estejam no campo distante da antena transmissora. O campo distante, ou região de Fraunhofer,  $d_{ff}$ , a qual está relacionada com a maior dimensão linear da abertura da antena transmissora e o comprimento de onda é dada por (SCUDELER, 2005):

$$d_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (72)$$

Em que  $D$  é a maior dimensão linear da antena. Adicionalmente, a distância  $d_{ff}$  deve satisfazer as condições de  $d_{ff} \gg D$  e  $d_{ff} \gg \lambda$ , de modo a garantir a condição de campo distante.

A equação do espaço livre de Friis para a perda de propagação é modelada da seguinte forma (SEYBOLD, 2005):

$$L = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (73)$$

Aplicando as propriedades logarítmicas à equação (62) é encontrada a seguinte fórmula:

$$L_{dB} = -147,56 + 20 \log(d(m)) + 20 \log(f(Hz)) \quad (74)$$

Em função da frequência em GHz e distância em km, a equação (73) é expressa da seguinte forma:

$$L_{dB} = 92,44 + 20 \log(d(km)) + 20 \log(f(GHz)) \quad (75)$$

Na equação (73) estão sendo considerados os ganhos das antenas transmissora e receptora, em muitas aplicações os ganhos são excluídos da expressão da perda de propagação no espaço-livre, desta forma a equação em decibéis se reduz a:

$$L_{FSL} (dB) = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (76)$$

Os resultados obtidos das equações de perda de propagação em decibéis, geralmente são expressos em relação a um nível de referência. As variações de medidas absolutas de potência mais usadas em telecomunicações são o dBm (potência absoluta relativa a 1 miliwatt), dBW (potência absoluta relativa a 1 watt), dBk (potência absoluta relativa a 1 kilowatt). Por exemplo, para o dBm a relação de conversão de potência é (FOROUZAN, 2008):

$$P_{dBm} = 10 \log \left( \frac{P_W}{1mW} \right) e P_{mW} = (1mW) 10^{(P_{dBm}/10)} \quad (77)$$

### 2.3.2 Okumura

O modelo de Okumura é um modelo empírico que foi construído em 1960 baseado em uma grande quantidade de medidas feitas na cidade de Tóquio e seus arredores, tem aplicação na faixa de frequência de 200 a 1920 MHz, embora seja em alguns casos extrapolados até 3 GHz. O modelo pode ser usado para alturas de antena da estação base de 20 até 1000 metros, e para comprimentos de enlaces de 1 até 100 km (SEYBOLD, 2005).

Para determinação da atenuação entre T-R, Okumura desenvolveu um conjunto de curvas, conforme apresentado na Figura 8-a, que permitem obter a atenuação mediana ( $A_{mu}$ ) em função da distância e da frequência do enlace, para uma altura efetiva da antena da estação base ( $h_{eb}$ ) de 200 m e uma altura da antena do móvel ( $h_m$ ) de 3 m, que são valores relativamente altos, quando comparados com os valores usados na prática (SEYBOLD, 2005).

A perda de propagação total é calculada pela soma da contribuição de três fatores de ganho, devido à altura da antena da estação base ( $G_{eb}$ ), à altura da antena do móvel ( $G_m$ ) e ao tipo de ambiente ( $G_{AREA}$ ). Então, a atenuação total é expressa pela equação (WONG et. al, 2009):

$$A_{prop} (dB) = A_0 (dB) + A_{mu} - G_{eb} - G_m - G_{AREA} \quad (78)$$

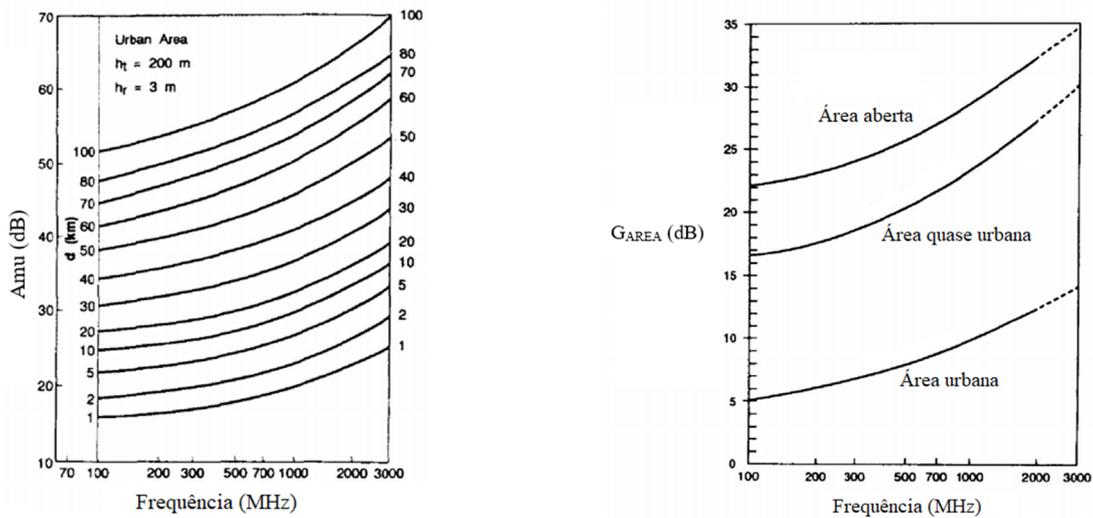
Os ganhos são obtidos a partir do cálculo das seguintes expressões:

$$G_{eb} = 20 \log\left(\frac{h_{eb}}{200}\right); \text{ para } 1000 \text{ m} > h_{eb} > 10 \text{ m} \quad (79)$$

$$G_m = 10 \log\left(\frac{h_m}{3}\right); \text{ para } h_m \leq 3 \text{ m} \quad (80)$$

$$G_m = 20 \log\left(\frac{h_m}{3}\right); \text{ para } 10 \text{ m} > h_m > 3 \text{ m} \quad (81)$$

Figura 8 – Curvas para Determinação da Atenuação.



a) Atenuação Mediana

b) Fator de Correção no Modelo Okumura

**Fonte:** Adaptado de Rappaport (2009).

O ganho pelo tipo de ambiente ou o fator de correção em função da frequência para áreas suburbana, quase aberta e rural é dada pela Figura 8-b.

### 2.3.3 Hata

Com o objetivo de facilitar a aplicação do método de Okumura, foram desenvolvidas formulações matemáticas empíricas para descrever os gráficos criados por Okumura. Este modelo é desenvolvido para as seguintes condições (HATA, 1980):

- Faixa de frequência de 150 MHz a 1500 MHz (VHF e UHF);
- Distância entre T-R de 1 a 20 km;
- A altura da antena da estação base é limitada de 30 a 200 m.

Este modelo apresenta equações para áreas urbanas, suburbanas e abertas. Para áreas urbanas o modelo Hata é regido pela equação (WONG et. al, 2009):

- Áreas Urbanas:

$$A_{pro-urbana} (dB) = 69,55 + 26,16(f) - 13,82(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(d) \quad (82)$$

Em que os parâmetros da equação (82) estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3 – Descrição das Variáveis da Equação do Modelo Hata.

Parâmetro	Descrição
$f$	Frequência do enlace
$h_{eb}$	Altura da antena transmissora ou estação base
$h_m$	Altura da antena receptora ou do sistema móvel
$a(h_m)$	Fator de correção para a altura da antena do móvel
$d$	Distância entre T-R

Fonte: Hata (1980).

O fator de correção para a altura da antena do móvel  $a(h_m)$  é dado por:

$$a(h_m) = [1,1 \log(f)] h_t - [1,5 \log(f) - 0,8]; \text{ para cidades pequenas ou médias} \quad (83)$$

$$a(h_m) = 8,29 [\log 1,54 h_m]^2; \text{ para cidades grandes e } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (84)$$

$$\text{e } a(h_m) = 3,2 [\log 11,75 h_m]^2 - 4,97; \text{ para cidades grandes e } f > 300 \text{ MHz} \quad (85)$$

Para regiões suburbanas e abertas as equações são:

- Áreas suburbanas:

$$A_{pro-suburbana} (dB) = A_{pro-urbana} (dB) - 2 \left[ \log \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (86)$$

- Áreas abertas:

$$A_{pro-suburbana} (dB) = A_{pro-urbana} (dB) - 4,78 [\log(f)]^2 - 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (87)$$

### 2.3.4 COST 231

A EURO-COST (*European Cooperative for Scientific and Technical*) designou o comitê de trabalho COST (*Cooperation in the Field of Scientific and Technical*) 231 que desenvolveu o modelo de Hata para a faixa de 2 GHz. Este trabalho resultou na seguinte formulação (SEYBOLD, 2005):

$$A_{pro-urbana} (dB) = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(d) + C_M \quad (88)$$

A Tabela 4 apresenta os parâmetros da equação (88) que caracteriza a perda de propagação para ambientes urbanos:

Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros da Equação do Modelo COST-231.

Parâmetro	Descrição
$f$	Frequência do enlace (1500 a 2000 MHz)
$h_t$	Altura da antena transmissora ou estação base (30 a 200 m)
$h_m$	Altura da antena receptora ou do sistema móvel (1 a 10 m)
$a(h_m)$	Fator de correção para a altura da antena do móvel, mesmo valor do modelo Hata
$d$	Distância entre T-R (1 a 20 km)
$C_m$	0 dB para cidades médias e suburbanas e 3 dB para centros metropolitanos

Fonte: Wong et. al (2009).

### 2.3.5 Walfisch-Ikegami

Este modelo é semi-empírico, visto que foi construído por meio da contribuição de formulações matemáticas e de medições estatísticas. O COST 231 também desenvolveu este trabalho que conjuga os modelos de Ikegami e de Walfisch-Bertoni com os resultados de medidas realizadas na cidade de Estocolmo. Neste método considera-se que existe apenas o ambiente urbano (MARTINS, 2006).

A grande inovação deste modelo consiste na inclusão de fenômenos de propagação guiada quando existe linha de visada entre a estação base e o móvel (LOS - *line-of-sight*), na direção de uma rua cercada por edifícios, diferentemente da propagação em espaço livre (BARIZON, 2004).

Além deste caso, o modelo Walfisch-Ikegami aplica-se a sistemas sem linha de visada (NLOS - *No-line-of-sight*) que é composto por três termos: o primeiro termo representa a atenuação do espaço livre, o segundo termo a atenuação por difração e dispersão no topo dos

edifícios e o terceiro a atenuação já ao nível das ruas devido às múltiplas difrações e reflexões. Este método é aplicado tanto em células grandes (macrocélula) como em células pequenas (microcélulas), e em terrenos planos e urbanos (BARIZON, 2004).

No caso LOS, a formulação é simples e a atenuação é dada por:

$$L_0(dB) = 42,6 + 20 \log(f) - 26 \log(d) \quad (89)$$

$f$  (frequência do enlace (800 a 2000 MHz) e  $d$  (distância entre os pontos de interesse (até 20 km). O caso NLOS é mais complexo, pois considera os efeitos provocados pelas reflexões e difrações nos edifícios:

$$L_0(dB) = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \text{ para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \quad (90)$$

$$L_0(dB) = L_0 \text{ para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \quad (91)$$

$L_0$  (perda provocada pelo espaço-livre);  $L_{rts}$  (perda devido ao espalhamento no topo dos prédios);  $L_{msd}$  (perda por múltiplas difrações nos prédios).

A seguir serão mostrados os cálculos das três componentes da perda de propagação NLOS do modelo Walfisch-Ikegami (MARTINS, 2006):

A perda de propagação  $L_0$  no espaço-livre é calculada por:

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 \log(d/km) + 20 \log(f/MHz) \quad (92)$$

A perda  $L_{rts}$  é determinada por:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log W + 10 \log f + 20 \log(h_m) + L_{ori} \quad (93)$$

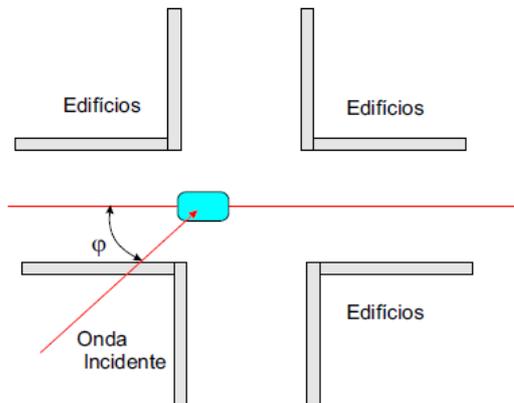
$w$  (largura da rua em metros;  $h_m$  (altura da antena do móvel, em metros);  $f$  (Frequência em MHz). O cálculo do parâmetro  $L_{ori}$  se baseia na Figura 9, em que o ângulo  $\varphi$  é dado em graus.

$$L_{ori} = -10 + 0,354\varphi, \text{ para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \quad (94)$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35), \text{ para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \quad (95)$$

$$L_{ori} = 4 - 0,114(\varphi - 55), \text{ para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad (96)$$

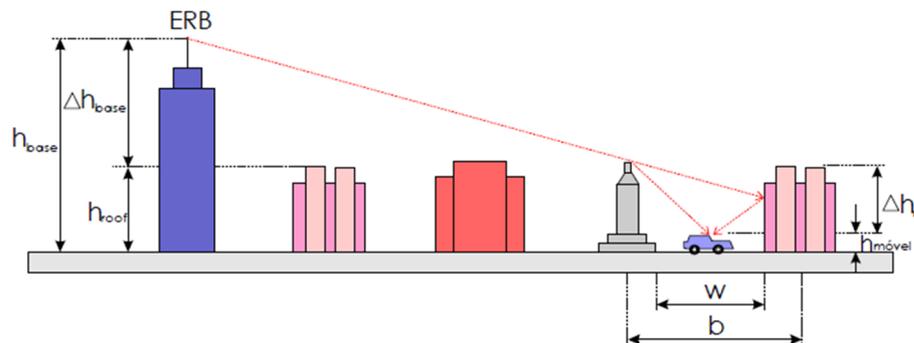
Figura 9 – Orientação da rua com Relação ao Enlace no modelo Walfisch-Ikegami.



Fonte: Martins (2006).

A Figura 10 ilustra o cenário para o caso NLOS do modelo Walfisch-Ikegami.

Figura 10 – Cenário para Cálculo com o Modelo Walfisch-Ikegami.



Fonte: Martins (2006).

Os parâmetros da Figura 10 são calculados por:

$$\Delta h_{móvel} = h_{roof} - h_{móvel} \quad (97)$$

$$\Delta h_{base} = h_{base} - h_{roof} \quad (98)$$

$h_{roof}$  (altura média do solo até o topo dos prédios);  $h_{base}$  (altura da antena da estação base, em metros);  $h_m$  (altura da antena do móvel, em metros).

O cálculo da perda  $L_{msd}$ , é determinado pela expressão:

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (99)$$

$b$  (distância média entre os prédios, em metros);  $d$  (distância entre T-R, em quilômetros);  $f$  (frequência em MHz).

$K_a$  é um parâmetro que contabiliza o aumento da atenuação de propagação devido ao fato de as antenas de estações base estarem localizadas abaixo do topo dos edifícios adjacentes;  $K_d$  e  $K_f$  determinam a dependência da difração múltipla com a frequência (MARTINS, 2006).

### 2.3.6 Longley-Rice

O modelo Longley-Rice foi desenvolvido na década de 60 e aplica-se a sistemas de comunicação ponto a ponto e ponto-multiponto. No projeto da caracterização da perda de propagação foram coletadas amostras na faixa de frequência de 40 MHz a 100 GHz, em intervalos de 1 a 2000 km, para alturas de antena entre 0,5 e 3000 metros, tanto na polarização vertical quanto horizontal (SEYBOLD, 2005).

Este modelo também é conhecido como modelo de terreno irregular (ITS), visto que considera as irregularidades do terreno. O cálculo estima perda média de transmissão e avalia a influência do clima, as características do solo (condutividade e constante dielétrica), a geometria do caminho no perfil do terreno e a refratividade da troposfera. Na construção do modelo foram utilizadas técnicas do modelo de reflexão no solo com dois raios; os mecanismos das perdas de difração por obstáculos isolados e a teoria da dispersão direta, para previsão de efeitos dispersivos causados pela troposfera em longas distâncias (AKOGLU; SONG, 2011).

No cálculo da perda de propagação, o modelo Longley-Rice soma a contribuição da atenuação no espaço livre ( $A_0$ ) com a atenuação de referência ( $W_{ref}$ ). A atenuação no espaço livre considera a distância entre as duas estações ( $d$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), calculada, em dB, pela seguinte equação (LONGLEY; RICE, 1968):

$$A_0 = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (100)$$

A atenuação de referência ( $W_{ref}$ ) é composta pelo efeito de três parâmetros aleatórios para o percurso entre transmissor e receptor: condições de tempo devido às variações climáticas ( $Y_T$ ), alterações do terreno ( $Y_S$ ) e aparecimento de obstáculos na localização do receptor ( $Y_L$ ). Para cálculo da  $W_{ref}$ , são definidas três regiões de atenuação: linha de Visada ( $A_{LOS}$ ), difração ( $A_{DIF}$ ) e espalhamento ( $A_{ES}$ ) (LONGLEY; RICE, 1968).

Cada região contribui com um comportamento diferente em relação ao efeito sobre o sinal de radiopropagação ao longo do caminho de transmissão, conforme descrito na Tabela 5:

Tabela 5 – Descrição das Regiões de Atenuação do Modelo Longley-Rice.

Região	Descrição
	Região sem interrupção da propagação do sinal eletromagnético.
Linha de Visada	Caracteriza a transmissão até a distância do horizonte de rádio. Calculada como uma função direta da distância entre as estações.
Difração	Caracteriza a região de aumento bastante rápido e linear da atenuação.
Espalhamento	Caracteriza o efeito dos fenômenos dispersivos do sinal eletromagnético e ocorre de forma mais lenta.

Fonte: Adaptado de Amaral (2012).

A  $W_{ref}$  é dada pelas seguintes expressões:

$$W_{ref} = W_0 + A_{LOS} + (Y_L + Y_S + Y_T) \text{ para } d < d_{Lb} \quad (101)$$

$$W_{ref} = W_0 + A_{DIF} + (Y_L + Y_S + Y_T) \text{ para } d_{Lb} \leq d \leq d_{Lm} \quad (102)$$

$$W_{ref} = W_0 + A_{ES} + (Y_L + Y_S + Y_T) \text{ para } d_{Lm} < d \quad (103)$$

E os coeficientes de atenuação  $A_{LOS}$ ,  $A_{DIF}$  e  $A_{ES}$ , em dB, são determinados a partir das expressões (104), (105) e (106), para a frequência ( $f$ ) em MHz, comprimento de onda ( $\lambda$ ) em metros, alturas das antenas e distâncias em quilômetros e os ângulos em radianos (AMARAL, 2012):

$$A_{LOS} = 20 \log \left( 1 + \frac{(d_{Lb} + d_{Lm}) \Delta h}{h_{eb} h_{em}} \right) \quad (104)$$

$$A_{DIF} = \left( 1 + 0,045 \left( \frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{1/2} \left( \frac{\alpha \theta_e + (d_{Lb} + d_{Lm})}{d} \right)^{1/2} \right)^{-1} \quad (105)$$

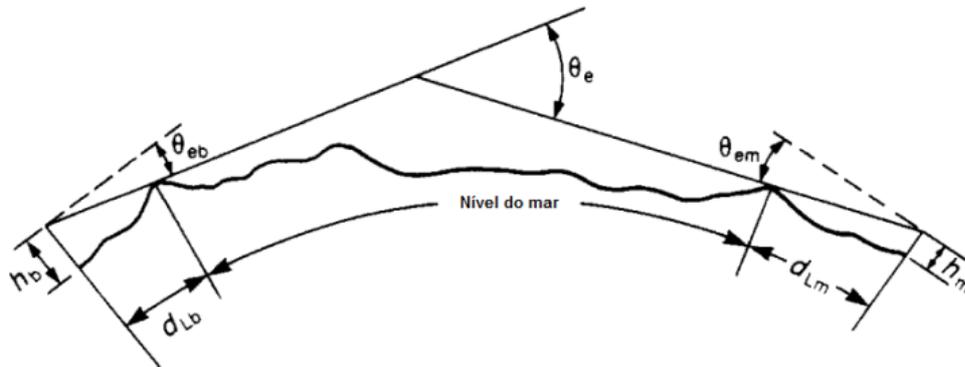
$$\text{em que : } \alpha = \frac{6370}{(1 - 0,04665 \exp(0,005577 N_s))} \quad (106)$$

$$A_{ES} = H_0 + 10 \log(f \theta_e^4) - 0,1(N_s - 301) \exp\left(\frac{-\theta_e d}{40}\right)$$

$$\text{em que : } H_0 = \frac{(h_{eb}^{-1} h_{em}^{-1})}{\theta_e f \|0,007 - 0,058 \theta_e\|}$$

A Figura 11 apresenta a geometria para o cálculo envolvido nas equações (101), (102) e (103) e a Tabela 6 explica cada variável considerada na predição do modelo Longley-Rice.

Figura 11 – Representação da Geometria do Enlace do Modelo Longley-Rice.



Fonte: Amaral (2012).

Tabela 6 – Variáveis do Cálculo da  $W_{ref}$  para o Modelo Longley-Rice.

Variável	Descrição
$h_b$	Altura da antena transmissora
$h_{eb}$	Altura efetiva da antena transmissora (estrutura+elevação do perfil)
$h_m$	Altura da antena receptora
$h_{em}$	Altura efetiva da antena receptora (estrutura+elevação do perfil)
$d$	Distância entre as estações transmissora e receptora
$d_{Lb}$	Horizonte de rádio da antena transmissora
$d_{Lm}$	Horizonte de rádio da antena receptora
$\theta_{eb}$	Ângulo de Elevação do Horizonte de rádio da antena transmissora
$\theta_m$	Ângulo de Elevação do Horizonte de rádio da antena receptor
$\theta_e$	Cruzamento dos Horizontes de rádio das antenas do enlace

Fonte: Longley e Rice (1968).

As distâncias  $d_{Lb}$  e  $d_{Lm}$  podem ser determinadas a partir do índice de rugosidade do terreno, ( $\Delta h$ ). Nos casos em que o perfil do terreno é desconhecido são aplicadas técnicas específicas para esta previsão, calculadas pelo modo área. Quando o perfil detalhado do terreno está disponível, os parâmetros do trajeto de propagação podem ser parametrizados com maior facilidade e a técnica de predição é definida pelo modo ponto-a-ponto (PARSONS, 2000).

O índice de rugosidade do terreno  $\Delta h$  está relacionado a outro parâmetro,  $\Delta h(d)$ , que relaciona a irregularidade do terreno em função da localização da estação, dado por (PARSONS, 2000):

$$\Delta h(d) = \Delta h[1 - 0,8 \exp(-0,02d)] \quad (107)$$

A Tabela 7 apresenta os valores típicos de  $\Delta h$  para diferentes tipos de terreno.

Tabela 7 – Valores Típicos de  $\Delta h$ .

Tipo de terreno	$\Delta h$
Água ou Planícies muito lisas	0 – 5
Planícies	$\approx 30$
Colinas	80 – 150
Montanhas	150 – 300
Cordilheiras	300 – 700

Fonte: Parsons (2000).

De posse dos valores de  $\Delta h$ , os valores de  $d_{Lb}$  e  $d_{Lm}$ , em km, são determinados pelas expressões (PARSONS, 2000):

$$d_{Lb} = \sqrt{17h_{eb}} \exp\left(-0,07 \sqrt{\frac{\Delta h}{h_{eb}}}\right) \quad (108)$$

$$d_{Lm} = \sqrt{17h_{em}} \exp\left(-0,07 \sqrt{\frac{\Delta h}{h_{em}}}\right) \quad (109)$$

Os ângulos de elevação, em radianos, também são necessários para o cálculo dos coeficientes de atenuação e podem ser obtidos a partir das equações (110), (111) e (112) (PARSONS, 2000):

$$\theta_{eb} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{eb}}} \left( 1,3 \left( \frac{\sqrt{17h_{eb}}}{d_{Lb}} \right) \Delta h - 4h_{eb} \right) \quad (110)$$

$$\theta_{em} = \frac{0,0005}{\sqrt{17h_{em}}} \left( 1,3 \left( \frac{\sqrt{17h_{em}}}{d_m} \right) \Delta h - 4h_{em} \right) \quad (111)$$

$$\theta_e = \theta_{eb} + \theta_{em} \text{ ou } \left( -\frac{d_{Lb} + d_{Lm}}{8495} \right) \quad (112)$$

O índice de refratividade da superfície ( $N_s$ ) é outro parâmetro considerado e depende das condições atmosféricas do ambiente que afetam o índice de refração do ar e provocam o desvanecimento dos sinais eletromagnéticos na troposfera, tais como temperatura, pressão e umidade relativa (LONGLEY; RICE, 1968).

No modelo Longley-Rice o cálculo do  $N_s$  é complexo, determinado pela função:

$$N_s = N_0 \exp\left(-\frac{Z_s}{Z_1}\right) \quad (113)$$

De acordo com a equação (113),  $N_s$  depende da refratividade de referência  $N_0$ , índice ao nível do mar, da elevação da superfície envolvida  $Z_s$  e de outra elevação como referência  $Z_1=9,46$  km.

A Tabela 8 mostra valores extraídos de um mapa de refratividade proposto pelo modelo, na qual devido a esta característica a faixa de operação do modelo fica limitada, como mostra a Tabela 9.

Tabela 8 – Refratividade de Superfície em Relação ao Clima.

