

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

TALLES AMONY ALVES DE SANTANA

**ANÁLISE DA POLUIÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA REGIÃO URBANA DE
MOSSORÓ-RN**

MOSSORÓ – RN

2018

TALLES AMONY ALVES DE SANTANA

**ANÁLISE DA POLUIÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA REGIÃO URBANA DE
MOSSORÓ-RN**

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

Orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA.

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

MOSSORÓ – RN

2018

© 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 nº 9.610/1998. 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.

S231a Santana, Talles Amony Alves de.

Análise da Poluição Eletromagnética na Região Urbana de Mossoró-RN / Talles Amony Alves de Santana. - 2018.

114 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Coorientador: Idalmir de Sousa Queiroz Junior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2018.

1. Radiação. 2. Poluição Eletromagnética. 3. Técnicas de Interpolação. I. Andrade, Humberto Dionísio de , orient. II. Queiroz Junior, Idalmir de Sousa, 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.

TALLES AMONY ALVES DE SANTANA


**ANÁLISE DA POLUIÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA REGIÃO URBANA DE
MOSSORÓ-RN**

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

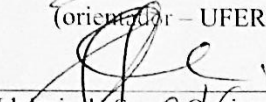
Defendida em: 01/02/2018.

BANCA EXAMINADORA

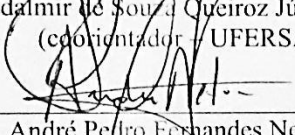
Mossoró, 01 de fevereiro de 2018



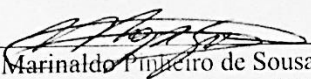
Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade
(orientador – UFERSA)



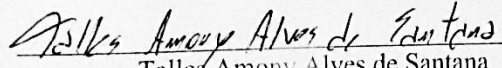
Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior - UFERSA
(coorientador – UFERSA)



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – UFERSA
(examinador interno – UFERSA)



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto - IFRN
(examinador externo – IFRN)



Talles Amony Alves de Santana

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Diones Alves por ter me ajudado e me incentivado durante todo o meu período de estudos.

Agradeço a minha namorada Taís Rebouças Reis por ter estado comigo todo esse tempo, por ser essa pessoa maravilhosa que me ajuda e me incentiva em todos os momentos sempre fazendo com que eu tenha forças para seguir em frente para conseguir meus objetivos.

Ao meu orientador, Humberto Dionísio de Andrade e ao meu co-orientador Idalmir Queiroz de Souza Júnior, pela ajuda, pela calma, pelo apoio e por todo o incentivo que me deram para a realização desse trabalho contribuindo com os seus conhecimentos.

Aos meus amigos de curso que muitas vezes me ajudaram como Thomas Tadeu, Alexandre Henrique, Francisco Magno, Samanta Mesquita, Kaick Viana, Alexandre de Moraes, Bruno Marcel, Isaac Barros, entre outros.

Ao professor Paulo César Moura da Silva que me ajudou disponibilizando o GPS para me auxiliar na realização das minhas medições.

E a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram durante toda essa trajetória.

Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.

Paulo Freire

RESUMO

O rápido progresso humano e a constante inovação tecnológica na área das telecomunicações faz com que cada vez mais as pessoas estejam expostas à radiação eletromagnética das mais variadas naturezas. A preocupação com os possíveis riscos a saúde que essa exposição pode provocar na população faz com que vários órgãos regulamentadores desenvolvam estudos com o objetivo de estabelecer limites aceitáveis de exposição humana a esse tipo de radiação. O conhecimento desses níveis de exposição à radiação e de como os campos eletromagnéticos se distribuem espacialmente em determinada região é de suma importância para o desenvolvimento de técnicas de proteção que sejam eficientes contra a exposição a essa radiação diminuindo os riscos às pessoas dessas áreas. Este trabalho tem como objetivo estudar a distribuição da radiação eletromagnética na região urbana de Mossoró, através da medição da intensidade dos campos elétricos, campos magnéticos e densidade de potência em 200 pontos utilizando um medidor adequado na faixa de 10 MHz a 8 GHz, utilizando como base a metodologia proposta na Resolução 303 da ANATEL. E, com esses dados, determinar, através da utilização de parâmetros estatísticos, qual a técnica de interpolação mais adequada para estimar a distribuição espacial desses campos em locais não amostrados utilizando curvas de nível, geradas pelo *software Golden Surfer*[®], responsáveis por indicar os locais mais expostos à radiação eletromagnética. Os pontos de medição foram escolhidos baseando-se na distância média entre as estações de rádio base existentes em cada uma das zonas de análise. Os valores medidos foram comparados com os estabelecidos pelas normas regulamentadoras para serem analisados de acordo com os padrões estabelecidos.