<b>Clima</b>	<b>Refratividade da Superfície (<math>N_s</math>)</b>
Deserto	280
Continental	301 – 320
Marítimo	320 – 370
Equatorial	360

Fonte: Longley e Rice (1968).

Tabela 9 – Parâmetros do Modelo Longley-Rice.

<b>Característica</b>	<b>Faixa de operação</b>
Faixa de Frequência	20 MHz a 20 GHz
Distância entre estações	2 a 2000 km
Altura das antenas	0.5 a 3000 m
Polarização	Vertical e Horizontal

Fonte: Longley e Rice (1968).

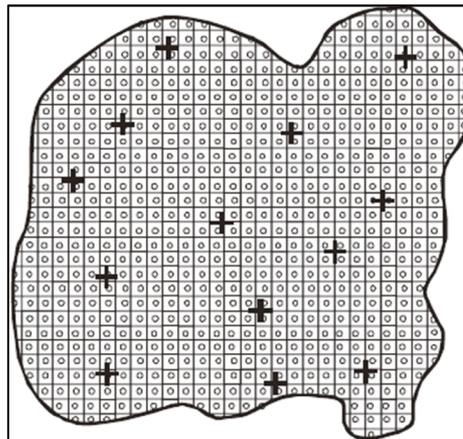
## 2.4 GEOESTATÍSTICA APLICADA

A geoestatística é o conjunto de métodos para análise e elaboração de modelos da variabilidade espacial de determinado processo de interesse. Um processo ou sistema pode ser avaliado a partir de um levantamento de campo, desse modo os valores amostrados de um parâmetro estão diretamente relacionados à sua localização (BRANDÃO; GREGO; OLIVEIRA, 2015).

Teve origem na África do Sul, a partir dos trabalhos de Danie G. Krige, na área da mineração, com a coleta de amostras de solo para identificação da concentração de ouro. Os resultados concluíram que só seria possível calcular os valores das variâncias se as distâncias das posições das medidas fossem consideradas (KRIGE, 1951). Baseando-se nos estudos de Krige, foi desenvolvida a chamada teoria das variáveis regionalizadas, pelo engenheiro francês Georges Matheron, em 1963, que consolidou a geoestatística como uma ciência (KRIGE, 1951; MATHERON, 1963).

Em tese, as observações próximas apresentam medidas mais semelhantes do que aquelas separadas por distâncias maiores. Essas amostras devem apresentar consistência de metodologia e unidade, na prática representam tanto variáveis naturais como socioeconômicas. Em uma atividade de geoprocessamento é necessário um procedimento de interpolação, para geração e representação na forma de grade regular do fenômeno em estudo, conforme exemplificado pela Figura 12 (CÂMARA; CAMARGO; FUCKS, 2004):

Figura 12 – Processo de Interpolação: amostras (cruzes) e estimativas (círculos).



**Fonte:** Brandão, Grego e Oliveira (2015).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas em diferentes etapas, específicas e complementares como: a) descrever e modelizar quantitativamente os padrões espaciais da variação espacial; b) prever valores em locais não amostrados; c) dimensionar a incerteza associada a uma estimativa; e d) apoiar no planejamento e otimização de processos de amostragem (BRANDÃO; GREGO; OLIVEIRA, 2015). Sendo assim, as principais vantagens da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição espacial são (LIMA, 2006):

- Mensurar a variabilidade espacial de uma variável regionalizada, com o uso da modelagem de um semivariograma;
- Suavização, dado que a estimação geoestatística faz a regressão de valores preditos;
- Desagrupamento ou efeito de anular concentrações de valores medidos;
- Análise da anisotropia, para verificação do comportamento da variabilidade em diferentes direções;
- Precisão, visto que existem métodos para mitigação de erros de estimação;
- Conhecimento do grau de incerteza, pois para cada estimativa há uma margem de erro associada.

#### **2.4.1 Sistemas de Coordenadas Geográficas**

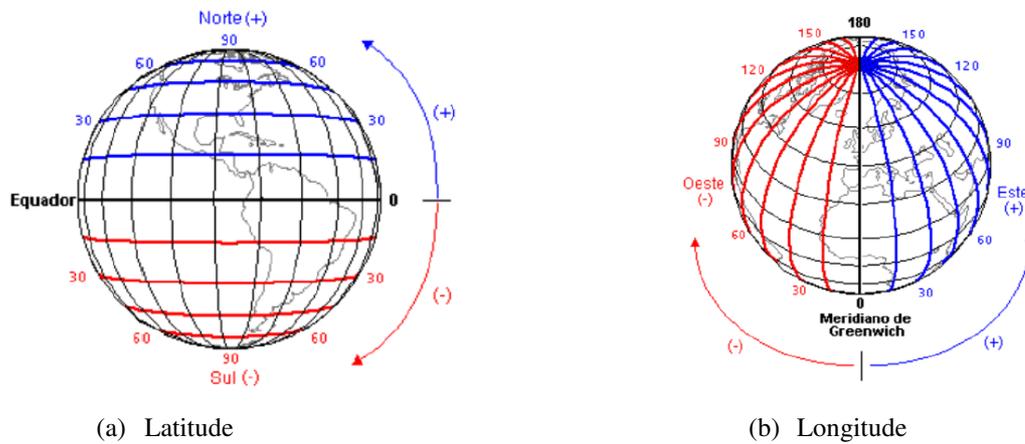
O planeta Terra apresenta uma forma quase esférica, posto que existe um achatamento nos pólos, denominado geóide. Apresenta-se dividida no mapa em duas partes iguais por uma linha horizontal imaginária denominada linha do Equador. A distância em graus de qualquer ponto da superfície terrestre, determinada a partir de uma linha imaginária paralela, até a linha do Equador define o conceito de latitude (ARAÚJO; CARVALHO, 2008).

Caso a posição em análise se encontre acima da linha do equador, é dita latitude norte, e ao contrário, se estiver abaixo tem-se latitude sul. A latitude varia de 0 a  $+90^\circ$  no hemisfério norte, do Equador até o pólo norte, e de 0 a  $-90^\circ$  no hemisfério sul, direção sul (ARAÚJO; CARVALHO, 2008).

Assim como a linha do Equador, existe uma linha imaginária na direção vertical que resulta de um corte efetuado por um plano no centro da Terra e divide o globo terrestre em ocidente e oriente, chamado Meridiano de Greenwich. A longitude varia de 0 a  $+180^\circ$  a leste e de 0 a  $-180^\circ$  a Oeste, partindo do meridiano de Greenwich (ARAÚJO; CARVALHO, 2008).

A Figura 13 mostra o sistema de coordenadas geográficas em graus distribuído no globo terrestre e as direções de latitude e longitude.

Figura 13 – Direções das Coordenadas Geográficas.



Fonte: Marques (2018).

Além das unidades em graus as coordenadas geográficas podem ser escritas no Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), composta por 60 fusos de 6° de longitude partindo do meridiano de 180° na direção oeste-leste. Os tipos de representação para um ponto do hemisfério sul, tomado como exemplo, estão descritos na Tabela 10:

Tabela 10 – Representação dos Sistemas de Coordenadas Geográficas.

Sistema	Representação
<b>Graus Decimais</b>	Lat. -5,212532°
	Lon. -37,330017°
<b>Graus Sexagesimais</b>	Lat. 5° 12'45,11"S
	Lon. 37°19'48,06"O
<b>Graus, Minutos Decimais</b>	Lat. 5°12,752'S
	Lon; 37°19,801'O
<b>Universal Transversa de Mercator</b>	Lat. 685089,86 m E
	Lon. 9423597.57 m S
	Zona 24 M

Fonte: Araújo (2008), Carvalho (2008) e Marques (2018).

## 2.4.2 Estatística Descritiva Clássica

A geoestatística fundamenta-se em conceitos probabilísticos, diante disto há necessidade de conhecimento teórico sobre parâmetros estatísticos essenciais para análises quantitativas dos dados coletados em campo e elaboração de estudos adequados de variografia e interpolação espacial (BRANDÃO; GREGO; OLIVEIRA, 2015).

Estes procedimentos concedem informações que possibilitam analisar o comportamento da distribuição dos dados; identificar valores discrepantes e deduzir modelos a serem utilizados na inferência estatística. A etapa de análise exploratória dos dados objetiva verificar a normalidade e a variabilidade da distribuição de frequência das amostras (GREGO et. al, 2014 apud BRANDÃO; GREGO; OLIVEIRA, 2015).

Na composição da análise exploratória dos dados encontra-se a estatística descritiva que desenvolve e disponibiliza métodos para resumo e apresentação de determinado volume de dados, com o objetivo de facilitar a análise das informações contidas na massa de valores individuais. Portanto, a estatística descritiva tem por finalidade o uso de tabelas, gráficos, diagramas, distribuições de frequência e medidas para (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009):

- Analisar a formatação da distribuição dos dados;
- Verificar valores atípicos do espaço amostral;
- Identificar o grau de tendência central dos valores;
- Examinar os índices de variação presentes no volume de dados.

A validação do resumo estatístico está intrinsecamente relacionada à qualidade do método de coleta dos dados. Dessa forma, o padrão de resultados dos processos descritivos é diretamente proporcional à eficiência da entrada dos dados, caso seja de má qualidade fornecerá uma saída sem representar com fidelidade o mecanismo pesquisado. Serão apresentadas as principais medidas descritivas e métodos de representação gráfica para caracterização de tendência e dispersão numérica de valores amostrados (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009).

#### 2.4.2.1 Medidas Descritivas

As medidas descritivas objetivam reduzir um conjunto de dados numéricos de forma a oferecer informações relevantes a respeito desses dados. Essas medidas são funções das amostras coletadas e se classificam em (LANDIM; YAMAMOTO, 2013):

##### *Medidas de Tendência Central*

Indicam o centro da distribuição numérica, na qual geralmente está localizada a maioria das observações, também chamada de medidas de localização ou posição.

Média aritmética ( $\bar{X}$ ): representa o ponto central de uma distribuição numérica, valor em que se equilibram as discrepâncias positivas e negativas. Pode ser um valor não presente na

distribuição e resume todos os números do conjunto numérico. No cálculo do valor da média faz-se a soma dos valores e divide-se pelo número de observações da série.

Mediana (*Md*): É o valor médio de uma série ordenada, que se encontra na posição tal que a probabilidade de um valor escolhido na distribuição situado acima da mediana seja igual à probabilidade de um valor situado abaixo (FARBER; LARSON, 2010).

Moda (*Mo*): É o valor de uma série numérica que ocorre com maior frequência, denominado valor modal. Quando uma série apresenta mais de uma moda é dita multimodal, caso contrário, quando não há valor predominante é chamada amodal.

### *Medidas de Variação ou Dispersão*

Indicam o grau de dispersão dos dados em torno da posição central e descreve a heterogeneidade de uma série numérica. Este parâmetro complementa as informações das medidas de tendência central, dado que podem ser verificados se os valores estão concentrados ou não em torno da média. A medida de variação mais usada é o desvio padrão (*s*), também chamado de afastamento quadrático, que consiste na raiz quadrada positiva da variância (*V*):

$$s = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} \quad (114)$$

A variância é calculada a partir da média dos quadrados dos desvios ( $X_i^2$ ) em relação à média aritmética de um conjunto de dados numéricos de tamanho *N*. A interpretação destes parâmetros pode ser feita da seguinte forma, à medida que se aumenta os valores numéricos a variabilidade também aumentará, assim tem-se maior dispersão em torno da média aritmética, ou seja, maior desvio padrão (FEIJOO, 2010).

Para comparação de variabilidades de diferentes séries de dados, nas situações em que as médias dos conjuntos comparados são muito desiguais ou as unidades de medida são diferentes, deve ser utilizado a medida do coeficiente de variação (*CV*), definido como a proporção da média representada pelo desvio padrão (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009):

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (115)$$

### *Medidas Separatrizes*

São valores da distribuição que a dividem em partes aleatórias. A mediana também é uma medida separatriz de ordem 1/2, porque divide o conjunto de dados em duas partes iguais.

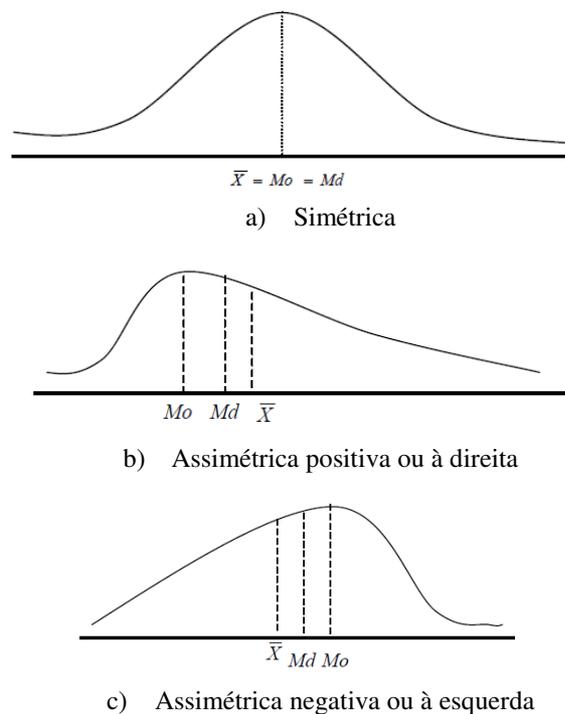
As separatrizes comumente usadas são os quartis, decis e centis, que dividem a distribuição em partes iguais de quatro, dez e cem, respectivamente (FEIJOO, 2010).

Na separatriz por quartil, de ordem 1/4, são calculados três pontos para divisão em quatro partes iguais: Q1 – primeiro quartil, separa os 25% valores mais baixos da distribuição dos 75% restantes; Q2 – segundo quartil, coincide com a mediana e separa o conjunto de dados em 50% e Q3 – terceiro quartil, que separa os 75% dos valores mais baixos da distribuição dos 75% dos valores mais altos (FARBER; LARSON, 2010).

### *Medidas de Formato*

Estas medidas caracterizam o formato da curva de uma distribuição de frequências. As mais precisas são o coeficiente de assimetria e de curtose (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009). A assimetria é definida como o grau de afastamento de uma distribuição da unidade de simetria, assim existem basicamente três formatos como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Formatos de Distribuição de Frequências.



**Fonte:** Correa (2003).

Conforme observado, em uma distribuição simétrica os valores da média, mediana e moda são iguais ( $Mo=Md=\bar{X}$ ) e nas distribuições assimétricas tem-se a assimetria positiva ou à

direita ( $Mo < Md < \bar{X}$ ) e a assimetria negativa ou à esquerda ( $\bar{X} < Md < Mo$ ). Existem fórmulas para o cálculo do coeficiente de assimetria (CORREA, 2003):

1º Coeficiente de Pearson:

$$AS = \frac{\bar{x} - Mo}{s} \quad (116)$$

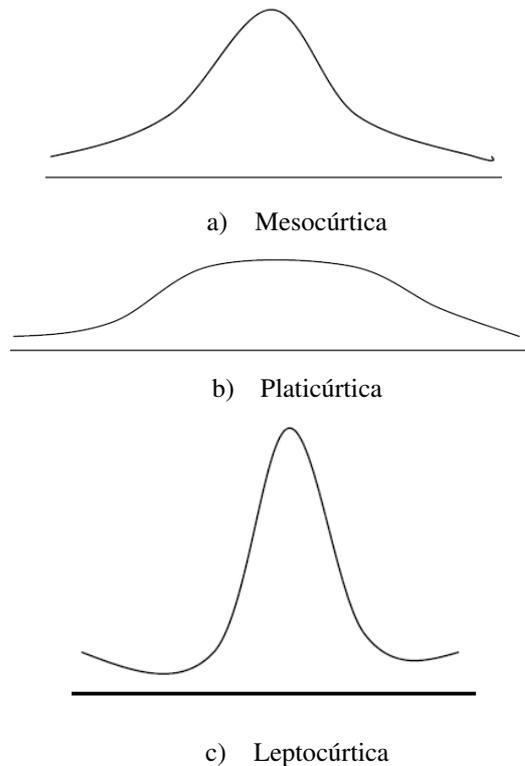
2º Coeficiente de Pearson:

$$AS = \frac{Q_1 + Q_3 - 2Md}{Q_3 - Q_1} \quad (117)$$

Logo,  $AS=0$  diz-se que a distribuição é simétrica,  $AS>0$  é assimétrica à direita e  $AS<0$  assimétrica negativa.

Além do grau de assimetria, a curtose representa uma medida de análise do grau de achatamento de uma distribuição em relação à distribuição de referência (mesocúrtica) chamada curva padrão ou curva normal. De acordo com o nível de curtose, as curvas de frequência são classificadas em três tipos de acordo com a Figura 15:

Figura 15 – Classificação do Grau de Curtose das Curvas de Distribuição.



**Fonte:** Correa (2003).

O grau de curtose pode ser calculado a partir da expressão:

$$k = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})} \quad (118)$$

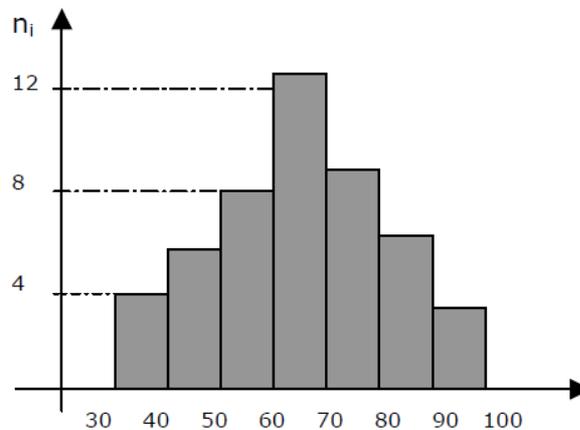
No cálculo do coeficiente de curtose ( $k$ ),  $P_{90}$  e  $P_{10}$  são os valores do percentil 90 e 10, respectivamente. Quando  $k = 0,263$  a curva é mesocúrtica,  $k > 0,263$  platicúrtica e  $k < 0,263$  leptocúrtica (CORREA, 2003).

#### 2.4.2.2 Representação Gráfica de Dados

##### *Histogramas*

É uma ferramenta para representação gráfica das distribuições de frequências de determinado espaço amostral e consiste em um grupo de retângulos contíguos, em que a base é igual à amplitude do intervalo e a altura proporcional à frequência das respectivas classes conforme mostrado na Figura 16 (LANDIM; YAMAMOTO, 2013).

Figura 16 – Representação Gráfica do Histograma.



**Fonte:** Correa (2003).

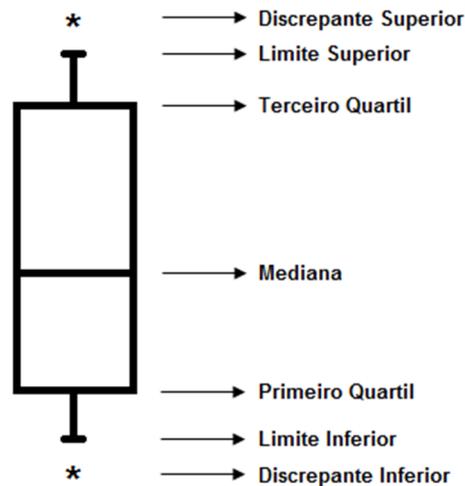
##### *Diagramas de Caixa*

Neste tipo de gráfico são informados cinco números que apresentam as distribuições de localização, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes. Os diagramas de caixa, também chamados de *boxplot*, são construídos a partir da posição central dos valores dada pela mediana e da medida de dispersão da amplitude interquartílica. Antes disso, são definidos os valores dos

limites superior e inferior, com linhas, para cima e para baixo, iniciando no retângulo, denominadas bigodes (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009).

Os valores discrepantes (*outliers*) são aqueles considerados abaixo ou acima dos limites de amplitude da caixa e recebem uma representação individual por meio de uma letra ou símbolo. A Figura 17 ilustra a configuração desse tipo de gráfico.

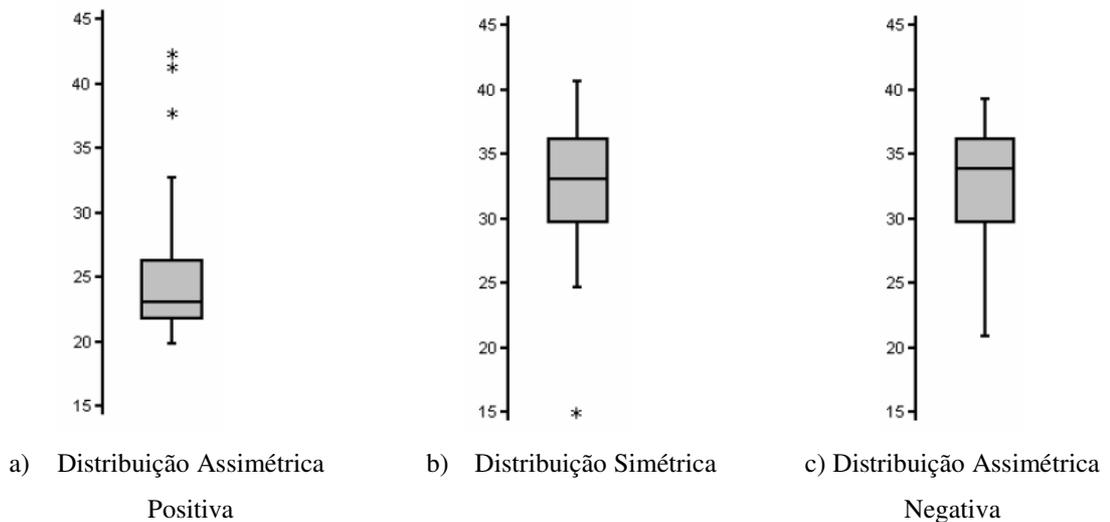
Figura 17 – Representação do Diagrama de Caixa.



Fonte: Autoria Própria (2018).

O *boxplot* permite a visualização das características de assimetria de um conjunto de dados e o tamanho das caudas da distribuição. As caudas são as linhas que se iniciam no retângulo e terminam nos *outliers*. A Figura 18 mostra como é realizada a análise de simetria:

Figura 18 – Análise de Assimetria com o uso de *boxplot*.



Fonte: Machado, Piana e Selau (2009).

Em que cada gráfico representa uma:

- Distribuição assimétrica positiva, com três *outliers* superiores;
- Distribuição simétrica, com um *outlier* inferior;
- Distribuição assimétrica negativa, sem valores discrepantes.

### 2.4.3 Distribuição de Probabilidade

A teoria das probabilidades apresenta os conceitos de modelo determinístico e probabilístico, na prática os métodos determinísticos correspondem a determinada lei ou cálculo, em que fatores não controláveis pelo experimentador são desconsiderados. De outro lado existem fenômenos que se referem a um conjunto de medições repetidas formando um conjunto de valores distintos produzindo uma distribuição baseada em experiências probabilísticas ou aleatórias (FERNANDES, 1999).

Processos aleatórios ou probabilísticos tem muitas possibilidades de resultados, assim determinados parâmetros de um sistema podem ser modelados por uma função que transforma estas medidas em um conjunto numérico chamado espaço amostral. Cada variável deste conjunto pode apresentar um valor do subconjunto dos números reais, estes valores são chamados de variáveis aleatórias (MACHADO; PIANA; SELAU, 2009).

As variáveis aleatórias podem ser discretas ou contínuas, dado que o produto de determinado experimento pode admitir um número finito de valores ou uma quantidade infinita de mensurações em uma escala contínua. Por consequência, definido o tipo de variável aleatória, existe a necessidade de calcular os valores das probabilidades correspondentes, este conjunto de variáveis e probabilidades é denominado distribuição de probabilidades (CORREA, 2003).

#### 2.4.3.1 Função de Probabilidade

Seja uma variável aleatória discreta  $X$ , que pode assumir os valores  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , as probabilidades  $p(x_i)$  ou  $f(x_i)$  formam a distribuição das probabilidades de  $X$ . Logo, são satisfeitas as seguintes condições (FERNANDES, 1999):

$$0 \leq f(x_i) \leq 1, i=1, 2, \dots, n \text{ e } \sum_{i=1}^n f(x_i) = 1$$

A função  $f(x)$  é chamada função de probabilidade da variável aleatória discreta  $X$ . A função de probabilidade acumulada designa as porções de probabilidade dos valores associados a cada  $x_i$ . O somatório destas porções resulta na probabilidade  $F(x_i)$  dada por:

$$P(X \leq x_i) = F(x_i) = \sum_{k=1}^i f(x_k)$$

Nos casos em que  $X$  é uma variável aleatória contínua, sendo  $f(x)$  a função de probabilidade, esta recebe o nome de função densidade de probabilidade (fdp) e a função distribuição acumulada é definida por:

$$P(X \leq s) = F(s) = \int_{-\infty}^s f(x)dx$$

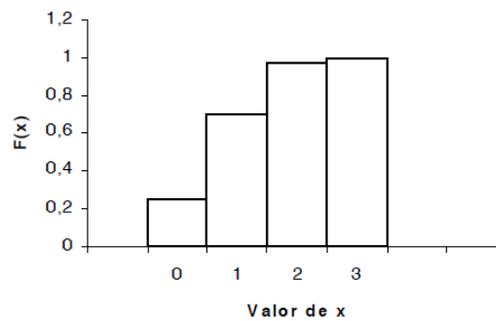
$$P(r \leq X \leq s) = F(s) - F(r) = \int_r^s f(x)dx$$

Logo,

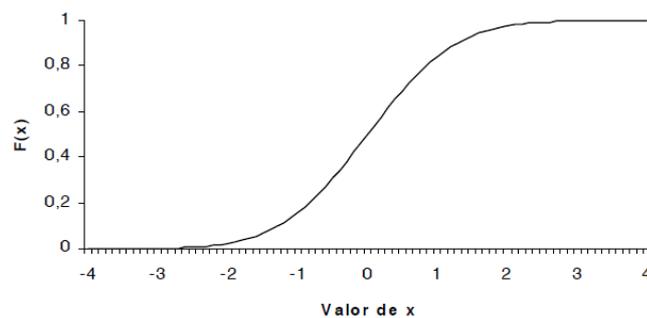
$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

A Figura 19 mostra as representações gráficas das funções de probabilidade acumulada para variáveis aleatórias discretas e contínuas.

Figura 19 – Funções de Probabilidade Acumulada.



a) Discreta



b) Contínua

Fonte: Fernandes (1999).

Conforme observado uma distribuição de probabilidade discreta pode ser representada graficamente por um histograma e uma distribuição de probabilidade contínua pode usar a função densidade de probabilidade (FARBER; LARSON, 2010).

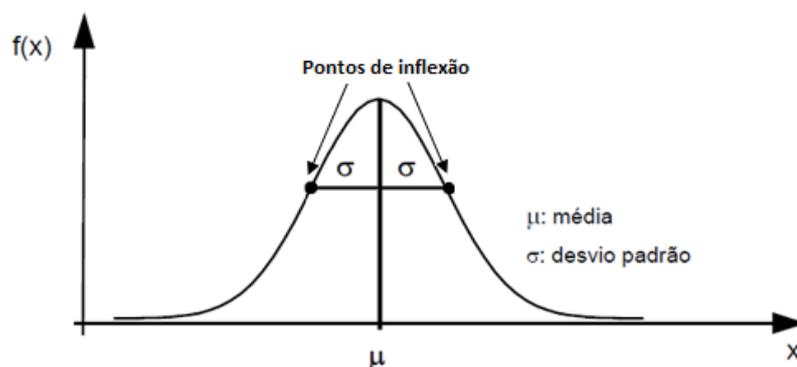
#### 2.4.3.2 Distribuição Normal Padrão

A distribuição de probabilidade contínua mais importante em estatística é a chamada distribuição normal ou curva normal, visto que pode ser usada para modelar grupos de mensuração de dados em diversas áreas da natureza, indústria e negócios. A curva normal padrão apresenta as seguintes propriedades (FARBER; LARSON, 2010):

- Média, mediana e moda de valores iguais;
- Forma de sino e simetria em torno da média;
- Área total sob a curva igual a um;
- Comportamento assintótico da curva à medida que os valores se distanciam da média;
- Existem pontos de inflexão, na qual a curva muda a orientação de decrescente para crescente.

A Figura 20 apresenta graficamente as propriedades da distribuição de probabilidade normal:

Figura 20 – Distribuição Normal.



**Fonte:** Adaptado de Correa (2003).

### 2.4.4 Interpolação Espacial

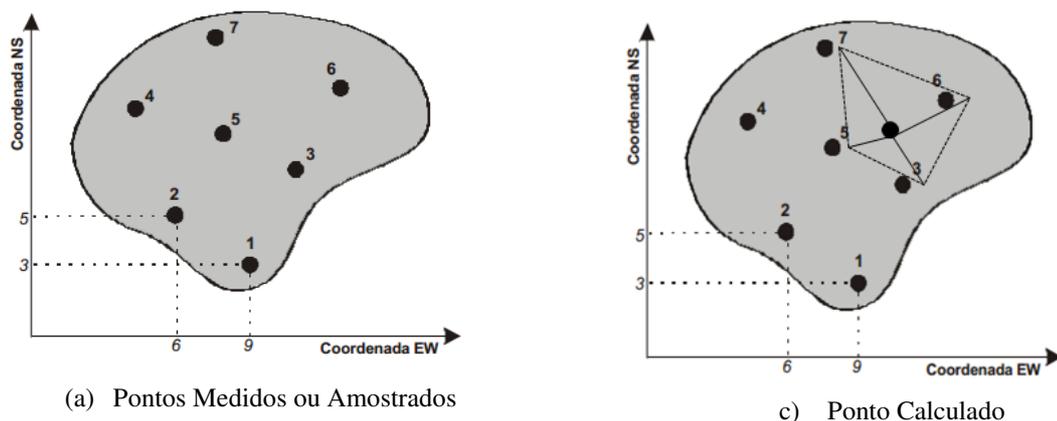
A primeira fase para desenvolvimento de um estudo espacial é a definição do delineamento experimental, que envolve, entre outros procedimentos, a escolha da técnica de coleta de amostras e da malha de amostragem. As malhas de amostragem podem ser do tipo (LANDIM; YAMAMOTO, 2013):

- Aleatória, quando a distribuição dos pontos de coleta é casual;
- Agregada ou agrupada, quando ocorrem grupos de pontos mais próximos;
- Regular ou homogênea, quando os pontos estão regularmente espaçados.

A Figura 21 mostra uma área hachurada em cinza, representando uma “unidade de conservação” qualquer ou parte dela. Os pontos representam amostras coletadas, na qual podem ser valores medidos de uma grandeza adimensional como uma área, o centróide de uma outra técnica de amostragem ou amostras em trilhas.

A seguir é demonstrado um método de interpolação para o cálculo de um valor não amostrado, nesse caso pode ser estimado um valor dentro da área delimitada pelos pontos de medição 3, 5, 6 e 7:

Figura 21 – Tipos de Pontos em uma Região de Análise.



**Fonte:** Adaptado de Corsi, Landim e Monteiro (2002).

Nos pontos de 1 a 7 são medidas as variáveis em estudo, em seguida, a partir das coordenadas de cada ponto e dos valores medidos da variável nesses pontos se obtém um mapa da distribuição espacial com o uso de um algoritmo de interpolação. As coordenadas

geográficas de cada ponto devem ser obtidas no mesmo sistema de referência (CORSI; LANDIM; MONTEIRO, 2002).

Diz-se que o mapa da distribuição espacial ou superficial é estimado, predito ou interpolado, assim pontos não amostrados serão calculados dentro da região em análise. Esse é o significado de interpolação e cada método influencia diretamente os resultados dos mapas de contorno e valores estimados (FIALHO et al., 2018).

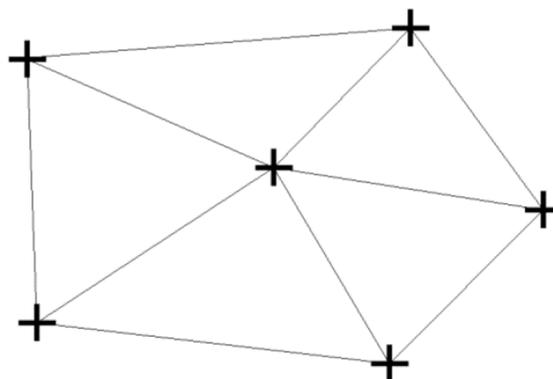
#### 2.4.4.1 Modelos Determinísticos Locais

São considerados os casos mais simples de cálculos de estimação para geração de uma superfície, também chamados de modelos determinísticos locais, consideram o ajuste de uma função bidimensional que resulta em um valor proporcional à intensidade dos pontos amostrados. A formulação geral para o estimador determinístico local é dada por (CÂMARA; CAMARGO; FUCKS, 2004):

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} Z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (119)$$

Na equação (119) os parâmetros  $\hat{Z}_i$  e  $\hat{Z}_j$  representam os valores estimados e amostrados, respectivamente, dado um ponto  $i$  qualquer da grade próximo da amostra  $j$ . Para cada valor calculado existe um fator de ponderação  $w_{ij}$ , que determina o grau de influência do ponto amostrado. Um exemplo de modelo determinístico local é o método da triangulação linear, em que cada local toma o valor, ponderado ou constante, da média calculada pelos vértices de um triângulo das amostras conforme ilustrado na Figura 22 (CORREIA, 2010):

Figura 22 – Método da Triangulação Linear.



Fonte: Correia (2010).

Existem algumas variações de esquemas de interpolação, como por exemplo: a) por vizinho mais próximo b) por média simples e c) por média ponderada. O método do vizinho mais próximo considera apenas um valor de amostra vizinho ao ponto interpolado e o por média simples calcula a média dos valores medidos vizinhos para estimação de uma cota da grade regular. O cálculo por média ponderada determina valores de peso para cada amostra, que na prática utiliza-se um peso maior para pontos medidos mais próximos do ponto da grade (CÂMARA; CAMARGO; FUCKS, 2004).

O método do Inverso da Distância Ponderada (IDP) determina os valores dos pesos de acordo com a seguinte fórmula (CARUSO; QUARTA, 1998):

$$w(d)=\begin{cases} \frac{1}{d_{\text{mín}}^2} & \text{se } d \leq d_{\text{mín}} \\ \frac{1}{d^2} & \text{se } d_{\text{mín}} \leq d \\ 0 & \text{se } d_{\text{máx}} \geq d_{\text{mín}} \end{cases} \quad (120)$$

A Tabela 11 apresenta as principais vantagens e desvantagens desse método:

Tabela 11 – Vantagens e Desvantagens do método IDP.

Vantagens	Desvantagens
Simplicidade na implementação	Sensível à função de ponderação
Algoritmo bastante utilizado na literatura e disponível em muitos <i>softwares</i>	É afetado pela distribuição desigual de pontos amostrados
Estimador para propósitos gerais e de pouco tempo de processamento	Não calcula valores de $Z_i$ maiores ou menores que os limites medidos dos dados
Fidelidade aos valores amostrados	Características preditivas escassas
Adequado para analisar variações de pequena amplitude na grade regular	Não identifica a influência de valores locais atípicos

**Fonte:** Adaptado de Corsi, Landim e Monteiro (2002).

Diferentemente das técnicas que ponderam a distância e fornecem transição abrupta no cálculo de interpolação, o método da curvatura mínima, também chamado *spline*, oferece resultados de superfícies mais suaves (MATOS, 2005). São utilizados polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto da série de dados, diferentemente de outros métodos que realizam a interpolação de todo o conjunto com apenas um polinômio de grande ordem (MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

As *splines* podem ser usadas para melhorar a resolução de modelos digitais em malha regular, nos casos de necessidade do refinamento da malha original. Assim, os interpoladores *splines* bilinear e bicúbico são os mais utilizados, sendo o bilinear de maior processamento do que o bicúbico, mas usado somente nos casos que não se exige precisão (MATOS, 2005).

A Tabela 12 apresenta as principais vantagens e desvantagens deste método:

Tabela 12 – Vantagens e Desvantagens da técnica *spline*.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Superfície estimada é independente da distribuição dos dados e da presença de ruído; a mais suave entre as geradas pelos outros algoritmos que ajustam superfícies aos dados amostrados	Superfície suave é gerada, caso realmente exista ou não.
Superfície é absolutamente fiel aos dados originais se houver apenas um valor amostrado por célula. Sendo capaz de estimar além dos valores máximo e mínimo dos dados amostrados.	Na existência de dados nas proximidades das bordas pode ocorrer geração de depressões ou picos no mapa.
Redução de ondulações irreais ou ruídos matemáticos (artefatos), com exceção nas bordas e interior de células sem amostragem	Surgimento de artefatos em células sem pontos amostrados ou caso um número insuficiente de interações for especificado.

**Fonte:** Adaptado de Corsi, Landim e Monteiro (2002).

#### 2.4.5 Modelagem Geoestatística

Os métodos geoestatísticos são modelos probabilísticos para análise da autocorrelação dos dados, que expressa a intensidade da convergência entre amostras medidas em relação à distância e direção (BURROUGH, 1986 apud MATOS, 2005). Nesses modelos a geoestatística é algo mais complexo do que apenas a interpolação, visto que incluem a análise exploratória dos dados, análise estrutural de correlação espacial, validação do modelo e cálculo estatístico da distribuição superficial (DINGXIN et al., 2016).

Cita-se a krigagem como a principal técnica dentro da geoestatística, na qual incorporou conceitos da estatística clássica à teoria das variáveis regionalizadas. Uma variável regionalizada considera efeito aleatório e regional de um atributo, dessa forma as medições podem variar entre si e são dependentes da localização no espaço, logo a teoria assume que existe maior semelhança entre pontos mais próximos do que entre pontos mais distantes (MATHERON, 1963).

A interpolação por técnicas geoestatísticas consideram o erro associado a cada valor calculado, diferentemente dos métodos convencionais, dessa forma a krigagem consiste em um método de interpolação linear não tendencioso e com variância mínima, visto que se processa

com o uso da modelagem de um semivariograma, por isso é reconhecida como a melhor estimativa linear imparcial, *Best Linear Unbiased Estimate* (BLUE) (CARUSO; QUARTA, 1998).

#### 2.4.5.1 Semivariograma

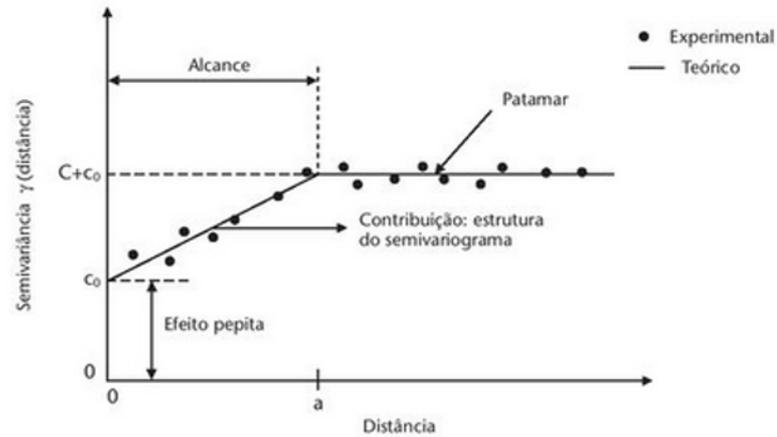
Para análise da variabilidade espacial do comportamento das variáveis regionalizadas são utilizadas ferramentas como suporte às técnicas de krigagem e para representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço, chamadas semivariogramas (DRUCK et al., 2004 apud AMARAL; COLAÇO; MOLIN, 2015). A construção do semivariograma empírico é realizada após uma análise exploratória criteriosa dos dados (estatística descritiva clássica). A equação do semivariograma é dada por (CLARK, 1977):

$$2 * \gamma(h) = \frac{1}{n} \sum [g(x) - g(x+h)]^2 \quad (121)$$

Em que  $\gamma(h)$  é o valor da semivariância experimental dos pares de dados em função da distância  $h$  de vetores de espaçamento ou *lag*,  $g(x)$  e  $g(x+h)$  é a mesma variável medidas em pontos diferentes e separadas por uma distância pré-estabelecida e constante a uma certa direção (LIMA, 2006). A representação gráfica dos semivariogramas experimentais pode ser ajustada por um modelo matemático que proporcione a máxima correlação espacial possível com os pontos calculados da equação (121). O modelo ajustado é chamado de semivariograma teórico (REICHARDT; TIMM, 2016).

A composição do semivariograma expressa a dependência espacial de determinada variável aleatória. Basicamente três variáveis são definidas para realização dos cálculos da krigagem: efeito pepita, patamar e alcance. É indispensável a determinação correta desses parâmetros para que a interpolação por krigagem represente com eficiência o comportamento da variável em análise (LANDIM; YAMAMOTO, 2013). A Figura 23 mostra a representação do esquema de modelagem e parâmetros de um semivariograma teórico:

Figura 23 – Esquema e Composição dos Semivariogramas Experimental e Teórico.



Fonte: Reichardt e Timm (2016).

Os parâmetros do semivariograma teórico estão descritos na Tabela 13:

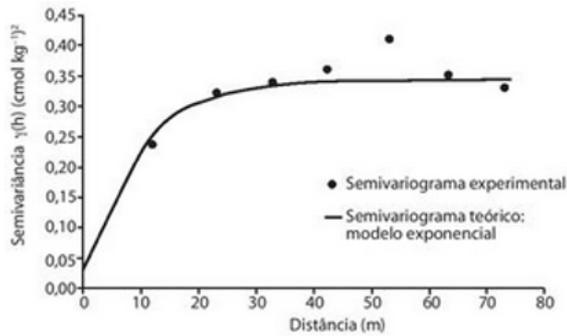
Tabela 13 – Parâmetros do Semivariograma Teórico.

Parâmetro	Descrição
Alcance ( <i>range</i> ) ou amplitude variográfica	Distância na qual as observações da variável apresentam-se correlacionadas espacialmente.
Patamar $C+C_0$ ( <i>sill</i> )	Valor da semivariância correspondente ao alcance. Neste ponto não existe mais dependência espacial, visto que a variância permanece constante.
Efeito Pepita $C_0$ ( <i>nugget effect</i> )	Descontinuidade na origem do semivariograma, que pode ser resultado de erros de medição ou escolha inadequada do tamanho do <i>lag</i> .
Contribuição $C$	Diferença entre o patamar e o efeito pepita

Fonte: Adaptado de Reichardt e Timm (2016).

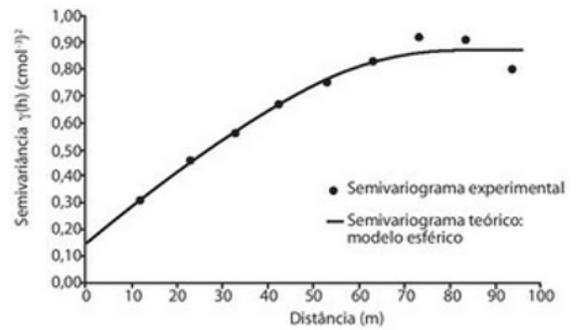
Os principais tipos de modelos teóricos para ajuste de correlação espacial com as respectivas equações estão apresentados na Figura 24 (REICHARDT; TIMM, 2016):

Figura 24 – Exemplos de Modelos Teóricos para Ajuste de Semivariograma.



$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad h \geq 0$$

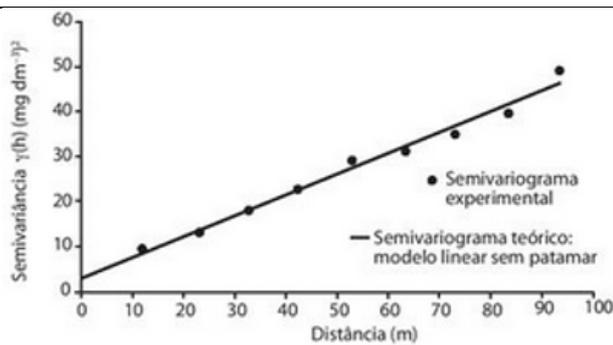
a) Modelo exponencial



$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 \leq h \leq a$$

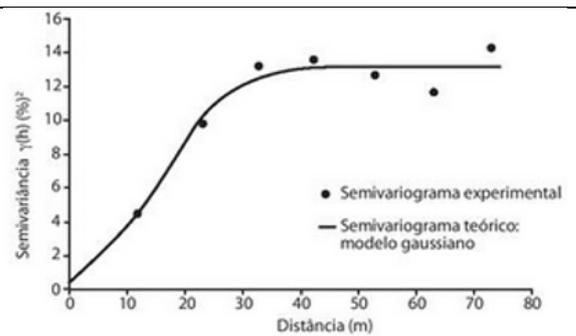
$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

b) Modelo esférico



$$\gamma(h) = C_0 + mh \quad h \geq 0$$

c) Modelo linear



$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right] \right\} \quad h \geq 0$$

d) Modelo gaussiano

Fonte: REICHARDT, TIMM, 2016.

#### 2.4.5.2 Krigagem Ordinária

De posse do semivariograma corretamente determinado, esta ferramenta modela os valores dos pesos no cálculo da krigagem que variam em função da distância entre o ponto a ser estimado e o ponto amostrado (LANDIM; YAMAMOTO, 2013). O valor estimado ( $Z^*$ ) em um ponto é então calculado pela solução de um sistema de matrizes e dado por (CHAUDHARI; KOIVUNEN; OKSANEN, 2018):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (122)$$

Na qual,  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada amostra medida  $z(x_i)$ . Dessa forma, a krigagem ordinária tem duas premissas básicas para se obter a melhor estimativa (PERPINIAS et al., 2017):

- Interpolador não tendencioso, ou seja, erro de estimação em média zero:

$$E[Z^* - z(x_i)] = 0 \quad (123)$$

- Variância da estimativa mínima:

$$Var[Z^* - z(x_i)] = \text{Mínima} \quad (124)$$

Para que a estimativa não seja tendenciosa, a soma dos pesos dos pontos amostrados deve-se igualar a 1:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (125)$$

#### 2.4.6 Validação Cruzada

A validação cruzada de um método de interpolação espacial, do inglês *cross validation*, compreende as técnicas de avaliação de desempenho e do cálculo mais adequado dos dados em estudo, em virtude da variabilidade espacial ser um fator que prejudica a convergência entre valores medidos e simulados (ALVES; VECCHIA, 2011). Igualmente pode ser usada para avaliar o melhor modelo de semivariograma de determinado conjunto de dados coletados e estimar a eficácia da krigagem (LANDIM; YAMAMOTO, 2013).

Essa técnica reside no descarte de uma ou mais amostras medidas da grade regular, em seguida executada a interpolação entre os valores restantes, por consequência, são obtidos

valores simulados relativos às amostras descartadas e, posteriormente, são comparados com os valores reais da variável em análise, modelo denominado *leave-one-out* (HEAP; Li, 2008).

Para essa avaliação normalmente são calculadas as taxas de erros entre amostras e pontos interpolados. Dentre os principais parâmetros de avaliação estão: o Erro Absoluto Médio (MAE) e o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE), conforme apresentados na Tabela 14 (SANTANA et al., 2017):

Tabela 14 – Métodos Estatísticos para Validação Cruzada dos Dados.

<b>Estatística</b>	<b>Identificador</b>	<b>Definição</b>
<b>Erro Absoluto Médio</b>	MAE	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Y_i - X_i]$
<b>Erro Quadrático Médio</b>	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y_i - X_i)^2}$

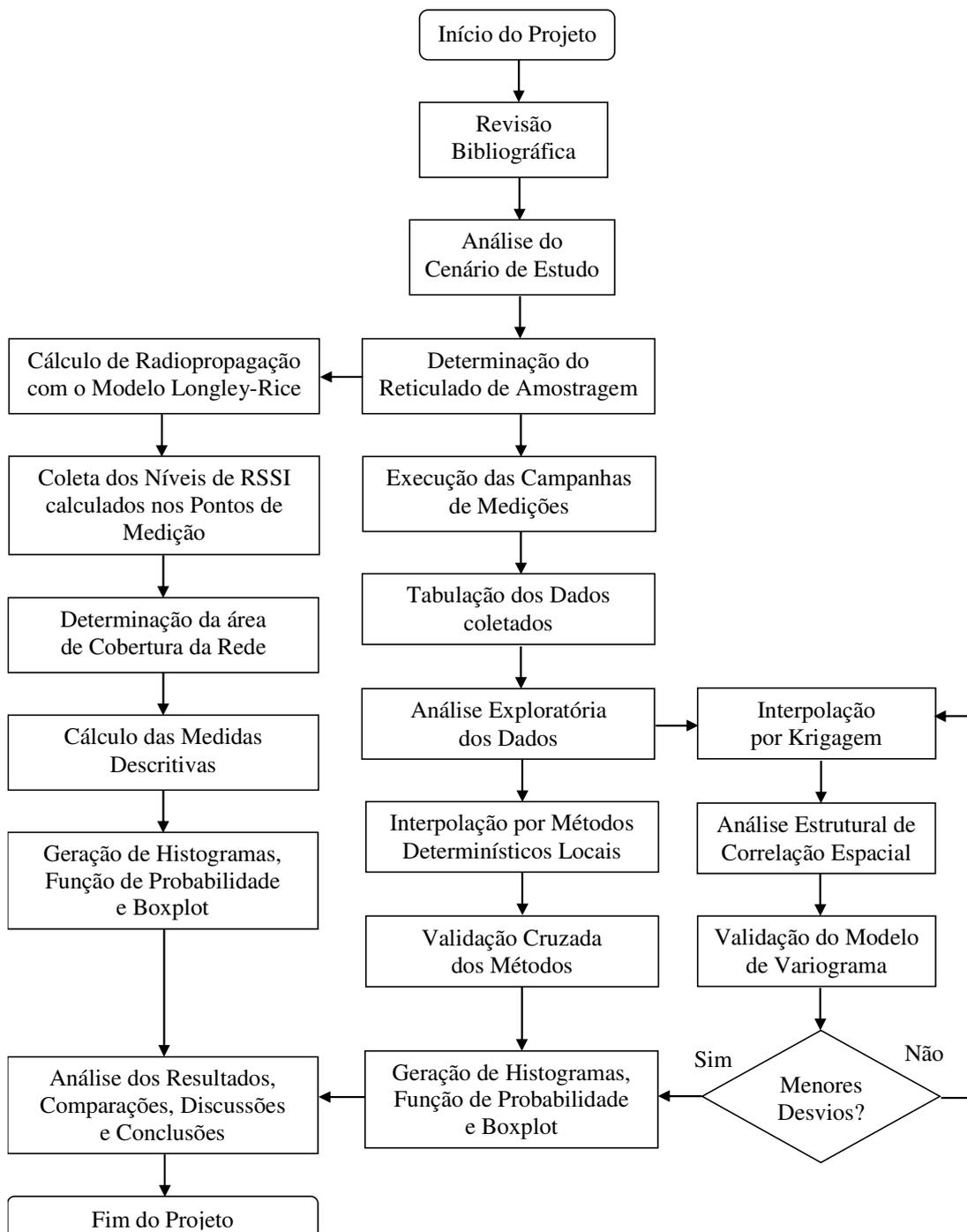
*N*: quantidade de amostras consideradas ou número de pontos medidos; *Y<sub>i</sub>*: valor calculado e *X<sub>i</sub>*: valor medido.

**Fonte:** Adaptado de SANTANA et. al (2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão descritos os ambientes, procedimentos, materiais e sistemas utilizados no desenvolvimento deste trabalho. A metodologia utilizada está descrita pelo fluxograma de processos mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do Processo Metodológico Utilizado.

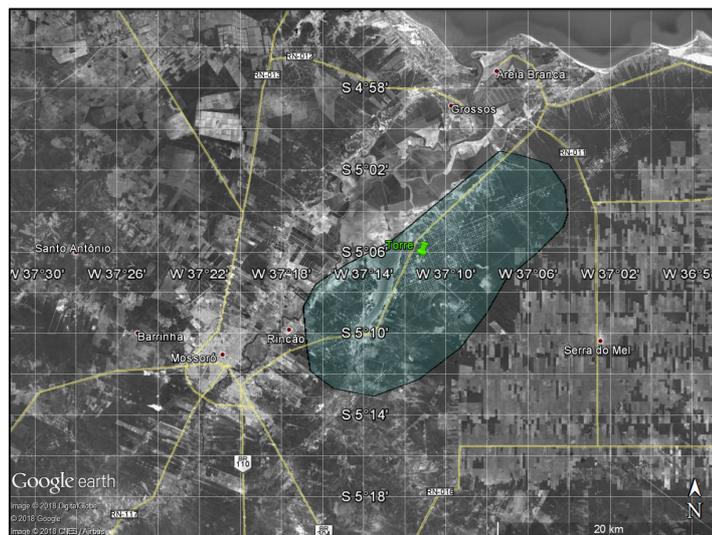


Fonte: Autoria Própria (2018).

A primeira etapa do processo metodológico compreende a análise e coleta de dados e informações do cenário de estudo. O conhecimento sobre a região dos campos de petróleo do Canto do Amaro e a visão geral da infraestrutura da rede sem fio são importantes e possibilitam uma melhor compreensão da problemática deste trabalho e fornecem as entradas necessárias para as simulações computacionais e processamentos dos dados.

A concessão de Canto do Amaro localiza-se entre os municípios de Mossoró e Areia Branca, a uma distância de aproximadamente 260 km de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte. Geologicamente está situado na porção nordeste da Bacia Potiguar emersa, sobre um alto estrutural do embasamento denominado de “Alto de Mossoró”, adjacente à “linha de charneira” de Areia Branca. A área de desenvolvimento requerida para o Campo de Canto do Amaro é de aproximadamente 363 km<sup>2</sup> (ANP, 2016).

Figura 26 – Mapa de Localização da Região de Análise.



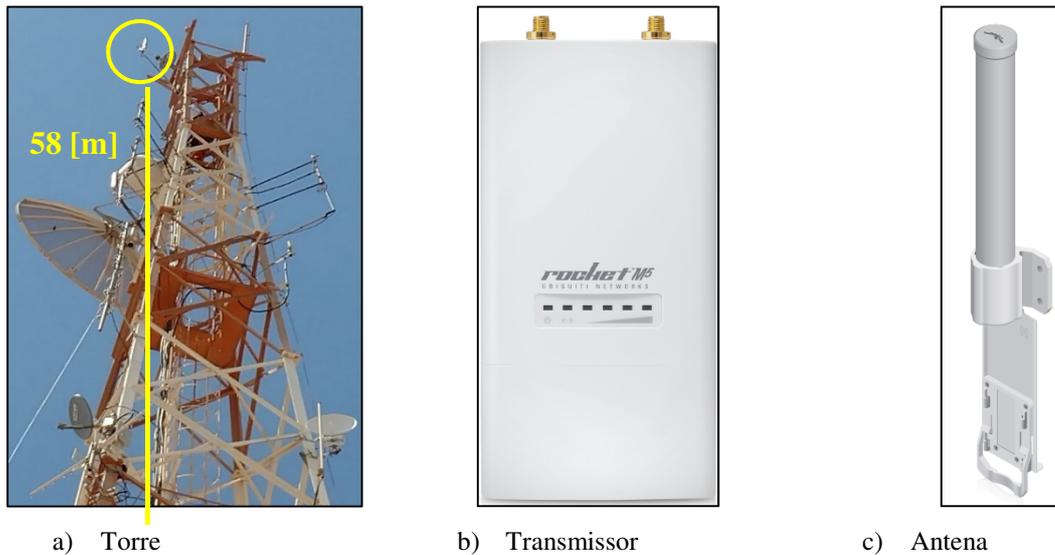
**Fonte:** Exportado da aplicação *Google Earth pro*<sup>®</sup>, versão 7.

A região caracteriza-se por um relevo acidentado, vegetação densa e sem obstruções de prédios, considerada uma zona rural porque não existe estruturas urbanas no entorno da estação central. Dessa forma existem fatores que podem comprometer a comunicação de radioenlace sob o ponto de vista dos modelos de propagação eletromagnética.

No ponto verde da Figura 26 (Latitude 5°6'19" ou 9435402S) e (Longitude 37°11'17"O ou 700859.73E) se encontra a infraestrutura de telecomunicações da estação base ou concentradora, composta por uma torre do tipo autoportante, com aproximadamente 60 metros de altura (Figura 27a). A estação base fornece os serviços de dados e voz para usuários localizados em estações satélites e sondas terrestres na cadeia produtiva de petróleo da região.

Na torre se encontra instalado o equipamento transmissor, responsável pela comunicação sem fio na frequência de 5,8 GHz do fabricante Ubiquiti® e modelo *Rocket M5* (Figura 27b), que possui uma antena conectada, de modelo AMO-5G10 (Figura 27c). O transmissor se encontra a uma altura em torno de 58 metros e atende a cobertura das estações de telecomunicações satélites e móveis. As demais especificações técnicas podem ser consultadas na seção Anexos.

Figura 27 – Fotos dos Componentes da Estação base ou concentradora.



**Fonte:** a) Autoria Própria (2018), b) Ubiquiti® (2017) e c) Ubiquiti® (2017).

Como forma de ilustrar as estações clientes da estação base, a Figura 28 apresenta uma sonda terrestre atuando corretivamente em um poço de petróleo.

Figura 28 – Foto da Sonda Terrestre de Manutenção de Poços.

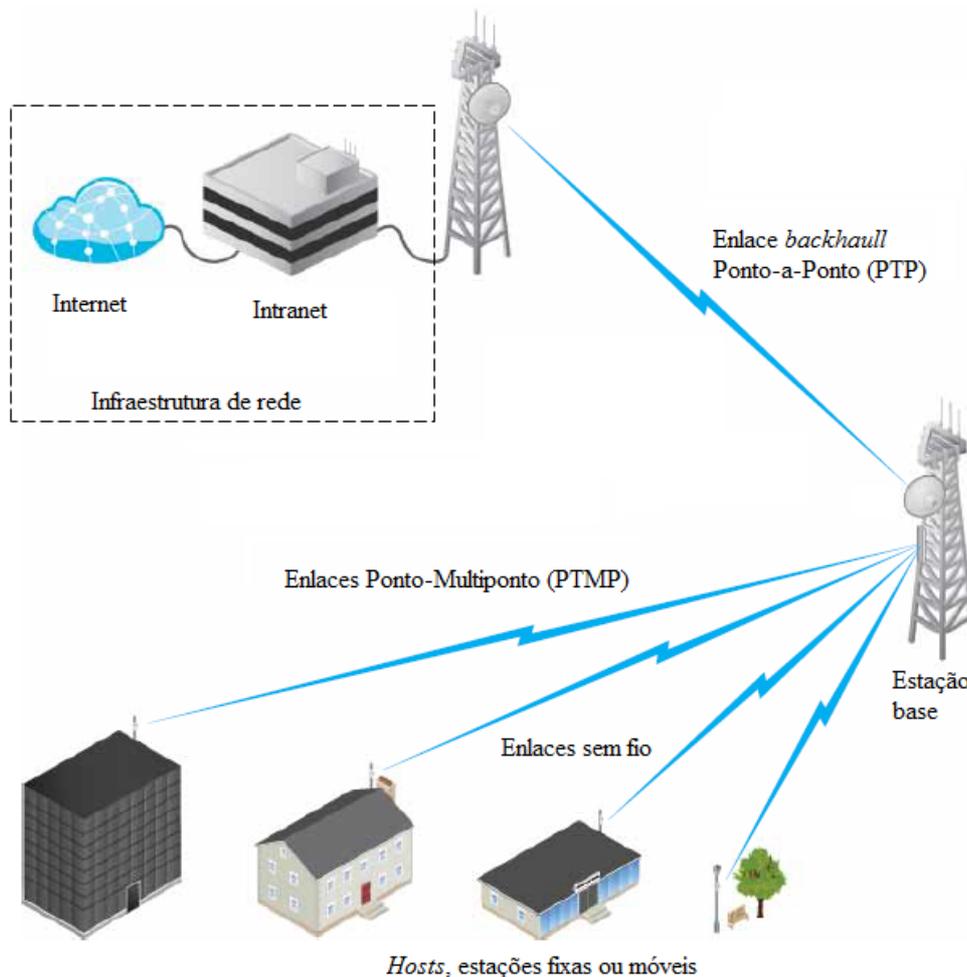


**Fonte:** Autoria Própria (2018).

Nesta sonda existe uma infraestrutura básica de rede sem fio, que se conecta à estação base, com o objetivo de fornecer comunicação de dados e voz para os usuários realizarem as atividades operacionais. O sistema de rede sem fio localizado nas estações clientes, necessita de um adequado nível de potência de sinal recebido (RSSI), do inglês *Received Signal Strength Indicator*. Caso este parâmetro não seja compatível, pode acarretar sucessivas falhas de comunicações para o sistema e, por consequência, impactar a operação das sondas terrestres.

Esta arquitetura de comunicação de dados se baseia no padrão IEEE 802.11n (IEEE, 2016). Os principais elementos que compõem um sistema de rede sem fio estão detalhados na Figura 29 e na Tabela 15.

Figura 29 – Descrição do Sistema de Comunicação sem fio.



**Fonte:** adaptado do manual do site do fabricante Ubiquiti®<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Acesso em 17 de setembro de 2017, disponível em: [https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketm/RocketM\\_DS.pdf](https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketm/RocketM_DS.pdf)

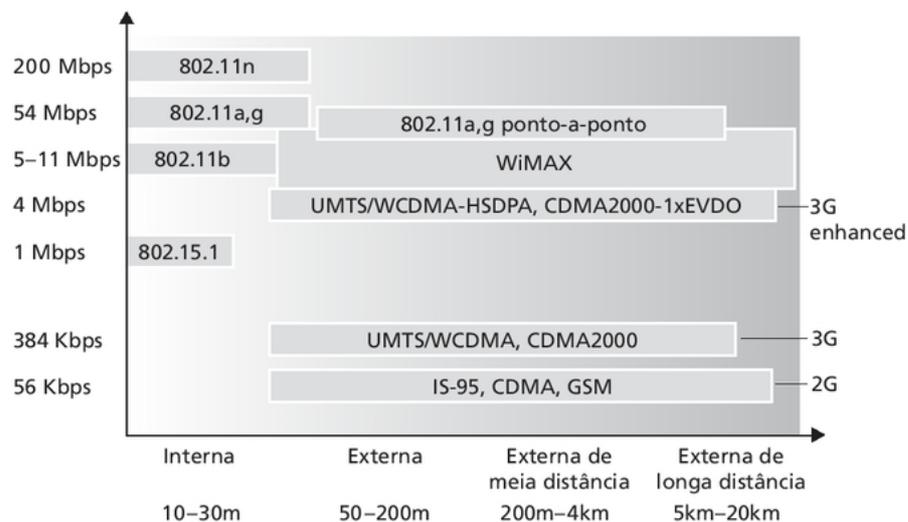
Tabela 15 – Descrição dos Componentes do Sistema de Comunicação sem fio.

Elemento	Descrição
Estações fixas, móveis ou <i>hosts</i>	Estações clientes que contém equipamentos de sistemas finais para executar aplicações (e. g. laptop, palmtop, PDA, telefone).
Estação base	Infraestrutura responsável pelo envio e recebimento de dados com os <i>hosts</i> , normalmente é responsável pela coordenação das transmissões ponto-multiponto associadas aos <i>hosts</i> .
Enlaces sem fio	Meio de conexão sem fio entre <i>hosts</i> e uma estação base (Ponto-a-Ponto, PTP, ou Ponto-Multiponto, PTMP). Backhaul é o enlace responsável por realizar a conexão entre o núcleo da rede e a estação base.
Infraestrutura de rede	É o núcleo da rede com a qual uma estação objetiva se comunicar (Intranet ou Internet).

**Fonte:** Adaptado de Forouzan (2008) e Ubiquiti® (2017).

Um enlace de comunicação sem fio opera com diversas taxas de transmissão, dependendo da distância, das condições do canal e do número de usuários conectados à rede sem fio. A Figura 30 apresenta as características de área de cobertura com a taxa de transmissão de alguns dos principais serviços de comunicação sem fio (KUROSE; ROSS, 2013).

Figura 30 – Parâmetros Associados aos Sistemas de Redes sem fio.



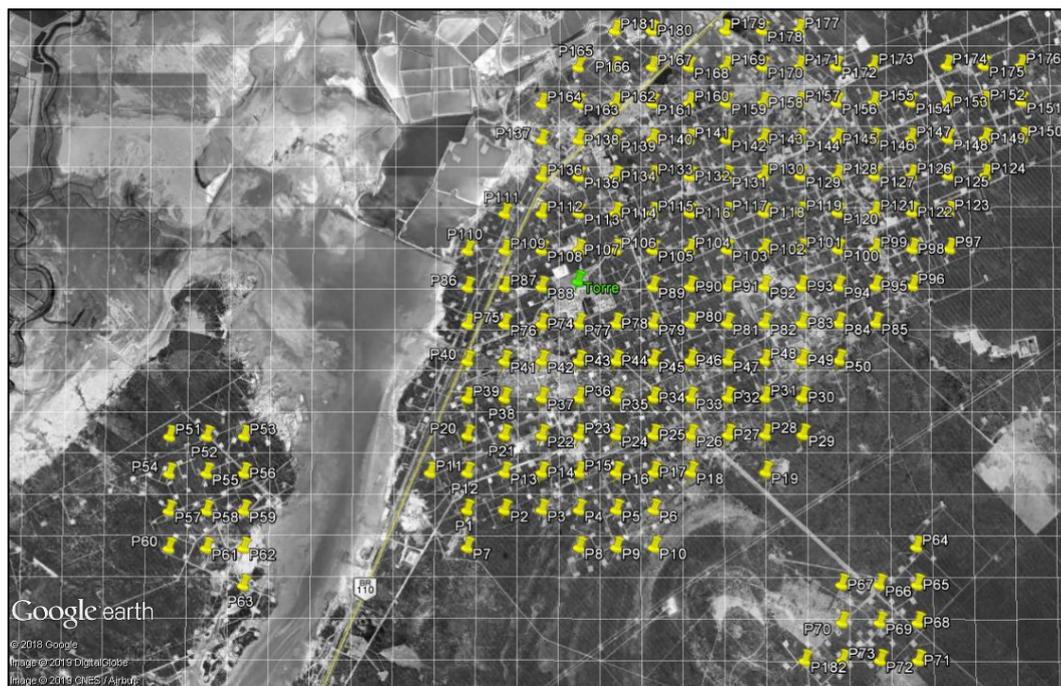
**Fonte:** Kurose e Ross (2013).

Após a análise do cenário estudo se iniciam as estratégias para as campanhas de medição em campo. A primeira etapa consiste no planejamento de uma malha em grade regular, chamada reticulado ou *grid* de amostragem. A construção desta malha ocorre de forma sistemática, pois permite a determinação dos pontos de coleta de dados da região em análise (KONAK, 2010).

O reticulado de amostragem foi projetado sobre o mapa da região de estudo georreferenciado no programa *Autocad*<sup>®</sup>(2017). Com o georreferenciamento do mapa é possível obter as coordenadas geográficas dos pontos de controle no sistema UTM. Foram definidos 182 pontos de controle, a partir da inserção de uma grade regular com espaçamento de 500 UTM, o que configura um vetor de espaçamento limitado em distâncias de 500 metros no cálculo de interpolação espacial.

No critério de seleção dos vértices da malha foi considerado, que cada quadrado da malha deve conter terrenos de poços de petróleo, uma vez que nestas locações as sondas se instalam para a realização dos serviços de manutenção dos sistemas de produção. Os vértices dos quadrados contidos no reticulado de amostragem são os pontos de controle. Com a obtenção das coordenadas geográficas dos pontos de controle, os valores foram tabulados em planilha e inseridos como marcadores no programa *Google Earth pro*<sup>®</sup>(versão 7). A Figura 31 mostra o reticulado de amostragem, desenvolvido como método de apoio à realização das medições em campo.

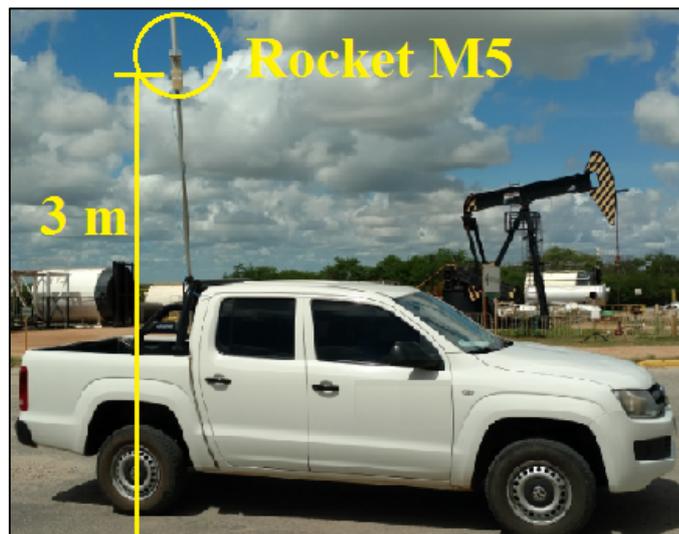
Figura 31 – Reticulado de Amostragem Teórico.



Fonte: Exportado da aplicação *Google Earth pro*<sup>®</sup>, versão 7.

Logo após a geração do *grid*, se iniciam os procedimentos para as medições em campo. Para isto foi necessário equipar um sistema de recepção, que realize a coleta dos níveis de potência dos sinais no campo de atuação da antena transmissora e permite identificar as áreas de sombras em pontos da malha de amostragem, procedimento que compõe o chamado *site survey*. Para isso, empregou-se uma unidade móvel composta por um veículo do tipo *pick-up* com mastro retrátil, que fornece 3 metros de altura, em relação ao solo, para o rádio Rocket-M5 (Figura 32).

Figura 32 – Foto da Unidade Móvel de Recepção.

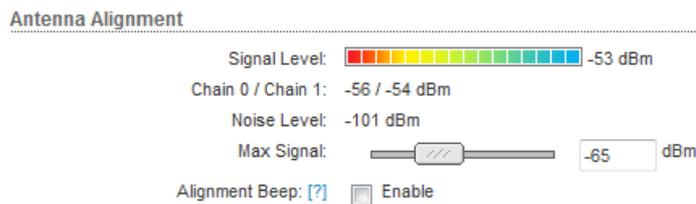


**Fonte:** Autoria Própria (2018).

Durante as campanhas de medições foram coletados os dados próximos aos pontos de controle. Alguns pontos foram inseridos em locais inacessíveis para a viatura, contendo barreiras físicas ou naturais, vegetação, terrenos irregulares, portões ou salinas. O período de realização das medições ocorreu durante o horário diurno e em dias ensolarados, com o objetivo de facilitar a execução da atividade e mitigar a influência de fatores ambientais nos resultados.

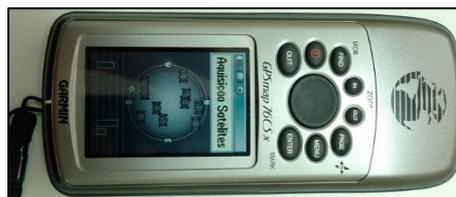
Os trajetos foram realizados numa área de aproximadamente 70 km<sup>2</sup>, com o auxílio de um mapa de localização contendo as estradas, estações, acessos e os pontos de controle. Durante um período de 5 minutos, após a estabilização do sinal de recepção, foram medidos e anotados os níveis de RSSI e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) em cada ponto de medição. A Figura 33 apresenta a interface gráfica do medidor, em nível de sinal, mostrando o valor de RSSI medido, e os equipamentos complementares do sistema de medição em campo.

Figura 33 – Materiais Utilizados para as Medições de Campo.



a) *print screen* da tela do medidor de RSSI

b) Foto do notebook e, ao lado, o injetor PoE



c) Foto do GARMIN GPSMAP®76CSx

**Fonte:** Autoria Própria (2018).

O rádio transceptor digital apresenta uma solução de sistema operacional chamada *AirOS*, na versão 5, acessado com o uso do protocolo *Power Over Ethernet* (PoE). No *AirOS* diversos serviços e protocolos podem ser explorados, dentre esses recursos existe uma ferramenta de direcionamento de antena (*Antenna Alignment*), logo o RSSI pode ser obtido diretamente da tela do navegador. O GPS forneceu as coordenadas geográficas do reticulado de amostragem no sistema de graus, minutos e segundos (GMS), que foram convertidas para UTM no *Google Earth pro*®.

As campanhas de medição fornecem os insumos necessários para os métodos de interpolação espacial. Da mesma forma, foram calculados e coletados os níveis de RSSI nos pontos de medição, com o auxílio do *software Radio Mobile*®, que implementa o modelo de propagação Longley-Rice. Os dados medidos foram tabulados em planilha eletrônica, para início das etapas de tratamento estatístico e de interpolação numérica. A seguir serão descritos os métodos para processamento da interpolação espacial e do modelo Longley-Rice.

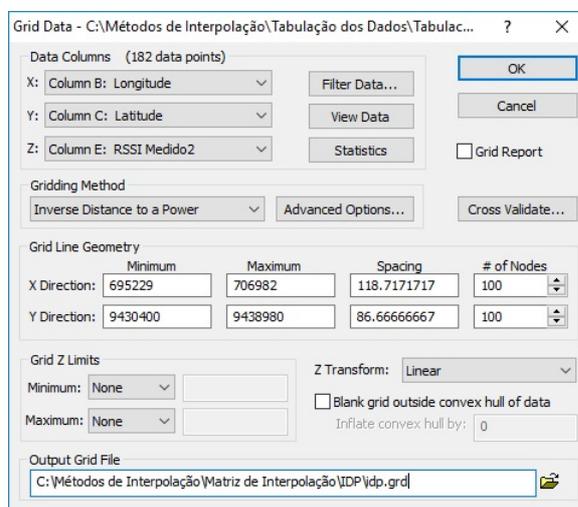
### 3.1 MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

O *software Surfer*<sup>®</sup> (versão 13), do pacote de aplicativos da *Golden Software*<sup>®</sup>, possibilita analisar e modelar mapas de contorno com o uso dos métodos de interpolação espacial. De posse dos dados de RSSI e coordenadas geográficas dos pontos medidos em campo pode-se iniciar os procedimentos para realização de cálculo numérico. Sendo assim, a primeira etapa representa a tabulação dos valores coletados em uma planilha eletrônica do programa, em seguida são calculadas as medidas estatísticas descritivas necessárias para a análise exploratória.

Após a tabulação são geradas as matrizes de interpolação, em que foram selecionados 7 métodos determinísticos locais (triangulação linear, vizinho mais próximo, vizinho natural, mínima curvatura, inverso da distância ponderada, média móvel e regressão polinomial) e 1 método geoestatístico (krigagem ordinária) para análise. A matriz ou grade de interpolação foi definida em ordem 100 e consiste em um conjunto de pontos estimados representados por linhas e colunas contendo as regiões de contornos calculadas pelo método de interpolação.

Os valores dessa matriz são calculados com o uso do módulo *grid data*, que cria um arquivo com a extensão, .grd, então podem ser verificados os resultados da interpolação. Essa ferramenta é utilizada para calcular e analisar as medidas descritivas e de validação cruzada do método. Com a matriz de interpolação é possível gerar os mapas de contorno, figuras que representam o comportamento da distribuição superficial da variável medida em uma região delimitada pelas coordenadas geográficas. A Figura 34 ilustra a tela da ferramenta assumindo como exemplo o procedimento para cálculo do método inverso da distância ponderada:

Figura 34 – Ferramenta *Grid Data*.

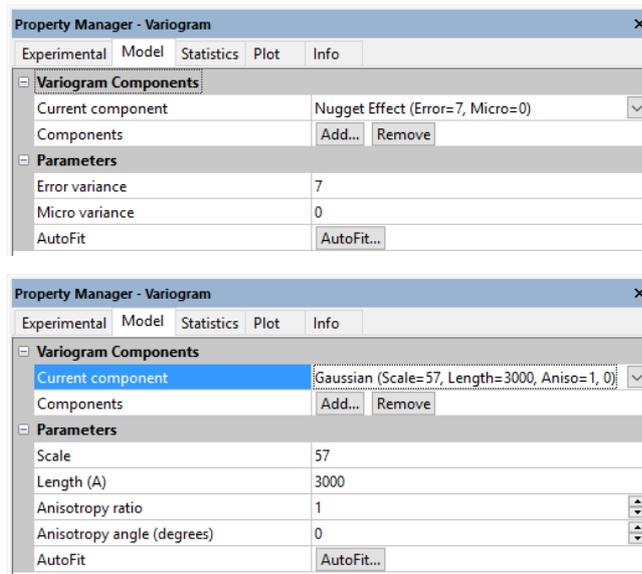


Fonte: *print screen* da aplicação *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

Diferentemente dos métodos determinísticos locais que realizam estimativas mais simples, existem os métodos geoestatísticos como a krigagem, um algoritmo que considera a correlação espacial dos dados e calcula os valores da matriz de interpolação a partir da modelagem de um semivariograma (DINGXIN et al., 2016).

Com o uso do módulo *variogram* podem ser construídos os semivariogramas teóricos, desse modo foram modelados quatro tipos para o conjunto de dados medidos: gaussiano, exponencial, linear sem patamar e esférico. Para cada modelo pode ser inserida a contribuição do efeito pepita ( $C_0$ ), um resíduo somado às componentes de semivariâncias calculadas, à medida que se varia o *lag* (vetores na direção da distância entre dois pontos de interpolação). A Figura 35 mostra a tela de ajuste das propriedades do modelo de semivariograma gaussiano:

Figura 35 – Procedimento de Ajuste do Modelo de Semivariograma.



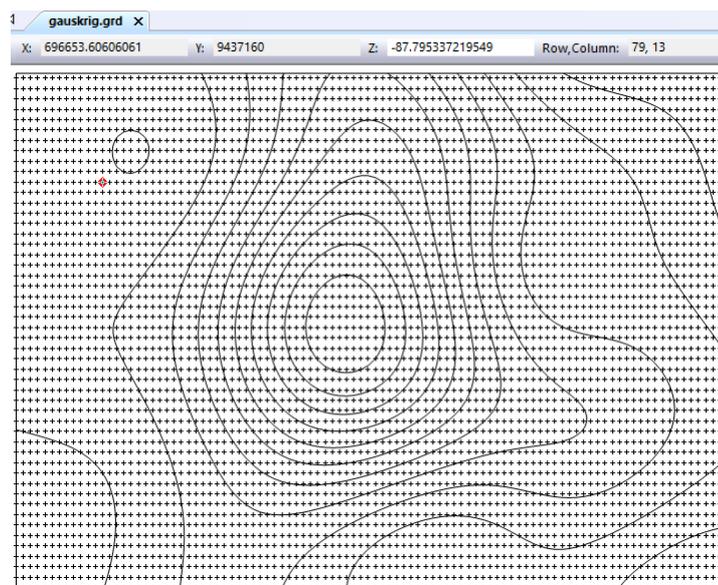
Fonte: *print screen* da aplicação *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

Neste exemplo, foi somada ao modelo ajustado a contribuição do efeito pepita em um valor de 7 dB, com isto o semivariograma é deslocado de baixo para cima e os valores de variâncias calculadas se tornam mais próximas do modelo teórico. Além disso podem ser ajustados os parâmetros de escala, comprimento e anisotropia, nesse exemplo foram configurados um fator de comprimento em 3000 e de escala em 57, a anisotropia permaneceu inalterada e está com o valor padrão. A anisotropia representa o comportamento da variação do fenômeno estudado em diferentes direções (BRANDÃO; GREGO; OLIVEIRA, 2015).

Essas propriedades podem ser modificadas automaticamente, porém o ajuste manual se torna mais eficaz, em alguns casos o modo automático não considera a soma do deslocamento provocada pelo efeito pepita, isto resulta em mapas de contorno sem continuidades, com a distribuição superficial bastante irregular ou valores estimados discrepantes em relação aos parâmetros comuns do sistema em análise.

Após a criação do modelo de semivariograma pode-se calcular os valores da matriz de interpolação. Os valores estimados podem ser lidos diretamente da matriz, cada ponto compreende um valor estimado com o uso da krigagem ordinária e adotando o modelo de semivariograma escolhido para determinação dos pesos. Na Figura 36 foi selecionado o ponto (79,13), linha 79 e coluna 13, na posição em coordenadas geográficas em torno da longitude 696653 e latitude 9437160, com RSSI calculado de -87,79 dBm.

Figura 36 – Matriz de Interpolação com Semivariograma Gaussiano.



**Fonte:** *print screen* da aplicação *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

De posse da matriz de interpolação podem ser gerados os mapas de contorno superficial, que podem ser de duas ou três dimensões, e representam o comportamento da distribuição da intensidade da variável medida em áreas da região analisada.

Alternativamente, existem os mapas de contorno vetorial que indicam com o uso de vetores as direções de tendência de interpolação numérica entre pontos, ou seja, pode-se dizer que o peso é maior na direção de cada vetor (CLARK, 1977). Assim, possibilita analisar áreas que apresentam pontos medidos com maior grau de influência no cálculo numérico.

### 3.2 MÉTODO DE CÁLCULO DO MODELO LONGLEY-RICE

O *software freeware Radio Mobile*<sup>®</sup> (versão 11) permite estimar níveis de RSSI em regiões do mapa geográfico que foram digitalizadas e modeladas no programa, dessa forma as características da topologia do terreno, solo, vegetação, clima, entre outras, são consideradas de acordo com o modelo Longley-Rice.

O *Radio Mobile*<sup>®</sup>, originalmente, foi escrito em linguagem Fortran, e em versões mais recentes foi traduzido para a linguagem C<sup>++</sup>. Executa um algoritmo baseado nos parâmetros da Tabela 9 e processa os cálculos das equações do modelo Longley-Rice. As demais especificações podem ser consultadas na seção Anexos.

A Tabela 16 apresenta os valores das variáveis de entrada para cálculo da área de cobertura do sistema de transmissão provenientes da análise do cenário de estudo e das especificações técnicas dos equipamentos:

Tabela 16 – Dados de Entrada da Região em Análise.

<b>Características</b>	<b>Dados</b>
Faixa de frequência de operação	5500 a 5825 MHz
Distância mínima de referência de enlace	100 m
Topografia do Relevo Predominante	Acidentado
Densidade de Vegetação	Média
Clima	Equatorial
Permissividade média do solo	15
Condutividade média do solo	0,005 S/m
Índice de Refratividade da superfície	360 N-unidades

**Fonte:** Dados extraídos do *Radio Mobile*<sup>®</sup>, versão 11, e manual do rádio *Rocket M5*.

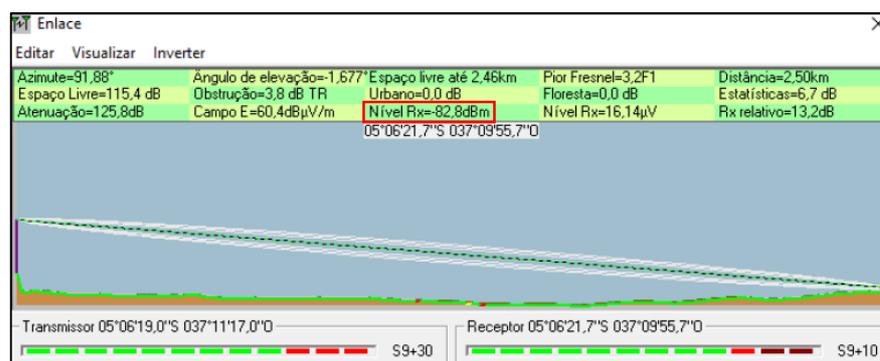
A programação do modelo Longley-Rice foi realizada com os dados da Tabela 16, visando a predição da área de cobertura da estação base e a caracterização das propriedades da rede sem fio concentradora, responsável pelo controle e serviço de tráfego de dados e voz. Complementando esses valores de entrada de dados do cenário de estudo são apresentadas e descritas na Tabela 17 algumas variáveis estudadas no cálculo desse modelo:

Tabela 17 – Dados de Entrada dos Sistemas de Transmissão e Medição.

Materiais	Especificação	Dados
Transmissão	Coordenadas geográficas	5° 6' 19" S 37° 11' 17" O
	Potência de transmissão	27 dBm
	Altura da Antena	58 m
	Topologia da rede	Concentradora
Recepção	Modo Estatístico	Pontual
	Nível de Sensibilidade	- 92 dBm
	Altura da Antena	3 m
Antenas	Tipo	Omnidirecional
	Polarização	Vertical
	Ganho	10 dBi
Cabos e Conectores	Atenuação	3 dB

**Fonte:** Dados extraídos do Radio Mobile®, versão 11, e manual do rádio *Rocket M5*.

A coleta de potência de sinal recebido em um ponto do mapa geográfico destacado na Figura 37 realiza-se com o traçado do perfil do enlace entre as coordenadas da torre de transmissão e a da estação móvel localizada em cada ponto de medição, com as configurações do sistema de radioenlace parametrizadas nas tabelas apresentadas neste tópico. Dessa forma foi realizado esse procedimento de coleta para cada ponto de coordenada geográfica medida em campo.

Figura 37 – Método de Coleta dos Dados no *Radio Mobile*®.

**Fonte:** print screen da aplicação *Radio Mobile*®, versão 11.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta as análises referentes aos procedimentos praticados neste trabalho. Com base nos métodos de interpolação espacial e na teoria da estatística descritiva clássica foram desenvolvidos os resultados da distribuição superficial de potência.

### 4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Este tópico representa a primeira etapa considerada na análise geoestatística de determinado problema e que proporciona uma visão geral dos dados coletados do cenário de estudo. Assim foram construídos histogramas, curvas da função densidade de probabilidade, diagramas de caixa e curvas de dispersão para os valores oriundos das medições de campo e para os dados calculados do modelo Longley-Rice em cada ponto do reticulado de amostragem empírico.

Esta fase compreende a análise exploratória dos dados tabulados, que formata representações gráficas dos resultados dos cálculos das medidas descritivas do ambiente analisado. Esta análise foi desenvolvida com o uso do programa Microsoft Office Excel 2013. O Apêndice A apresenta a planilha com a tabulação dos valores coletados de RSSI medidos em campo e calculados com o modelo Longley-Rice.

#### 4.1.1 Análise da Distribuição de Frequências e Probabilidade

Os histogramas demonstram o comportamento da distribuição de frequências, dentro de determinados limites estatísticos, com isso podem ser observados quais os valores de RSSI de maior ocorrência na tabulação dos dados. A função densidade de probabilidade complementa essa análise, visto que aponta a faixa de níveis da densidade de potência com maior probabilidade de ocorrência, além disso possibilita estudar o grau de curtose e assimetria dos dados coletados.

Os histogramas são construídos com os dados calculados da Tabela 18, Tabela 19 e da tabela do Apêndice B. A Tabela 18 apresenta os parâmetros auxiliares compreendidos pelos valores de mínimo, máximo, média, quantidade de pontos medidos ou tamanho, número de classes, desvio-padrão e incrementos. A quantidade estimada de classes é calculada como a raiz quadrada do tamanho, porém este valor pode ser arredondado para baixo e determina a quantidade de classes.

Tabela 18 – Parâmetros Auxiliares das Medições em Campo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Mínimo	-92	Classes	13
Máximo	-65	Incremento 1	2,07
Média	-82,16	Desvio Padrão	7,08
Mediana	-83	Distorção	0,50
Tamanho	182	Curtose	-0,66
Estimativa de Classes	13,49	Incremento 2	0,14

**Fonte:** Autoria Própria (2018).

O primeiro incremento é o quociente entre a diferença entre os valores máximo e mínimo e a quantidade de classes. O segundo incremento é utilizado no cálculo dos valores da função densidade de massa e corresponde ao quociente entre os valores máximo e mínimo e a quantidade de pontos da função densidade de probabilidade mostrados no Apêndice B. A Tabela 19 mostra os valores dos limites de cada barra do histograma, chamados de corte, que são calculados a partir da soma entre o valor do limite inferior e o produto do valor da classe com o primeiro incremento.

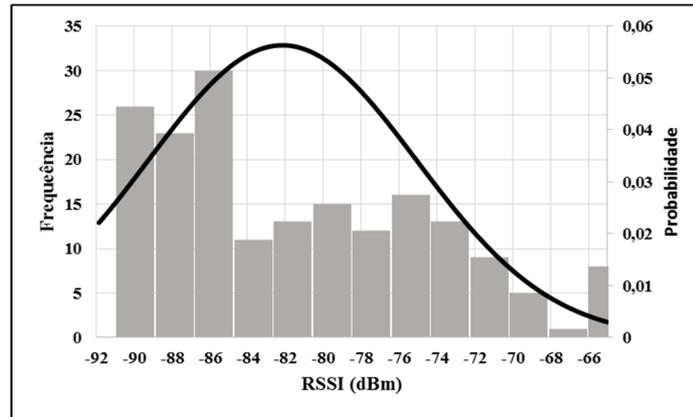
Tabela 19 – Parâmetros de Construção do Histograma das Medições em Campo.

<b>Classe</b>	<b>Corte</b>	<b>Frequência</b>	<b>Classe</b>	<b>Corte</b>	<b>Frequência</b>
1	-89,92	26	8	-75,38	16
2	-87,84	23	9	-73,30	13
3	-85,76	30	10	-71,23	9
4	-83,69	11	11	-69,15	5
5	-81,61	13	12	-67,07	1
6	-79,53	15	13	-65,00	8
7	-77,46	12			

**Fonte:** Autoria Própria (2018).

Os valores de corte da função densidade de probabilidade são calculados da mesma forma, a partir da soma entre o limite inferior e o produto do valor do ponto pelo segundo incremento. Os valores da função densidade de probabilidade de massa são calculados a partir do valor do ponto da classe, média, desvio-padrão e um valor lógico cumulativo que define a forma da função para a distribuição de densidade normal. A Figura 38 apresenta o resultado da construção do histograma e com a distribuição normal sobreposta ao histograma.

Figura 38 – Histograma com Sobreposição da fdp das Medições em Campo.



Fonte: Aatoria Própria (2018).

Pode ser verificado que a curva da distribuição normal apresenta um grau de assimetria positiva ou à direita, visto que a média dos valores medidos é maior que a mediana e o grau de distorção é positivo. Quanto ao grau de curtose pode ser considerada platicúrtica, pois a curva está menos achatada em relação a distribuição normal padrão e com um coeficiente de curtose de aproximadamente 0,66 em módulo.

Aplicando o mesmo cálculo da estatística descritiva clássica para os valores coletados do modelo Longley-Rice, os resultados são apresentados na Tabela 20:

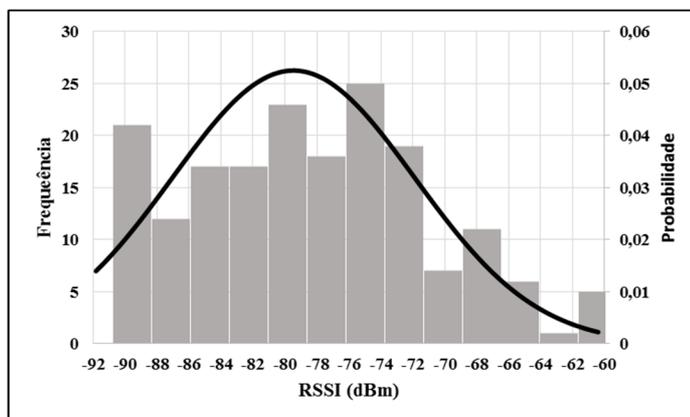
Tabela 20 – Parâmetros do Histograma e fdp do Modelo Longley-Rice.

Parâmetro	Valor	Classe	Corte	Frequência
Mínimo	-92,00	1	-89,92	26
Máximo	-60,00	2	-87,84	23
Média	-79,46	3	-85,76	30
Mediana	-79,45	4	-83,69	11
Tamanho	182	5	-81,61	13
Estimativa de Classes	13,49	6	-79,53	15
Classes	13	7	-77,46	12
Incremento 1	2,43	8	-75,38	16
Desvio Padrão	7,59	9	-73,30	13
Distorção	0,23	10	-71,23	9
Curtose	-0,46	11	-69,15	5
Incremento 2	0,17	12	-67,07	1
		13	-65,00	8

Fonte: Aatoria Própria (2018).

A Figura 39 apresenta a distribuição normal dos dados de RSSI nas coordenadas geográficas dos pontos de medição com o uso do cálculo do modelo Longley-Rice:

Figura 39 - Histograma com Sobreposição da fdp do Modelo Longley-Rice.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Os valores calculados da média e mediana se encontram muito próximos, dessa forma a curva de distribuição normal tem um grau de distorção positivo, logo apresenta uma assimetria positiva. A curtose, em módulo, define um índice de achatamento em torno de 0,46 que caracteriza uma curva platicúrtica.

#### 4.1.2 Análise de Dispersão e Correlação

Estes gráficos resultam do cálculo das medidas separatrizes e proporcionam a análise da dispersão numérica dos dados. As principais medidas separatrizes representadas no diagrama de caixa ou também chamado de *boxplot* são os valores mínimo e máximo, mediana, primeiro quartil e terceiro quartil. A Tabela 21 apresenta as medidas separatrizes para a construção dos *boxplots*:

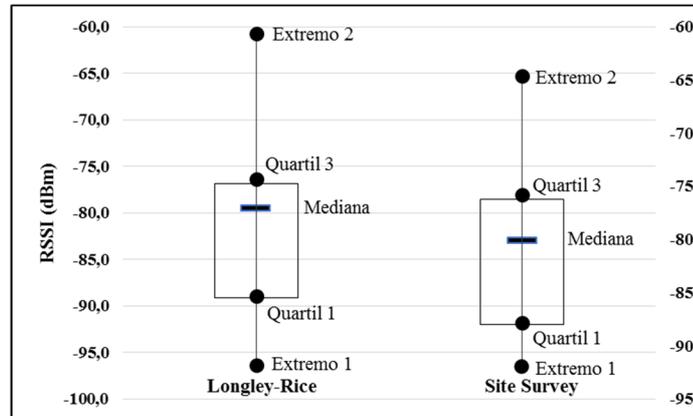
Tabela 21 – Medidas Separatrizes.

Medida	Longley-Rice	Site Survey
Mediana	-79,5	-83,0
Quartil 1	-85,5	-88,0
Extremo 2	-60,4	-65,0
Extremo 1	-92,0	-92,0
Quartil 3	-74,7	-76,3

Fonte: Autoria Própria (2018).

A Figura 40 representa as medidas separatrizes dos dados coletados nos pontos de coordenadas geográficas coletadas em campo:

Figura 40 – Diagramas de Caixa dos Dados Coletados.

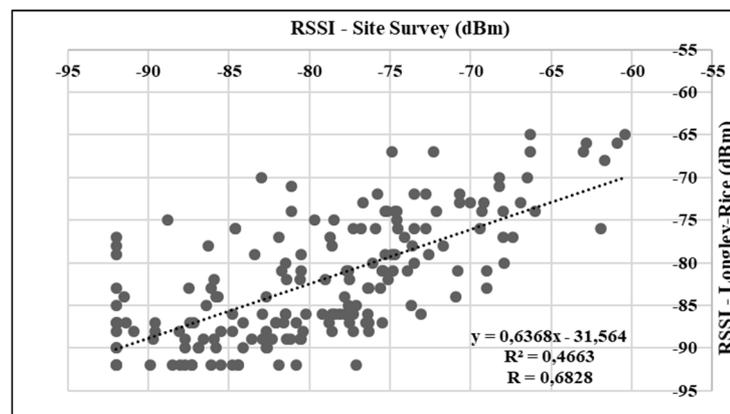


Fonte: Autoria Própria (2018).

Os valores calculados do modelo Longley-Rice apresentaram níveis de RSSI mais intensos e menos dispersos em comparação aos valores medidos em campo, isso pode ser observado na amplitude interquartílica. O valor mínimo de -92 dBm foi considerado nos casos de obstrução ou falta de sinal recebido, dado que consiste no valor de sensibilidade do equipamento transceptor.

Para análise do grau de correlação entre os valores medidos em campo e os valores calculados do modelo Longley-Rice foi utilizado os cálculos dos coeficientes de correlação de Pearson (R) e de determinação ( $R^2$ ), conforme mostrado na Figura 41:

Figura 41 – Representação Gráfica da Correlação de Pearson.



Fonte: Autoria Própria (2018).

O resultado do coeficiente de correlação de Pearson indica que os valores calculados pelo modelo Longley-Rice estão 68% representadas pelas medições em campo. Adicionalmente, o coeficiente de determinação demonstra que a variação dos dados calculados é explicada pela variação de 46% dos valores medidos.

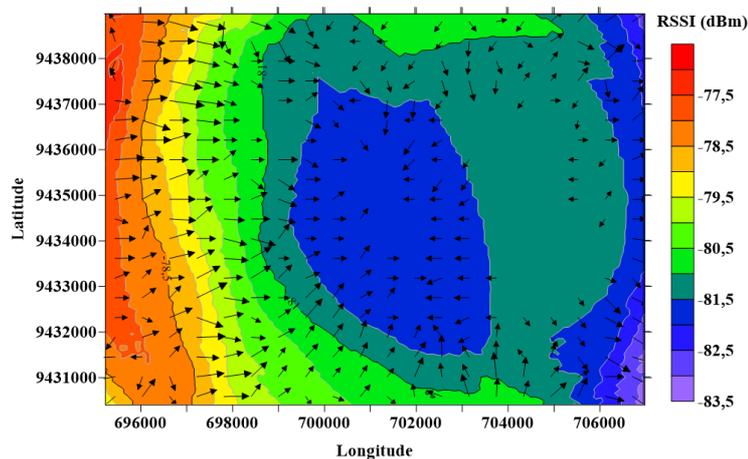
## 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Foram analisados os métodos determinísticos da triangulação linear, vizinho mais próximo, vizinho natural, mínima curvatura, inverso da distância ponderada, média móvel e regressão polinomial. Serão apresentados os resultados dos mapas de contorno superficial e vetorial de cada método.

### 4.2.1 Mapas de Contorno Superficial e Vetorial

A matriz de cada método foi calculada conforme o algoritmo de interpolação espacial e os mapas de contorno foram gerados para análise. A Figura 42 apresenta a distribuição superficial do método média móvel:

Figura 42 – Mapeamento com uso da Média Móvel.



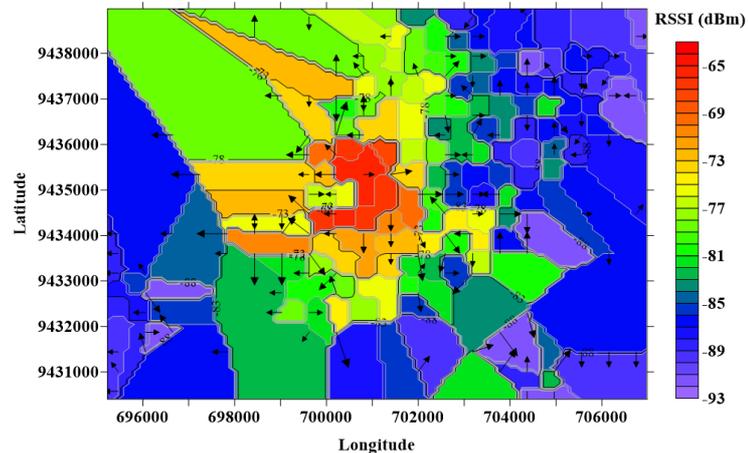
**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*®, versão 13.

Verifica-se a existência de níveis de RSSI mais altos concentrados na borda lateral esquerda do mapa, o que não reflete a realidade da área de cobertura do sistema de rede sem fio, visto que a torre de telecomunicações se encontra próxima do centro da figura. Existem grandes regiões com níveis constantes, isso por causa do algoritmo que utiliza a média como

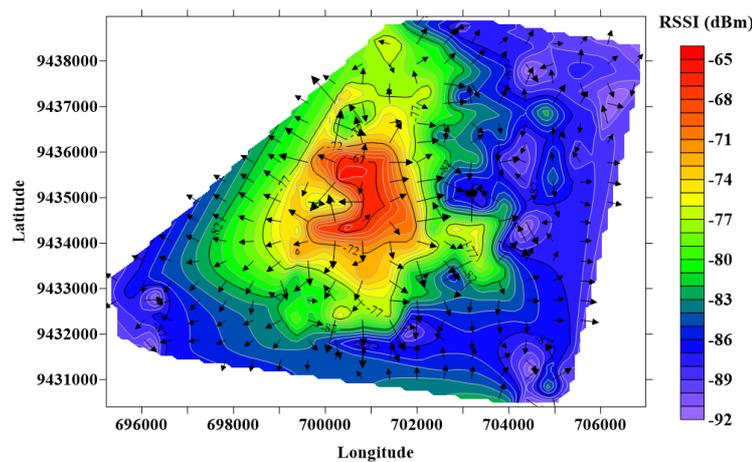
cálculo de interpolação entre pontos, assim ocorre uma tendência central nas estimativas e valores extrapolados não são encontrados.

A Figura 43 apresenta os mapas dos métodos locais com estimativa por vizinhança:

Figura 43 – Mapeamento com uso da Estimativa por Vizinhança.



a) Vizinhança mais Próxima



b) Vizinhança Natural

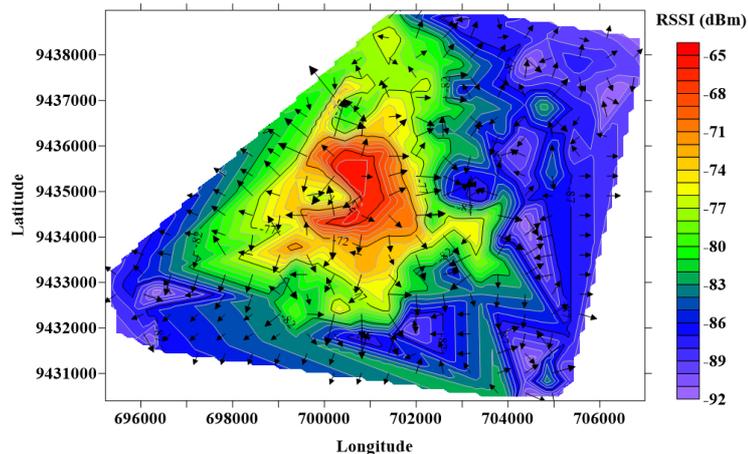
**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*®, versão 13.

A interpolação por vizinhança mais próxima considera a distância entre o ponto amostrado e o ponto estimado como métrica para determinação do valor de RSSI, como pode ser observado no mapa apresenta um aspecto em forma de grade da distribuição dos pontos de medição do reticulado de amostragem.

O método vizinhança natural combina as características do vizinhança mais próxima com o método de triangulação de Delaunay, em que os vértices dos triângulos são pontos de amostragem, e os valores estimados são determinados dentro dos polígonos. Verifica-se que os pontos estimados se limitam aos valores dos pontos amostrados, ou seja, não é possível encontrar valores extrapolados, por causa disso há regiões brancas, sem estimativas.

A Figura 44 apresenta a interpolação por triangulação linear em que pares de dados são unidos por linhas retas para formação de redes triangulares, em que os valores estimados são calculados a partir da média ponderada entre amostras contidas nos vértices de um triângulo. A principal desvantagem observada é a falha na estimação de valores acima ou abaixo dos valores amostrados, visto que este método é adequado para conjunto de dados distribuídos de forma regular:

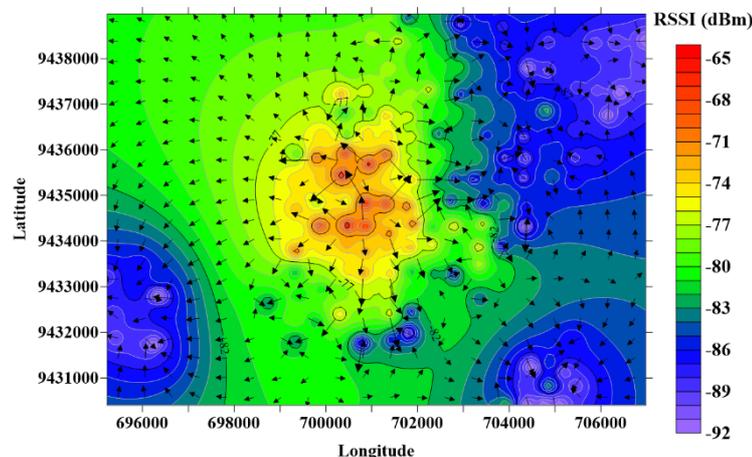
Figura 44 – Mapeamento com uso da Triangulação Linear.



**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*®, versão 13.

A Figura 45 apresenta o mapa de contorno do método IDP, que considera a distância do ponto estimado ao amostrado como uma função do peso na interpolação. Assim, observa-se no mapa que este método apresenta a desvantagem de produzir o efeito mira ao redor dos pontos amostrados, desta forma é necessário implementar uma alta densidade de pontos de medição.

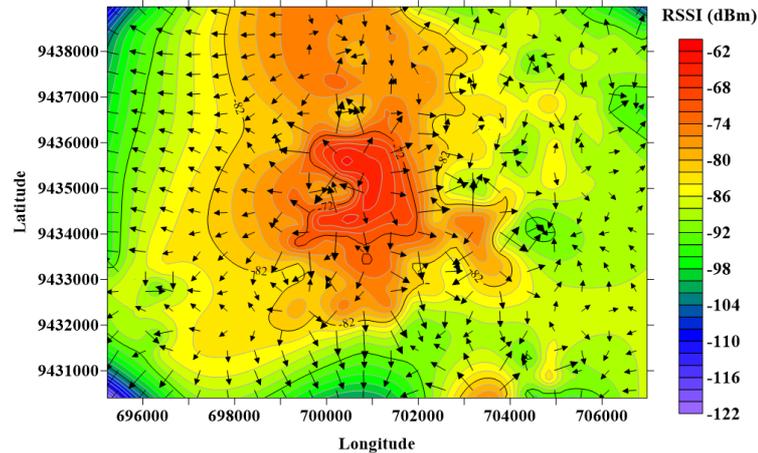
Figura 45 – Mapeamento com uso do Inverso da Distância Ponderada.



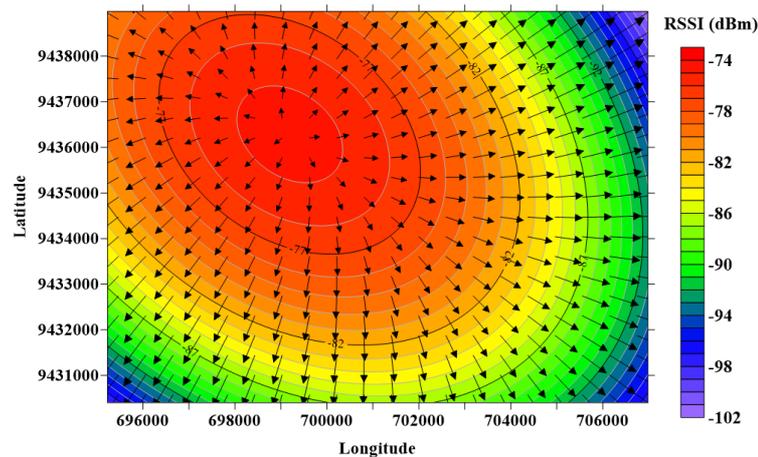
**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*®, versão 13.

Os métodos *spline* e regressão polinomial utilizam equações diferenciais ou polinômios para estimação com o objetivo de suavizar os valores de contorno e prever valores extrapolados. A Figura 46 apresenta os resultados desses métodos:

Figura 46 – Mapeamento com uso da Estimação por Suavização de Superfícies.



a) *Spline*



b) Regressão Polinomial

**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*®, versão 13.

No cálculo da regressão polinomial foi modelada uma superfície do tipo quadrática, em que o polinômio assume a forma:  $z(x,y)=A+Bx+Cy+Dx^2+Exy+Fy^2$ . Por isso, o mapa de contorno fornecido por esse método apresenta superfícies elípticas. As *splines* utilizam equações diferenciais no cálculo da estimação, diante disto as condições de contorno são suavizadas e sem picos ou pontas, porém valores anômalos surgiram no entorno das bordas devido à descontinuidade dos pontos de medição.

#### 4.2.2 Análise Comparativa por Validação Cruzada

Para avaliação dos erros de interpolação e comparação entre os métodos utilizados foram selecionados das matrizes um conjunto de 50 pontos estimados aleatoriamente em cada método para realização da validação cruzada. Dessa forma foram comparados os métodos determinísticos locais conforme observados na Tabela 22:

Tabela 22 – Comparação entre Métodos Determinísticos Locais.

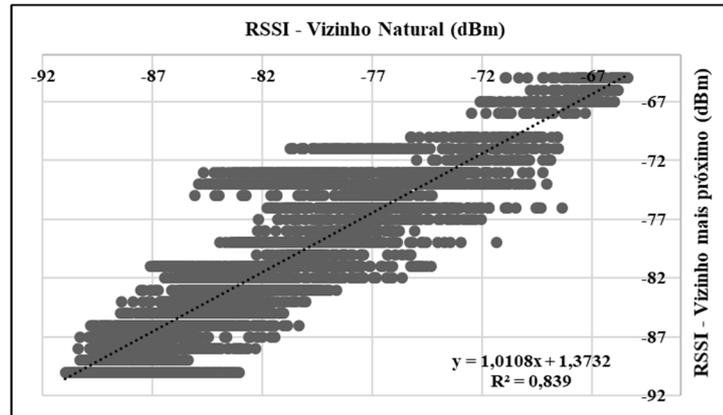
Método	Desvio			
	Média	Mediana	Variância	Quadrático Médio
<i>Spline</i>	-0,199	0,124	4,972	2,216
Vizinho natural	-0,100	0,054	7,657	2,739
Triangulação Linear	0,138	-0,215	11,224	3,318
Inverso da Distância Ponderada	-0,157	0,071	11,239	3,322
Regressão Polinomial	-0,756	0,328	20,675	4,564
Vizinho mais próximo	0,600	0,500	24,775	4,963
Média móvel	0,927	1,163	40,227	6,347

**Fonte:** Autoria Própria (2018).

Os desvios calculados mostram que o método *spline* apresentou o menor erro quadrático médio e o menor desvio da variância para os 50 pontos estimados na validação cruzada. Ademais, o desvio da média representa um valor baixo, pois expressa a existência da tendência central aproximada entre dados estimados. O método da média móvel pode ser considerado o que apresentou maior divergência entre os dados estimados e, por consequência, o mapa de contorno reflete de forma imprecisa a distribuição superficial dos valores de RSSI.

Adicionalmente, para comparação entre os métodos pode ser realizada a análise de regressão da correlação de Pearson, a qual exprime o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, nesse caso foram utilizados os valores calculados de cada método de interpolação espacial. Foram comparadas as estimativas por vizinhança para testar o grau de correlação desses tipos de métodos, conforme exposto na Figura 47:

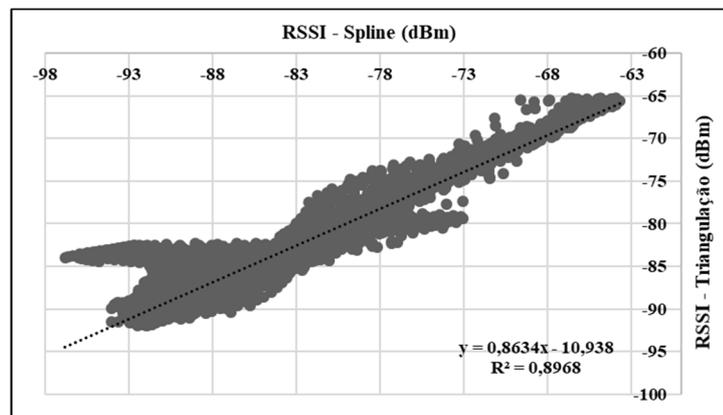
Figura 47 – Correlação Linear entre Estimativas por Vizinhaça.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Neste teste, para um conjunto de 6294 pares de pontos interpolados, os resultados das matrizes dos métodos vizinho natural e vizinho mais próximo foram comparados, o coeficiente de determinação calculado em aproximadamente 84% revela que os dois algoritmos estão com forte correlação espacial, visto que apresentam características semelhantes de interpolação. O mesmo pode ser observado na Figura 48, na comparação entre o método de estimativa por suavização *spline* e de ponderação da triangulação linear:

Figura 48 – Correlação Linear entre Método *Spline* e Triangulação Linear.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Nesse caso foram utilizados 6800 pares de pontos, na qual foram desconsideradas as regiões brancas do mapa da triangulação. O coeficiente de determinação calculado em 89% demonstra a forte correlação entre dois métodos de interpolação que apresentaram os menores desvios. Verifica-se que a correlação entre esses é maior em relação aos métodos de estimativa por vizinhança, visto que o método vizinho mais próximo apresenta maiores erros de interpolação.

### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS

Os métodos geoestatísticos, como a krigagem, consideram a correlação espacial dos dados medidos na determinação dos pesos de interpolação e que pode ser representada pela modelagem de um variograma. Dessa forma será efetuada a análise estrutural de correlação dos dados com o uso dos modelos exponencial, esférico, linear e gaussiano, em seguida, testes de validação cruzada são necessários para comparação e ajustes de cada variograma teórico.

#### 4.3.1 Análise Estrutural de Correlação Espacial

Esta etapa corresponde ao procedimento de cálculo dos pesos na krigagem e consiste na análise variográfica dos dados, na qual os valores das variâncias calculadas para cada distância  $h$  entre pontos de interpolação, denominada *lag*, são ajustados de acordo com um modelo de variograma. A Tabela 23 apresenta os resultados dos testes de validação cruzada para os modelos analisados:

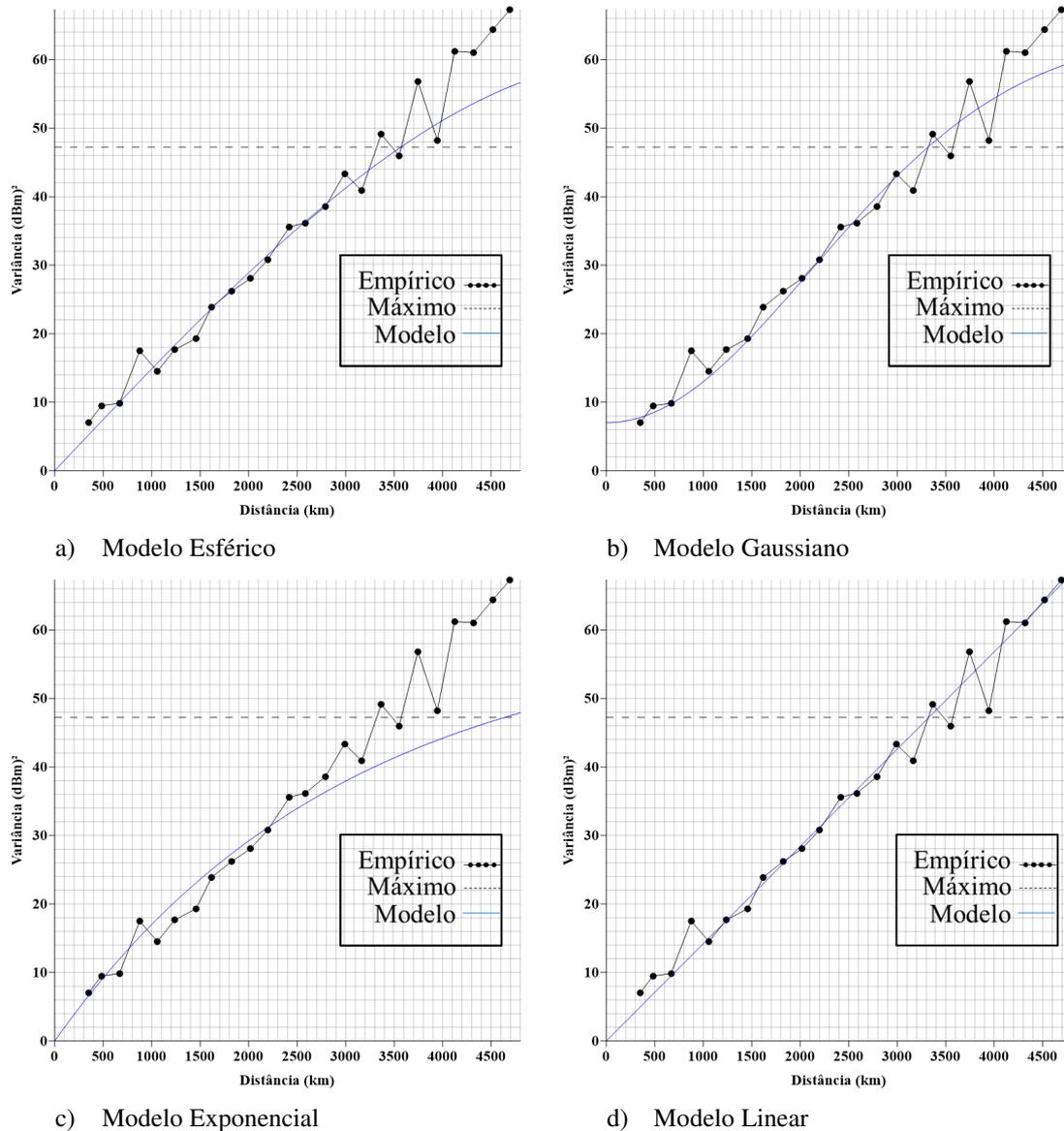
Tabela 23 – Comparação entre Modelos de Variograma.

Modelo	Desvio			
	Média	Mediana	Variância	Quadrático Médio
Esférico	0,022	0,156	6,849	2,590
Exponencial	0,268	0,233	10,528	3,223
Gaussiano	0,550	0,199	11,461	3,396
Linear	0,178	0,330	17,298	4,121

**Fonte:** Autoria Própria (2018).

Os resultados mostram que o modelo esférico ajustado representa o variograma com os menores desvios nas medidas descritivas analisadas. Dessa forma pode-se dizer que a matriz de interpolação gerada correspondente apresenta os menores erros no cálculo da interpolação espacial. A Figura 49 ilustra os tipos de modelos analisados e ajustados:

Figura 49 – Modelos de Variogramas Ajustados.



Fonte: Dados obtidos com o *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

Os pontos conectados por linhas contínuas representam o variograma empírico e as linhas tracejadas consistem na variância máxima calculada em torno de 47,21 (dBm)<sup>2</sup>. Os modelos de variogramas estão simbolizados pelas linhas de cor azul. No variograma linear sem patamar é estabelecido um valor para o coeficiente angular da reta, também chamado de declividade, que forneça a curva de maior proximidade para os pontos das variâncias.

A determinação dos modelos esférico, exponencial e gaussiano requer uma análise da contribuição dos parâmetros do patamar, alcance e efeito pepita. As características que foram alteradas no ajuste manual de cada modelo estão mostradas na Tabela 24:

Tabela 24 – Parâmetros dos Variogramas Ajustados.

Modelo	Efeito Pepita ( $C_0$ )	Patamar ( $C+C_0$ )	Alcance (A)	Declividade
Esférico	0	60	6000	Não Aplicável
Exponencial	0	60	3000	Não Aplicável
Gaussiano	7	57	3000	Não Aplicável
Linear	0	Sem patamar	Não Aplicável	0,0142

Fonte: Autoria Própria (2018).

A Tabela 25 apresenta os resultados dos cálculos das medidas separatrizes dos resíduos resultantes da validação cruzada de 50 pontos selecionados aleatoriamente em cada modelo de variograma. Observa-se que o modelo esférico possui dados menos dispersos.

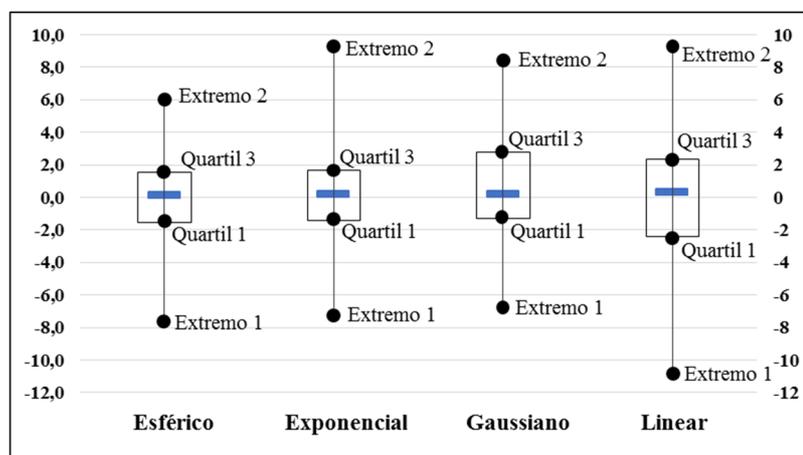
Tabela 25 – Medidas Separatrizes para Análise dos Resíduos.

	Esférico	Exponencial	Gaussiano	Linear
Mediana	0,20	0,20	0,19	0,33
Quartil 1	-1,56	-1,40	-1,31	-2,40
Extremo 2	5,70	8,90	8,03	8,94
Extremo 1	-7,30	-6,80	-6,37	-10,46
Quartil 3	1,57	1,63	2,80	2,37
Amplitude Interquartílica	3,10	3,00	4,10	4,80
Amplitude Total	13,00	15,70	14,40	19,40

Fonte: Autoria Própria (2018).

A Figura 50 representa, com o uso de *boxplots*, a comparação entre os resíduos provocados por erros de estimação identificados pela validação cruzada.

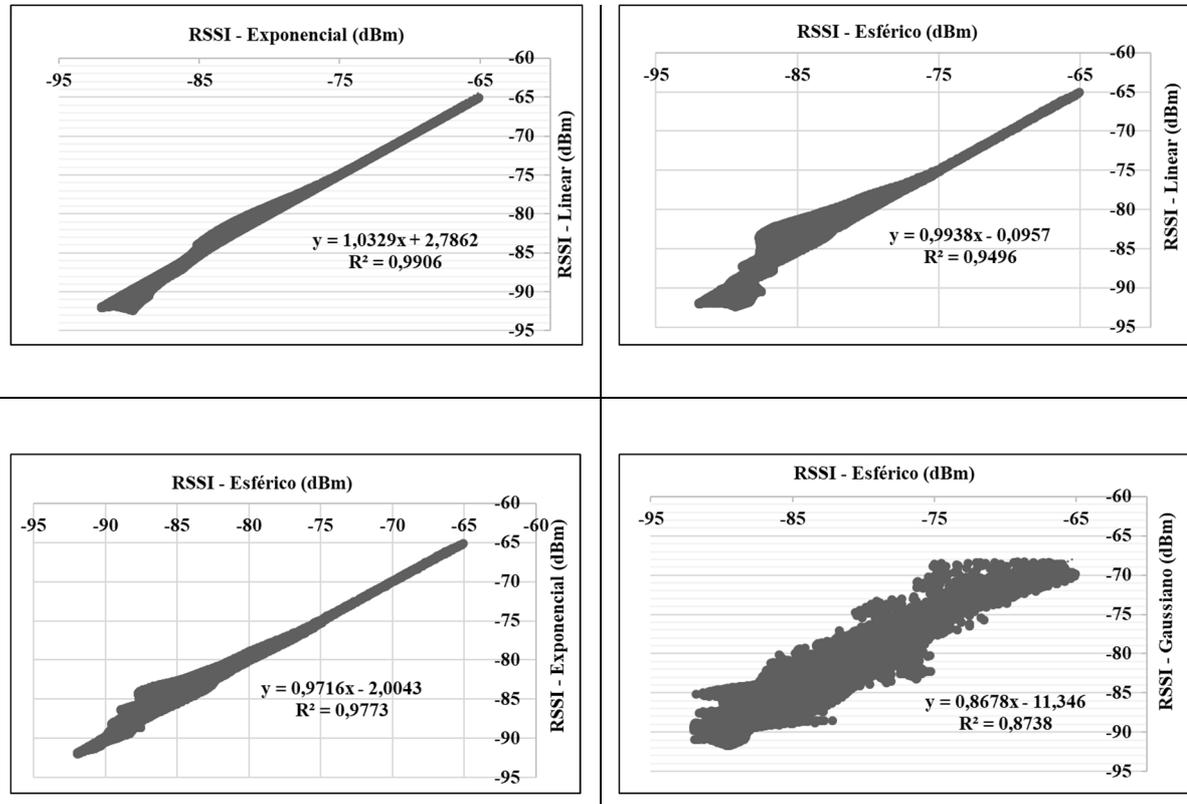
Figura 50 – Comparação entre Resíduos dos Modelos de Variograma.



Fonte: Autoria Própria (2018).

As matrizes de interpolação geradas foram comparadas com o uso da correlação de Pearson e coeficientes de determinação conforme observado na Figura 51:

Figura 51 – Comparação entre Matrizes de Interpolação da Krigagem.



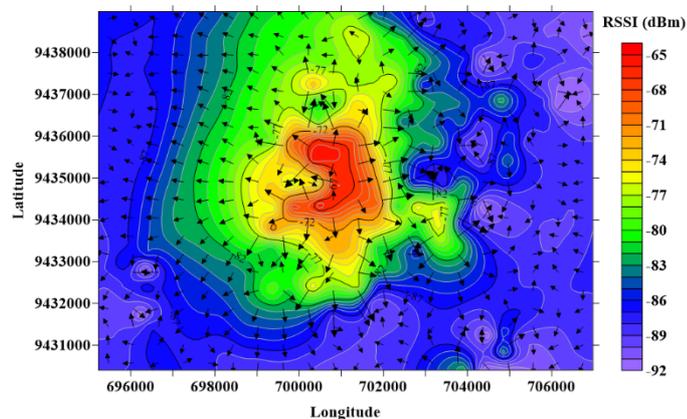
Fonte: Autoria Própria (2018).

Com isto, há uma métrica para analisar o comportamento da relação entre as propriedades dos modelos de variogramas ajustados. Assim, verifica-se que os valores estimados na matriz de interpolação do modelo esférico são mais semelhantes com os resultados do modelo exponencial em relação aos demais. Nos pontos calculados com níveis de RSSI maiores a correlação apresenta-se mais intensa, dado que os valores correlacionados estão com menor dispersão e a massa de dados mais homogênea.

### 4.3.2 Mapas de Contorno Superficial e Vetorial

Os mapas de contorno superficial e vetorial foram plotados para análise da distribuição superficial de RSSI e verificação das direções dos vetores de interpolação. O comportamento da potência recebida na região dos campos petrolíferos pode ser observado nesses mapas. A Figura 52 ilustra o resultado do cálculo da krigagem com o uso do modelo de variograma esférico:

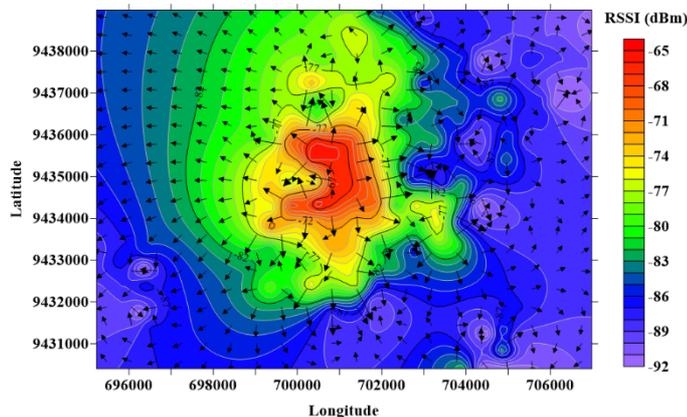
Figura 52 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Esférico.



**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

Observa-se contornos curvilíneos suaves na discretização, uma vez que o cálculo da krigagem ordinária objetiva minimizar o erro de estimação, a principal vantagem em relação aos métodos determinísticos. Em alguns métodos ocorre o efeito mira ao redor dos pontos amostrados, uma característica negativa de interpoladores sem análise geoestatística. A Figura 53 representa o mapa de contorno com modelagem exponencial:

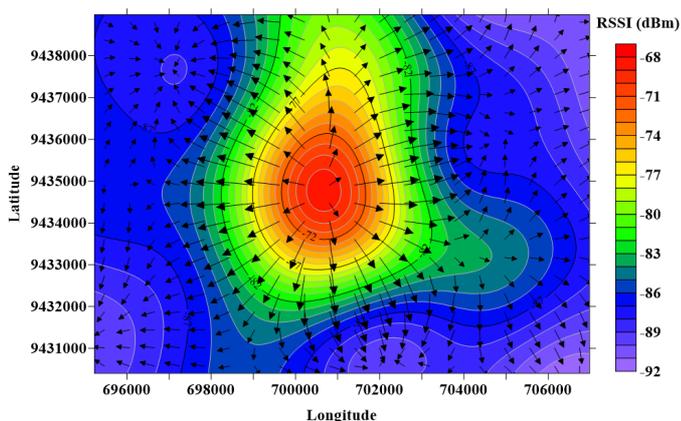
Figura 53 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Exponencial.



**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

O modelo de variograma exponencial forneceu o segundo melhor valor do erro médio quadrático, visto que a curva de correlação espacial se aproxima do modelo esférico. Complementando os resultados, a Figura 54 mostra o mapa de contorno do modelo gaussiano, que fornece curvas mais circulares em relação aos demais e otimiza a aproximação para *lags* em ordens superiores do variograma empírico, inclusive reduzindo o surgimento do efeito mira que aconteceu com os demais modelos de variograma.

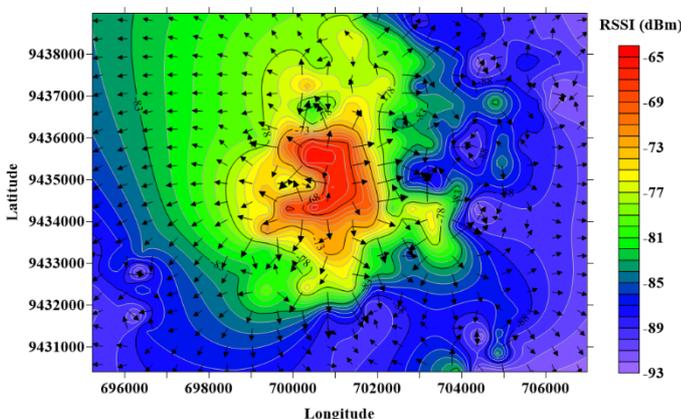
Figura 54 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Gaussiano.



**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

A Figura 55 apresenta o resultado do mapa de contorno do modelo linear de variograma, considerado como a estimativa padrão no cálculo da krigagem, contudo em alguns casos desconsidera ajustes importantes de variografia como alcance, a contribuição do efeito pepita e patamar. Com a modelagem linear sem patamar pode ser realizada uma estimativa rápida do variograma teórico para realização dos cálculos de interpolação espacial por krigagem.

Figura 55 – Mapeamento com uso da Krigagem de Variograma Linear.

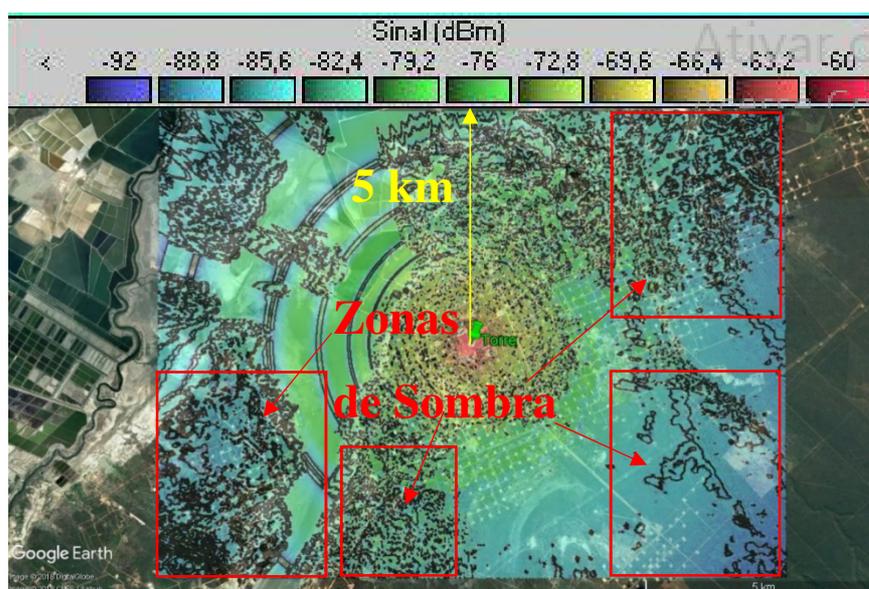


**Fonte:** Dados obtidos com o *Surfer*<sup>®</sup>, versão 13.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO LONGLEY-RICE

Este tópico apresenta os resultados da distribuição superficial com o uso do modelo Longley-Rice. Após a inserção das propriedades da rede sem fio no *software radio mobile*®, procede-se com a execução de uma função que realiza o traçado do mapa de cobertura do sistema de transmissão. Nesta função é definida uma configuração de propagação, na direção de propagação da estação base para a móvel no cenário de estudo. O mapa de cobertura na frequência de 5,8 GHz para o sistema de medição em campo apresenta zonas de sombra, isto pode ser observado a partir da sobreposição dele na região de estudo, conforme visto na Figura 56:

Figura 56 – Mapeamento com Parâmetros de Recepção da Medição em Campo.

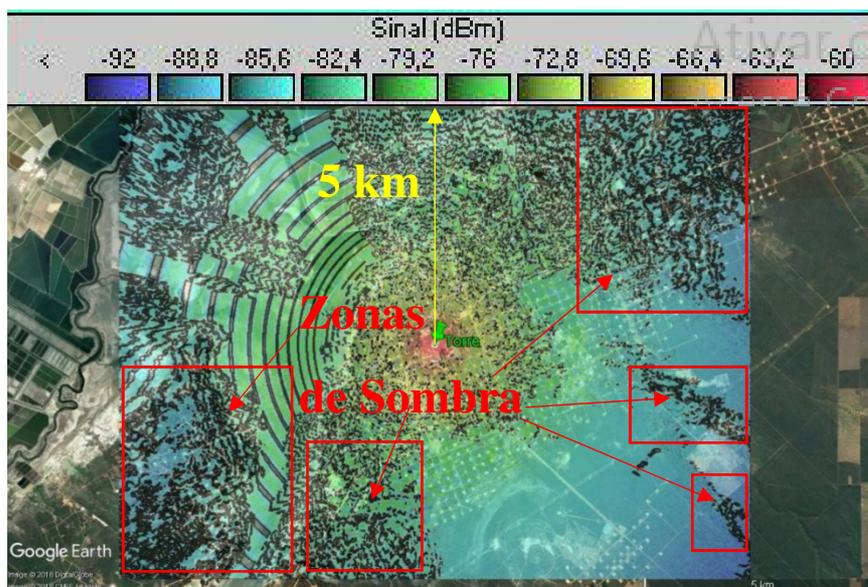


**Fonte:** Exportado da aplicação *Radio Mobile*® para o *Google Earth pro*®.

Os setores sem representação de cor dentro da área analisada indicam as zonas com ausência de RSSI, os níveis mais intensos são as cores na proximidade da escala do vermelho. Os níveis de sensibilidade do transceptor, que significam o limiar mínimo para operação do enlace, corresponde às cores azul claro e violeta. Os níveis fracos de RSSI conferem baixa qualidade de comunicação, visto que a disponibilidade do tráfego de dados exige enlaces estáveis e adequado nível de RSSI.

A Figura 57 mostra as zonas de sombras considerando as estações móveis com o mastro de comprimento aproximado de 10 metros, de acordo com os parâmetros de infraestrutura encontrado nas sondas terrestres de manutenção de poços. O aumento na altura de instalação da antena receptora aumenta consideravelmente a probabilidade de recepção de potência.

Figura 57 – Mapeamento com Parâmetros de Recepção das Sondas.



**Fonte:** Exportado da aplicação *Radio Mobile*® para o *Google Earth pro*®.

A cobertura da célula da estação base apresenta-se bastante recortada principalmente em pontos à nordeste e sudoeste da estação base. Como oportunidades de melhorias poderiam ser implementados sistemas de transmissão com plano de canalização para suprir a necessidade de rede sem fio em terrenos de poços sem cobertura de sinal.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o comportamento da distribuição superficial de potência na frequência de 5,8 GHz de uma rede sem fio responsável por fornecer serviços de comunicação de dados e voz para usuários da operação e manutenção dos campos petrolíferos do Canto do Amaro. Para isto, a fundamentação teórica exigida proporcionou conceitos importantes para elaboração dos métodos aplicados no desenvolvimento da pesquisa.

Os resultados dos métodos de interpolação espacial e dos cálculos do modelo de desvanecimento Longley-Rice possibilitaram identificar as zonas de sombra do cenário de estudo, para isso exigiu a análise exploratória dos dados e conhecimentos técnicos sobre os sistemas e processos da região analisada. As medições em campo forneceram os dados necessários para a estimação e simulação computacional dos mapas da distribuição superficial de potência, assim como as ferramentas estatísticas possibilitaram avaliar o comportamento dos níveis de potência recebida.

Observou-se que o método de estimação por suavização *spline* apresentou o menor erro médio quadrático e o menor desvio da variância, em comparação aos demais métodos determinísticos. Os algoritmos de interpolação por vizinho natural e triangulação linear apresentaram regiões brancas, visto que surgiram valores sem estimação na matriz causados pela limitação da extrapolação numérica dos dados. Com o uso da validação cruzada foram examinados os métodos para confirmação dos mapas de contorno que apresentaram os maiores desvios das medidas estatísticas analisadas.

Com a análise variográfica foram modelados os variogramas teóricos dos dados medidos em campo, em que os valores de RSSI e as coordenadas geográficas foram coletados sob a forma de um reticulado de amostragem. Os ajustes dos variogramas forneceram os insumos necessários para o cálculo da krigagem, dessa forma os procedimentos mostraram que o modelo esférico apresentou os menores erros nos testes de validação cruzada.

Para realização da comparação entre métodos de interpolação espacial foram calculados os coeficientes de determinação entre conjuntos de pontos estimados das respectivas matrizes. Assim, pode-se constatar o grau de correlação entre cada método, visto que os algoritmos com maior proximidade entre valores estimados fornecem maior valor desse coeficiente. Os resultados dos testes de validação cruzada consideram o RMSE como fator dominante na determinação da acurácia de um método de interpolação espacial em relação aos demais desvios analisados.

Em relação aos mapeamentos da distribuição superficial de potência com o uso da krigagem foram elaborados os mapas com os variogramas ajustados. Verificou-se o surgimento do efeito mira nos mapas dos modelos esférico, exponencial e linear e a ausência desse problema no modelo gaussiano. No entanto, as características de suavização das condições de fronteira foram respeitadas nos mapas geoestatísticos.

Além dos mapas de contorno superficial foram criadas as análises da distribuição com o uso do modelo de propagação Longley-Rice, com esta ferramenta foi possível identificar as zonas de sombra do cenário de estudo.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas recomendações para trabalhos futuros são apresentadas com base neste trabalho desenvolvido. As principais propostas são:

- Análise em diferentes sistemas comunicações sem fio e ambientes de automação para identificação de possíveis oportunidades de melhorias;
- Sistema para medição em campo que contemple faixas de frequências distintas, como 900 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz para coleta de dados;
- Realização de pesquisas e testes de algoritmos de interpolação espacial geoestatísticos existentes na literatura para análise de acurácia, como as variações da krigagem: co-krigagem, krigagem universal, krigagem em blocos e krigagem simples;
- Validação cruzada de dados estimados com outros parâmetros existentes na literatura.

## REFERÊNCIAS

AKOGLU, A., SONG, Y. **Parallel Implementation of the Irregular Terrain Model (ITM) for Radio Transmission Loss Prediction Using GPU and Cell BE Processors**. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 22(8), Agosto de 2011.

ALVES, E. D., VECCHIA, F. A. **Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás**. Acta Scientiarum. Human and Social Sciences, 33(2), 193-197, 2011.

AMARAL, C. T. **Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Área de Clima Tropical**. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

ANP. **Plano de desenvolvimento - Canto do Amaro de 2016**. Acesso em 01 de outubro de 2017, disponível em Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)

BARRETO, E. P. **Caracterização da perda de Propagação em Região Urbana nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CAMARGO, E. C., FUCKS, S. D., CÂMARA, G. **Análise espacial de superfícies**. Em S. DRUCK, M. S. CARVALHO, G. CÂMARA, & A. V. MONTEIRO, Análise espacial de dados geográficos. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2004.

CARUSO, C., QUARTA, F. **Interpolation Methods Comparison**. Computers & Mathematics with Applications, 35(12), 109-126, 1998.

CARVALHO, E. A., ARAÚJO, P. C. **Leituras cartográficas e interpretações estatísticas I**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN: EDUFRN, 2008.

CHAUDHARI, S., OKSANEN, J., KOIVUNEN, V. **Spatial Interpolation of Cyclostationary Test Statistics in Cognitive Radio Networks: Methods and Field Measurements**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67, (2), pp. 1113–1129, doi: 10.1109/TVT.2017.2717379.

CHIEN, C. **Digital Radio Systems on a Chip, a Systems Approach**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

CLARK, I. **Practical Geostatistics**. Geostokos Limited, 1977.

COLLIN, R. E. **Foundations for Microwave Engineering (2ª ed.)**. New York: McGraw Hill, 1992.

CORREA, S. M. **Probabilidade e estatística (2ª ed.)**. Belo Horizonte-MG: PUC Minas Virtual, 2003.

CORREIA, P. (2010). **Modelação e Estimação: Uma introdução à geoestatística**. Acesso em 18 de abril de 2018, disponível em: Laboratório de Estatística e Geoinformação: [http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:numist\\_-\\_modelacao\\_e\\_estimacao\\_-sgems.pdf](http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:numist_-_modelacao_e_estimacao_-sgems.pdf)

DINGXIN, C., DAI ZHI, L., YIHONG, L., LIANG, M., XIAOJUN, Y. **Improve Spatiotemporal Kriging with Magnitude and Direction Information in Variogram Construction**. Chinese Journal of Electronics, 25, (3), pp. 527–532, doi: 10.1049/cje.2016.05.019, 2016.

FEIJOO, A. M. **A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010.

FERNANDES, E. M. **Estatística Aplicada**. Braga: Universidade do Minho. Fonte: <http://www.norg.uminho.pt/aivaz/binaries/Aulas/hist%C3%B3ria.pdf>, 1999.

FIALHO, B., Queiroz Jr., I. S., Andrade, H. D., Fontgalland, G., Lemos, H. T. **Avaliação da distribuição superficial de níveis RSSI de uma rede wireless em campos petrolíferos na banda de 5,8 GHz**. 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, 2018.

FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e Redes de Computadores (4ª ed.)**. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

GARMIN. **Manual do GPSmap76CSx**. Acesso em 14 de Maio de 2018, disponível em <https://buy.garmin.com/pt-BR/BR/p/350#specs>

Golden Software. **Site do software Surfer versão 13**. Acesso em 15 de abril de 2018, disponível em: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>

Google Earth pro versão 7. **Site para download do aplicativo Google Earth**. Acesso em 9 de abril de 2018, disponível em: <https://www.google.com/earth>

HATA, M. **Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services**. IEEE transactions on Vehicular Technology, 29(3), 317-325, agosto de 1980.

HAYKIN, S. **Communication Systems (4ª ed.)**. New York: McMaster University, 2001.

HAYT Jr, W. H., BUCK, J. A. **Eletromagnetismo (6ª ed.)**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

IEEE. **Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements.** The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 2016.

JINGUE, L., DAEHYUN, K., YOUNGLOK, K. **Wireless channel characterisation for IEEE 802.15.4 in railroad scenario.** Electronics Letters, 2016, 52, (19), pp. 1644–1646, doi: 10.1049/el.2016.2275, 2016.

KONAK, A. **Estimating Path Loss in Wireless Local Area Networks using ordinary kriging.** Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, pp. 2888 – 2896, dezembro de 2010.

KRIGE, D. G. **A statistical approach to some basic mine valuations problems on the Witwatersrand.** Journal of Chemical, Metallurgy and Mining Society of South Africa, 52, pp. 119-139, 1951.

KUROSE, J. F., ROSS, K. W. **Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down** (6ª ed.). São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

LANDIM, P., YAMAMOTO, J. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações.** Oficina de Textos, 2013.

LANDIM, P. M., MONTEIRO, R. C., CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer.** DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático 08, Rio Claro, 2002.

LARSON, R., FARBER, B. **Estatística Aplicada** (4ª ed.). (L. F. Vianna, Trad.) São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Li, J., HEAP, A. D. **A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists.** Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 pp, 2008.

LIMA, E. R. **Geoestatística aplicada ao estudo do solo.** (Embrapa) Acesso em 18 de abril de 2018, disponível em: [www.cpatc.embrapa.br/srgsr/mini-curso/geoestat.ppt](http://www.cpatc.embrapa.br/srgsr/mini-curso/geoestat.ppt)

LIM, S. Y., AWELEMDY, A. K., YUN, Z., ISKANDER, M. F. **Experimental Study of Propagation Characteristics in an Open-Trench Drain.** IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 15, pp. 60–63, doi: 10.1109/LAWP.2015.2429654, 2016.

LONGLEY, A. G., RICE, P. L. **Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain a computer method.** Report ERL65-ITS67-Washington: NTIA, 1968.

MARQUES, R. **Fundamentos de Cartografia: A rede geográfica**. Acesso em 19 de abril de 2018, disponível em Geociências - Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Centro de Ciências Exatas e da Natureza: [www.geociencias.ufpb.br/leppan/disciplinas/lic/aula2.pdf](http://www.geociencias.ufpb.br/leppan/disciplinas/lic/aula2.pdf)

MARTINS, R. A. **Modelagem e medições de ondas de rádio para predição de perda de propagação em ambientes urbanos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics: Economic Geol.** v. 58, p. 1246–1266, 1963.

MATOS, A. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MAZZINI, P. L., & SCHETTINI, C. A. **Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos**. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, 13(1), 53-64, 2009.

MOLIN, J. P., AMARAL, L. R., COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão** (1ª ed.). São Paulo: Oficina de textos, 2015.

NOGUEIRA, L. C. **Análise de medidas de sistemas MIMO na frequência de 2,4 GHz em ambientes internos e externos**. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.

NOTAROS, B. M. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

OLIVEIRA, R. P., GREGO, C. R., BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper** (1ª ed.). Brasília-DF: Embrapa, 2015.

PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2000.

PEREIRA, M. A. **Análise de Modelos de Propagação na área Urbana da Região de Curitiba-PR na faixa de frequência de 1800 MHz**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PERPINIAS, N, RIIHIJÄRVI, J, MÄHÖNEN, P. **Impact of Model Uncertainties on the Accuracy of Spatial Interpolation Based Coverage Estimation**. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp 1-6, 2017.

PIANA, C. F., MACHADO, A. D., SELAU, L. P. **Estatística Básica**. Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, Depto. de Matemática e Estatística, Pelotas-RS, 2009.

PINHEIRO, F. S. **Avaliação dos modelos de predição de propagação para telefonia móvel celular na cidade do Natal**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering** (2ª ed.). John Wiley & Sons, 1998.

QUEVEDO, C. P., LODI, C. Q. **Ondas Eletromagnéticas: eletromagnetismo, aterramento, antenas, guias, radar, ionosfera**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Radio Mobile versão 11. **Site para download do freeware Radio Mobile**. Acesso em 3 de Abril de 2018, disponível em: <http://www.ve2dbe.com>

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas** (2ª ed.). São Paulo: Pearson Prentice hall, 2009.

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**. Conceitos, processos e aplicações. (3ª ed.). Barueri-SP: Manole, 2016.

REITZ, J. R., et al. **Fundamentos da teoria eletromagnética** (3ª ed.). Rio de Janeiro: Campus, 1980.

RIBEIRO, J. A. J. **Propagação das ondas eletromagnéticas – Princípios e aplicações**. (2ª ed.). Editora Érica, 2004.

SANTANA, T. A. A., ANDRADE, H. D., JÚNIOR, I. S. Q., SILVA, I. B. T. **Comparison of spatial interpolation methods to determine exposure ratio to electric fields in urban environments**. *Electronics Letters*, 53, (18), pp. 1250–1252, doi: 10.1049/el.2017.2210, 2017.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 3ª ed. São Paulo: Brookman, 2004.

SCUDELER, F. C. S. R. **Interação das ondas eletromagnéticas com o material biológico**. Instituto Nacional de Telecomunicações-Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG, 2005.

SEYBOLD, J. S. **Introduction to RF Propagation**. Hoboken, New Jersey: John & Sons, 2005.

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. Hoboken: John & Sons, Inc, 2003.

VASCO, C. L. **Modelo de propagação empírico para sinais de TV digital em Curitiba**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, Curitiba, 2009.

WONG, L. D., GIANNATTASIO, G., ERFANIAN, J., WILLS, P., NGUYEN, H., CRODA, T., PAVLIDOU, N. **A Guide to the Wireless Engineering Body of Knowledge**, IEEE Communications Society. John Wiley & Sons, 2009.

### APÊNDICE A – TABULAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

Ponto	Longitude	Latitude	Longley-Rice	Medido	47	702795	9434323	-78,5	-75
1	699349	9432315	-83,4	-79	48	703420	9434376	-77,3	-76
2	699772	9432237	-77,5	-82	49	703960	9434400	-77,8	-84
3	700294	9432398	-88,8	-75	50	704336	9434330	-81,9	-92
4	700772	9432431	-78,6	-78	51	695229	9433204	-89,7	-89
5	701385	9432421	-84,6	-76	52	695951	9433444	-82,1	-87
6	701849	9432463	-82,9	-86	53	696386	9433213	-92	-85
7	699342	9431811	-92	-83	54	695367	9432827	-84,8	-88
8	700783	9431778	-85,5	-88	55	695830	9432961	-84,8	-86
9	701434	9431841	-81,5	-86	56	696346	9432797	-84,4	-92
10	701793	9431996	-82,7	-90	57	695383	9432391	-87,7	-89
11	698752	9432647	-76,4	-83	58	695821	9432366	-90,9	-88
12	699451	9432832	-80,5	-81	59	696367	9432412	-81,5	-86
13	699910	9432947	-75,5	-81	60	695423	9431885	-86,9	-90
14	700354	9432905	-74,9	-79	61	695919	9431768	-86,6	-89
15	700860	9432850	-75,9	-76	62	696239	9431728	-80,8	-92
16	701339	9432840	-76,8	-76	63	696436	9431443	-92	-87
17	701866	9432880	-77,6	-81	64	705367	9431827	-87,2	-87
18	702302	9432832	-81,4	-82	65	705207	9431118	-86,9	-90
19	703359	9432744	-82,7	-84	66	704867	9431327	-86,4	-85
20	699331	9433314	-80,6	-82	67	704491	9431236	-85,5	-92
21	699821	9433296	-73,6	-78	68	705439	9430830	-87,7	-90
22	700498	9433363	-74,7	-74	69	704867	9430827	-87,5	-83
23	700827	9433304	-75,8	-72	70	704367	9430827	-85,9	-89
24	701398	9433281	-74,6	-74	71	705094	9430401	-87,7	-92
25	701867	9433327	-75,1	-82	72	704763	9430410	-87,3	-92
26	702371	9433283	-76,3	-83	73	704405	9430415	-87,3	-92
27	702787	9433281	-77,8	-86	74	699361	9434706	-70	-73
28	703349	9433494	-81,9	-77	75	699798	9434832	-67,4	-77
29	703845	9433402	-81,7	-81	76	700433	9434872	-61,9	-76
30	703828	9433895	-80,8	-87	77	700867	9434827	-60,9	-66
31	703343	9433865	-79,7	-75	78	701312	9434817	-63	-67
32	702845	9433867	-75,5	-81	79	701772	9434760	-66,5	-70
33	702307	9433925	-74,6	-75	80	702399	9434796	-73,5	-80
34	701832	9433856	-76,7	-73	81	702710	9434880	-73,1	-86
35	701342	9433894	-69,2	-73	82	703441	9434818	-76,3	-88
36	700874	9433767	-70,7	-72	83	703898	9434789	-79	-82
37	700453	9433942	-72,8	-72	84	704355	9434740	-89,6	-87
38	699981	9433833	-72,1	-74	85	704900	9434961	-79,2	-86
39	699347	9433784	-81,1	-71	86	699367	9435327	-75,3	-74
40	699389	9434254	-72,8	-76	87	700001	9435327	-66,9	-73
41	699867	9434327	-72,3	-67	88	700337	9435442	-60,4	-65
42	700481	9434343	-66,3	-65	89	701895	9435340	-66	-74
43	700867	9434327	-74,9	-67	90	702440	9435258	-69	-83
44	701361	9434159	-68,2	-71	91	702816	9435374	-80,2	-86
45	701913	9434377	-83	-70	92	703233	9435363	-75,5	-87
46	702315	9434310	-73,9	-81	93	703765	9435373	-82,9	-86

94	704305	9435380	-88,5	-89	142	702938	9437210	-76,4	-86
95	704949	9435424	-78,6	-84	143	703293	9437339	-77,1	-85
96	705366	9435319	-82,1	-87	144	703949	9437373	-76,3	-87
97	705867	9435827	-84,1	-88	145	704410	9437308	-77,3	-88
98	705429	9435827	-83,6	-89	146	704884	9437237	-78,8	-87
99	704984	9435970	-80,4	-85	147	705461	9437368	-80,5	-89
100	704339	9435808	-89,6	-90	148	705902	9437301	-92	-90
101	703898	9435825	-84,4	-89	149	706414	9437264	-92	-92
102	703266	9435824	-76,5	-82	150	706905	9437500	-88	-90
103	702867	9435827	-86,1	-83	151	706852	9437873	-89,9	-90
104	702398	9435883	-70,8	-79	152	706386	9437711	-84,8	-89
105	701876	9435866	-68	-77	153	705884	9437910	-81,2	-88
106	701307	9435892	-61,7	-68	154	705501	9437779	-81,4	-87
107	700947	9435687	-62,8	-66	155	704828	9437732	-91,4	-90
108	700431	9435938	-66,3	-67	156	704413	9437795	-92	-92
109	699795	9435824	-68,2	-70	157	703958	9437845	-78,1	-86
110	699379	9435914	-75,3	-79	158	703384	9437769	-91,5	-84
111	699925	9436321	-69,3	-74	159	702899	9437818	-77,7	-81
112	700468	9436345	-73,5	-79	160	702461	9437858	-76,1	-80
113	700910	9436380	-81,1	-74	161	701988	9437899	-92	-79
114	701352	9436318	-75,2	-74	162	701394	9437791	-74,1	-77
115	701888	9436283	-67,9	-76	163	700938	9437885	-86,3	-78
116	702440	9436353	-70,9	-84	164	700569	9437750	-72,6	-79
117	702849	9436288	-73,7	-83	165	701036	9438449	-78,7	-77
118	703512	9436323	-77,3	-86	166	701578	9438378	-84,6	-76
119	703867	9436327	-77,1	-84	167	701886	9438270	-74,7	-79
120	704309	9436281	-86,1	-89	168	702459	9438306	-75,4	-81
121	704848	9436302	-81,6	-87	169	702942	9438276	-77,6	-85
122	705400	9436429	-82,7	-88	170	703279	9438346	-92	-87
123	705860	9436478	-82,6	-87	171	703906	9438273	-78,6	-88
124	706127	9436765	-92	-92	172	704356	9438307	-91,9	-87
125	705857	9436872	-82,3	-88	173	704847	9438353	-82,7	-89
126	705367	9436827	-87,4	-87	174	705867	9438327	-92	-90
127	704795	9436865	-77,5	-82	175	706324	9438346	-85,8	-90
128	704374	9436922	-78,4	-86	176	706982	9438391	-92	-92
129	703873	9436816	-85,8	-84	177	703847	9438704	-88,1	-88
130	703340	9436878	-75,6	-83	178	703415	9438980	-84,1	-87
131	702840	9436844	-74,8	-81	179	702931	9438762	-80,6	-89
132	702472	9436842	-81,5	-80	180	701783	9438894	-85,7	-84
133	701806	9436725	-69,4	-76	181	701351	9438918	-92	-78
134	701325	9436741	-68	-74	182	703929	9430400	-85,9	-82
135	700940	9436808	-80,5	-79					
136	700397	9436806	-69	-81					
137	700349	9437209	-70,7	-73					
138	700893	9437300	-73,5	-76					
139	701347	9437395	-71,7	-78					
140	701869	9437209	-92	-77					
141	702256	9437320	-74,5	-76					

### APÊNDICE B – DADOS DA FDP: SITE SURVEY

Ponto	Corte	FDM	42	-85,7692	0,049483	84	-79,5385	0,052581
1	-91,8516	0,022108	43	-85,6209	0,050002	85	-79,3901	0,052163
2	-91,7033	0,022746	44	-85,4725	0,050504	86	-79,2418	0,051725
3	-91,5549	0,023391	45	-85,3242	0,050989	87	-79,0934	0,051269
4	-91,4066	0,024045	46	-85,1758	0,051457	88	-78,9451	0,050794
5	-91,2582	0,024705	47	-85,0275	0,051906	89	-78,7967	0,050302
6	-91,1099	0,025373	48	-84,8791	0,052335	90	-78,6484	0,049792
7	-90,9615	0,026047	49	-84,7308	0,052745	91	-78,5	0,049266
8	-90,8132	0,026728	50	-84,5824	0,053136	92	-78,3516	0,048725
9	-90,6648	0,027414	51	-84,4341	0,053505	93	-78,2033	0,048168
10	-90,5165	0,028106	52	-84,2857	0,053853	94	-78,0549	0,047596
11	-90,3681	0,028802	53	-84,1374	0,05418	95	-77,9066	0,047011
12	-90,2198	0,029503	54	-83,989	0,054485	96	-77,7582	0,046413
13	-90,0714	0,030207	55	-83,8407	0,054768	97	-77,6099	0,045802
14	-89,9231	0,030915	56	-83,6923	0,055028	98	-77,4615	0,045179
15	-89,7747	0,031626	57	-83,544	0,055265	99	-77,3132	0,044546
16	-89,6264	0,032338	58	-83,3956	0,055479	100	-77,1648	0,043901
17	-89,478	0,033052	59	-83,2473	0,055669	101	-77,0165	0,043248
18	-89,3297	0,033768	60	-83,0989	0,055835	102	-76,8681	0,042585
19	-89,1813	0,034483	61	-82,9505	0,055977	103	-76,7198	0,041914
20	-89,033	0,035198	62	-82,8022	0,056095	104	-76,5714	0,041236
21	-88,8846	0,035912	63	-82,6538	0,056188	105	-76,4231	0,04055
22	-88,7363	0,036625	64	-82,5055	0,056257	106	-76,2747	0,039859
23	-88,5879	0,037335	65	-82,3571	0,056302	107	-76,1264	0,039162
24	-88,4396	0,038043	66	-82,2088	0,056321	108	-75,978	0,038461
25	-88,2912	0,038747	67	-82,0604	0,056316	109	-75,8297	0,037755
26	-88,1429	0,039447	68	-81,9121	0,056287	110	-75,6813	0,037046
27	-87,9945	0,040141	69	-81,7637	0,056232	111	-75,533	0,036335
28	-87,8462	0,04083	70	-81,6154	0,056153	112	-75,3846	0,035622
29	-87,6978	0,041513	71	-81,467	0,05605	113	-75,2363	0,034907
30	-87,5495	0,042188	72	-81,3187	0,055922	114	-75,0879	0,034191
31	-87,4011	0,042856	73	-81,1703	0,05577	115	-74,9396	0,033476
32	-87,2527	0,043515	74	-81,022	0,055594	116	-74,7912	0,032761
33	-87,1044	0,044165	75	-80,8736	0,055394	117	-74,6429	0,032048
34	-86,956	0,044805	76	-80,7253	0,055171	118	-74,4945	0,031336
35	-86,8077	0,045434	77	-80,5769	0,054925	119	-74,3462	0,030626
36	-86,6593	0,046052	78	-80,4286	0,054655	120	-74,1978	0,02992
37	-86,511	0,046658	79	-80,2802	0,054364	121	-74,0495	0,029217
38	-86,3626	0,047251	80	-80,1319	0,05405	122	-73,9011	0,028518
39	-86,2143	0,047831	81	-79,9835	0,053714	123	-73,7527	0,027823
40	-86,0659	0,048396	82	-79,8352	0,053357	124	-73,6044	0,027134
41	-85,9176	0,048947	83	-79,6868	0,052979	125	-73,456	0,02645

126	-73,3077	0,025772	171	-66,6319	0,005087
127	-73,1593	0,0251	172	-66,4835	0,004857
128	-73,011	0,024435	173	-66,3352	0,004636
129	-72,8626	0,023778	174	-66,1868	0,004423
130	-72,7143	0,023127	175	-66,0385	0,004218
131	-72,5659	0,022485	176	-65,8901	0,004021
132	-72,4176	0,021851	177	-65,7418	0,003831
133	-72,2692	0,021226	178	-65,5934	0,003649
134	-72,1209	0,020609	179	-65,4451	0,003473
135	-71,9725	0,020002	180	-65,2967	0,003305
136	-71,8242	0,019404	181	-65,1484	0,003144
137	-71,6758	0,018815	182	-65	0,002989
138	-71,5275	0,018237			
139	-71,3791	0,017668			
140	-71,2308	0,01711			
141	-71,0824	0,016562			
142	-70,9341	0,016024			
143	-70,7857	0,015497			
144	-70,6374	0,014981			
145	-70,489	0,014476			
146	-70,3407	0,013982			
147	-70,1923	0,013499			
148	-70,044	0,013026			
149	-69,8956	0,012565			
150	-69,7473	0,012114			
151	-69,5989	0,011675			
152	-69,4505	0,011247			
153	-69,3022	0,01083			
154	-69,1538	0,010423			
155	-69,0055	0,010028			
156	-68,8571	0,009643			
157	-68,7088	0,009269			
158	-68,5604	0,008905			
159	-68,4121	0,008552			
160	-68,2637	0,00821			
161	-68,1154	0,007877			
162	-67,967	0,007555			
163	-67,8187	0,007243			
164	-67,6703	0,00694			
165	-67,522	0,006648			
166	-67,3736	0,006365			
167	-67,2253	0,006091			
168	-67,0769	0,005827			
169	-66,9286	0,005571			
170	-66,7802	0,005325			

### APÊNDICE C – DADOS DA FDP: LONGLEY-RICE

Pontos	Corte	FDM	42	-84,70769231	0,041380207	84	-77,41538462	0,050652624
1	-91,82637363	0,013960901	43	-84,53406593	0,042027726	85	-77,24175824	0,050328403
2	-91,65274725	0,014486443	44	-84,36043956	0,042663077	86	-77,06813187	0,049980133
3	-91,47912088	0,015023915	45	-84,18681319	0,043285407	87	-76,89450549	0,049608341
4	-91,30549451	0,015573188	46	-84,01318681	0,043893871	88	-76,72087912	0,049213591
5	-91,13186813	0,016134109	47	-83,83956044	0,044487633	89	-76,54725275	0,048796475
6	-90,95824176	0,0167065	48	-83,66593407	0,045065871	90	-76,37362637	0,048357617
7	-90,78461538	0,01729016	49	-83,49230769	0,045627775	91	-76,2	0,047897669
8	-90,61098901	0,017884863	50	-83,31868132	0,046172549	92	-76,02637363	0,04741731
9	-90,43736264	0,018490355	51	-83,14505495	0,046699417	93	-75,85274725	0,046917244
10	-90,26373626	0,019106359	52	-82,97142857	0,047207622	94	-75,67912088	0,046398199
11	-90,09010989	0,019732571	53	-82,7978022	0,047696425	95	-75,50549451	0,045860924
12	-89,91648352	0,02036866	54	-82,62417582	0,048165112	96	-75,33186813	0,045306188
13	-89,74285714	0,021014268	55	-82,45054945	0,048612995	97	-75,15824176	0,044734779
14	-89,56923077	0,021669014	56	-82,27692308	0,049039408	98	-74,98461538	0,044147499
15	-89,3956044	0,022332486	57	-82,1032967	0,049443717	99	-74,81098901	0,043545168
16	-89,22197802	0,023004248	58	-81,92967033	0,049825315	100	-74,63736264	0,042928616
17	-89,04835165	0,023683836	59	-81,75604396	0,050183626	101	-74,46373626	0,042298683
18	-88,87472527	0,024370762	60	-81,58241758	0,050518107	102	-74,29010989	0,041656219
19	-88,7010989	0,02506451	61	-81,40879121	0,050828249	103	-74,11648352	0,041002081
20	-88,52747253	0,025764539	62	-81,23516484	0,051113577	104	-73,94285714	0,04033713
21	-88,35384615	0,026470282	63	-81,06153846	0,051373653	105	-73,76923077	0,039662231
22	-88,18021978	0,02718115	64	-80,88791209	0,051608076	106	-73,5956044	0,03897825
23	-88,00659341	0,027896526	65	-80,71428571	0,051816484	107	-73,42197802	0,038286051
24	-87,83296703	0,028615772	66	-80,54065934	0,051998552	108	-73,24835165	0,037586498
25	-87,65934066	0,029338226	67	-80,36703297	0,052153999	109	-73,07472527	0,036880449
26	-87,48571429	0,030063206	68	-80,19340659	0,052282581	110	-72,9010989	0,036168756
27	-87,31208791	0,030790006	69	-80,01978022	0,052384099	111	-72,72747253	0,035452266
28	-87,13846154	0,031517902	70	-79,84615385	0,052458393	112	-72,55384615	0,034731815
29	-86,96483516	0,032246151	71	-79,67252747	0,052505347	113	-72,38021978	0,034008228
30	-86,79120879	0,03297399	72	-79,4989011	0,052524887	114	-72,20659341	0,033282318
31	-86,61758242	0,033700642	73	-79,32527473	0,052516983	115	-72,03296703	0,032554886
32	-86,44395604	0,034425313	74	-79,15164835	0,052481647	116	-71,85934066	0,031826717
33	-86,27032967	0,035147194	75	-78,97802198	0,052418935	117	-71,68571429	0,03109858
34	-86,0967033	0,035865465	76	-78,8043956	0,052328945	118	-71,51208791	0,030371225
35	-85,92307692	0,036579295	77	-78,63076923	0,052211818	119	-71,33846154	0,029645386
36	-85,74945055	0,037287841	78	-78,45714286	0,052067736	120	-71,16483516	0,028921776
37	-85,57582418	0,037990253	79	-78,28351648	0,051896924	121	-70,99120879	0,028201088
38	-85,4021978	0,038685676	80	-78,10989011	0,051699648	122	-70,81758242	0,027483991
39	-85,22857143	0,039373248	81	-77,93626374	0,051476215	123	-70,64395604	0,026771136
40	-85,05494505	0,040052104	82	-77,76263736	0,05122697	124	-70,47032967	0,026063146
41	-84,88131868	0,040721379	83	-77,58901099	0,050952299	125	-70,2967033	0,025360623

126	-70,12307692	0,024664144	171	-62,30989011	0,004101527
127	-69,94945055	0,023974261	172	-62,13626374	0,003894143
128	-69,77582418	0,0232915	173	-61,96263736	0,003695313
129	-69,6021978	0,022616361	174	-61,78901099	0,003504803
130	-69,42857143	0,021949319	175	-61,61538462	0,003322378
131	-69,25494505	0,021290821	176	-61,44175824	0,003147803
132	-69,08131868	0,020641289	177	-61,26813187	0,002980842
133	-68,90769231	0,020001119	178	-61,09450549	0,002821263
134	-68,73406593	0,019370677	179	-60,92087912	0,002668832
135	-68,56043956	0,018750305	180	-60,74725275	0,002523317
136	-68,38681319	0,01814032	181	-60,57362637	0,00238449
137	-68,21318681	0,01754101	182	-60,4	0,002252124
138	-68,03956044	0,016952638			
139	-67,86593407	0,016375442			
140	-67,69230769	0,015809634			
141	-67,51868132	0,015255402			
142	-67,34505495	0,014712909			
143	-67,17142857	0,014182293			
144	-66,9978022	0,013663673			
145	-66,82417582	0,013157139			
146	-66,65054945	0,012662765			
147	-66,47692308	0,012180599			
148	-66,3032967	0,011710672			
149	-66,12967033	0,011252993			
150	-65,95604396	0,010807551			
151	-65,78241758	0,010374319			
152	-65,60879121	0,009953251			
153	-65,43516484	0,009544284			
154	-65,26153846	0,009147339			
155	-65,08791209	0,008762324			
156	-64,91428571	0,008389128			
157	-64,74065934	0,008027631			
158	-64,56703297	0,007677698			
159	-64,39340659	0,007339183			
160	-64,21978022	0,007011928			
161	-64,04615385	0,006695765			
162	-63,87252747	0,006390518			
163	-63,6989011	0,006095999			
164	-63,52527473	0,005812016			
165	-63,35164835	0,005538368			
166	-63,17802198	0,005274846			
167	-63,0043956	0,005021239			
168	-62,83076923	0,004777327			
169	-62,65714286	0,004542889			
170	-62,48351648	0,004317699			

## ANEXOS

## Specifications

*rocket M5*

DATA SHEET

*rocket M*

M5 Physical / Electrical / Environmental Information	
Dimensions	160 x 80 x 30 mm (6.30 x 3.15 x 1.18")
Weight	500 g (1.1 lb)
Enclosure Characteristics	Outdoor UV Stabilized Plastic
Processor	MIPS 74Kc
Memory	128 MB SDRAM, 8 MB Flash
Networking Interface	(1) 10/100 Mbps
RF Connections	(2) RP-SMA (Waterproof)
LEDs	Power, Ethernet, (4) Signal Strength
Max. Power Consumption	8W
Power Supply	24V, 1A PoE Adapter
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)
ESD/EMP Protection	± 24KV Air / Contact
Operating Temperature	-30 to 75° C (-22 to 167° F)
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4

M5 Software Information	
Modes	Access Point, Station
Services	Web Server, SNMP, SSH Server, Telnet, Ping Watchdog, DHCP, NAT, Bridging, Routing
Utilities	Antenna Alignment Tool, Discovery Utility, Site Survey, Ping, Traceroute, Speed Test
Distance Adjustment	Dynamic Ack and Ackless Mode
Power Adjustment	Software Adjustable UI or CLI
Security	WPA2 AES Only
QoS	Supports Packet Level Classification WMM and User Customer Level: High/Medium/Low
Statistical Reporting	Up Time, Packet Errors, Data Rates, Wireless Distance, Ethernet Link Rate
Other	Remote Reset Support, Software Enabled/Disabled, VLAN Support, 64QAM, 5/8/10/20/30/40 MHz Channel Width Support
Ubiquiti Specific Features	airMAX Mode, Traffic Shaping with Burst Support, Discovery Protocol, Frequency Band Offset, Ackless Mode

M5 Compliance	
Wireless Approvals	FCC, IC, CE
RoHS Compliance	Yes

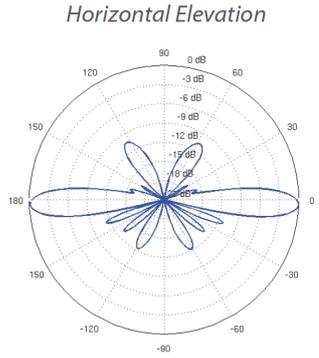
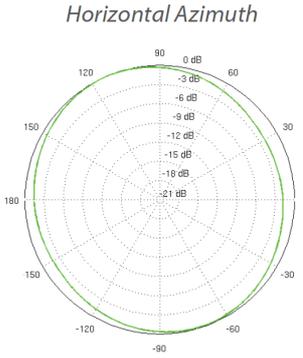
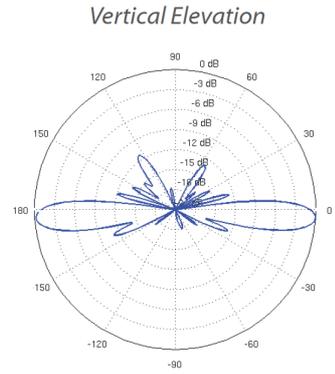
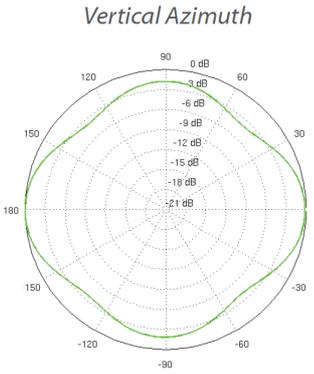
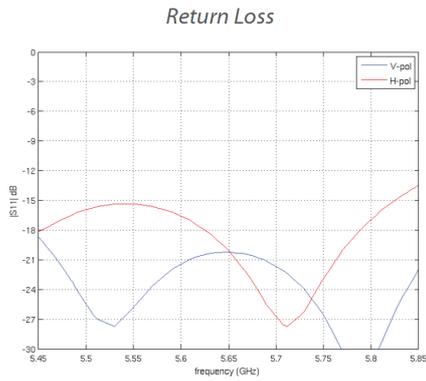
M5 Operating Frequency							
Operating Frequency				Worldwide: 5170 - 5875 MHz USA: 5725 - 5850 MHz*			
Output Power				27 dBm			
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
802.11a	6 + 24 Mbps	27 dBm	± 2 dB	802.11a	6 + 24 Mbps	-94 dBm Min.	± 2 dB
	36 Mbps	25 dBm	± 2 dB		36 Mbps	-80 dBm	± 2 dB
	48 Mbps	23 dBm	± 2 dB		48 Mbps	-77 dBm	± 2 dB
	54 Mbps	22 dBm	± 2 dB		54 Mbps	-75 dBm	± 2 dB
802.11n/airMAX	MCS0	27 dBm	± 2 dB	802.11n/airMAX	MCS0	-96 dBm	± 2 dB
	MCS1	27 dBm	± 2 dB		MCS1	-95 dBm	± 2 dB
	MCS2	27 dBm	± 2 dB		MCS2	-92 dBm	± 2 dB
	MCS3	27 dBm	± 2 dB		MCS3	-90 dBm	± 2 dB
	MCS4	26 dBm	± 2 dB		MCS4	-86 dBm	± 2 dB
	MCS5	24 dBm	± 2 dB		MCS5	-83 dBm	± 2 dB
	MCS6	22 dBm	± 2 dB		MCS6	-77 dBm	± 2 dB
	MCS7	21 dBm	± 2 dB		MCS7	-74 dBm	± 2 dB
	MCS8	27 dBm	± 2 dB		MCS8	-95 dBm	± 2 dB
	MCS9	27 dBm	± 2 dB		MCS9	-93 dBm	± 2 dB
	MCS10	27 dBm	± 2 dB		MCS10	-90 dBm	± 2 dB
	MCS11	27 dBm	± 2 dB		MCS11	-87 dBm	± 2 dB
	MCS12	26 dBm	± 2 dB		MCS12	-84 dBm	± 2 dB
	MCS13	24 dBm	± 2 dB		MCS13	-79 dBm	± 2 dB
	MCS14	22 dBm	± 2 dB		MCS14	-78 dBm	± 2 dB
MCS15	21 dBm	± 2 dB	MCS15	-75 dBm	± 2 dB		

\* US units with FCC ID: SWX-RM5 are allowed 5250 - 5850 MHz.



Antenna Characteristics					
Model	AMO-2G10	AMO-2G13	AMO-3G12	AMO-5G10	AMO-5G13
Dimensions* (mm)	1030 X 122 X 84	1390 X 122 X 105	1012 X 122 X 105	582 X 90 X 65	799 X 90 X 65
Weight*	2.1 kg	2.4 kg	2.05 kg	0.68 kg	0.82 kg
Frequency Range	2.35 - 2.55 GHz	2.35 - 2.55 GHz	3.4 - 3.7 GHz	5.45 - 5.85 GHz	5.45 - 5.85 GHz*
Gain	10 dBi	13 dBi	12 dBi	10 dBi	13 dBi
Elevation Beamwidth	12°	7°	8°	12°	7°
Max VSWR	1.7:1	1.7:1	1.6:1	1.6:1	1.5:1
Downtilt	4°	2°	4°	4°	2°
Wind Survivability	125 mph	125 mph	125 mph	125 mph	125 mph
Wind Loading	14 lb @ 100 mph	16 lb @ 100 mph	16 lb @ 100 mph	10 lb @ 100 mph	12 lb @ 100 mph
Polarization	Dual-Linear	Dual-Linear	Dual-Linear	Dual-Linear	Dual-Linear
Cross-pol Isolation	25 dB min.	25 dB min.	25 dB min.	25 dB min.	25 dB min.
ETSI Specification	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2
Mounting	Universal Pole Mount, RocketM Bracket, and Weatherproof RF Jumpers Included				

\* Dimensions and weight include pole mount and exclude RocketM (RocketM sold separately)



AMO-5G10  
(5 GHz, 10 dBi)

### Radio propagation model

Title	ITS Irregular Terrain Model (Longley-Rice)						
Code	Original FORTRAN code translated to C++ DLL						
Frequency Range	20 to 20000 MHz						
Surface Refractivity Range	250 to 400 N-Units						
Antenna heights Range	.5 to 2999m						
Elevation records	up to 158						
Elevation Range	-999m to 20000m						
Climates	Equatorial	Continental Subtropical	Maritime Sub- Tropical	Desert	Continental Temperate	Maritime Temperate Over Land	Maritime Temperate Over Sea
Modes of variation	Spot	Accidental	Mobile	Broadcast			
Statistical parameters	Time	Location	Situation				
Ground parameters	Conductivity	Relative Permittivity					

### System parameters

Tx power	1.0E-8 to 1.0E+6 Watts
Receiver threshold	0.01 to 2000 $\mu$ Volt
Line Loss	0 to 500 dB
Antenna gain	-10 to 100 dBi

### Networks

Number of networks	up to 50										
Number of units	up to 1000										
Number of systems	up to 255										
Topologies	Voice net	Data net, Star	Data net, Cluster								
Link parameters	Tx Power	Tx Loss	Line	Tx Gain	Antenna	Propagation Loss	Rx Gain	Antenna	Rx Loss	Line	Rx Sensitivity

### Elevation data matrix

Source Type	SRTM 1, 3	DTED 0, 1, 2	GTOPO30	GLOBE	BIL
Source Resolution	1/3, 1, 3, or 30 Arcsecond				
Matrix Size	up to 2000 x 2000 records				
Matrix Coverage	up to 5000 km				
Matrix Projection	Rectangular (aligned to latitude and longitude) compressed horizontally according to latitude				
Interpolation	Bi-linear				