Palavras-chave: Radiação, Poluição Eletromagnética, Técnicas de Interpolação.

ABSTRACT

The fast human progress and a constant technological innovation in the area of telecommunications makes more and more people exposed to the electromagnetic radiation of the most varied natures. The concern with the possible health risks that this exposure can cause in the population causes that several regulatory agencies develop studies with the objective of establishing acceptable limits of human exposure to this type of radiation. Knowledge of these levels of radiation exposure and how electromagnetic fields are distributed spatially in a particular region is of paramount importance for the development of protection techniques that are effective against exposure to radiation reducing the risks to people in these areas. This work aims to study the distribution of electromagnetic radiation in the urban region of Mossoró by measuring the intensity of electric fields, magnetic fields and power density in 200 points using a suitable meter in the 10 MHz to 8 GHz range, based on the methodology proposed in Resolution 303 of ANATEL. And with these data, determine, through the use of statistical parameters, the most appropriate interpolation technique to estimate the spatial distribution of these fields in non-sampled areas using contour maps, created by the Golden Surfer[®] software, responsible for indicating the places most exposed to electromagnetic radiation. The measurement points were chosen based on the medium distance between the radio base stations in each of analysis zones. The measured values were compared with those established by regulatory organizations to be analyzed according to established standards.

Keywords: Radiation, Electromagnetic Pollution, Interpolation Techniques.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Forma geral das Equações de Maxwell.....	21
Tabela 2 - Características dos campos eletromagnéticos em diferentes regiões do espaço.	25
Tabela 3 – Atribuição de faixas de frequência no Brasil.....	27
Tabela 4 - Comportamento da absorção de energia eletromagnética de acordo com a frequência do sinal.....	42
Tabela 5 - Principais efeitos associados à exposição a radiação eletromagnética.....	42
Tabela 6 - Relação entre a faixa de frequência e a grandeza física associada para estabelecer as restrições básicas.....	46
Tabela 7 - Limite de exposição média de SAR.	47
Tabela 8 - Limites para exposição ocupacional a campos eletromagnéticos em radiofrequência na faixa de 9 kHz a 300 GHz.....	47
Tabela 9 - Limites para exposição do público em geral a campos eletromagnéticos em radiofrequência na faixa de 9 kHz a 300 GHz.....	48
Tabela 10 - Características dos centroides das zonas de análise	58
Tabela 11 - Principais características referentes às quatro zonas de análise.	65
Tabela 12 - Resultados dos parâmetros estatísticos para as técnicas de interpolação.....	71
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 01.....	73
Tabela 14 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 01..	73
Tabela 15 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 02.....	77
Tabela 16 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 02..	78
Tabela 17 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 03.....	82
Tabela 18 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 03..	83
Tabela 19 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 04.....	87
Tabela 20 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 04..	88
Tabela 21 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona urbana.....	92
Tabela 22 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona urbana.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fem induzida devido a uma espira estacionária imersa em um campo magnético B variável no tempo.	18
Figura 2 - Fem induzida devido à uma espira que se movimenta em um campo magnético estático.	19
Figura 3 - Regiões do campo eletromagnético	24
Figura 4 - Representação da onda eletromagnética na região de campo distante.	25
Figura 5 - Espectro eletromagnético.....	26
Figura 6 - Distribuição da radiação ionizante e não ionizante ao longo do espectro eletromagnético.	28
Figura 7 - Incidência de uma onda eletromagnética: (a) Campo E no plano de incidência; (b) Campo E normal ao plano de incidência.	32
Figura 8 - Difração de ondas de rádio com obstáculo.	33
Figura 9 - Representação do efeito de difração causado por uma obstrução entre o elemento transmissor e o receptor.	33
Figura 10 - Representação da propagação de uma onda em um ambiente urbano.....	35
Figura 11 - Curvas de Okumura que relacionam a frequência do sinal com a atenuação média.	37
Figura 12 - Curvas de correção do ganho de altura através do método de Okumura em função da: (a) Altura efetiva da estação base; (b) Altura da antena na estação veicular.	38
Figura 13 - Curvas de correção do ganho de área através do método de Okumura	39
Figura 14 - Geometria de propagação utilizada no modelo de Walfisch e Bertoni.....	41
Figura 15 - Imagem termográfica indicando os efeitos térmicos causados na cabeça humana: (a) Antes da utilização do celular; (b) Após a utilização do celular.....	43
Figura 16 - Níveis de referência para exposição a: (a) campos elétricos; (b) campos magnéticos.....	48
Figura 17 - Fluxograma do processo metodológico utilizado.	54
Figura 18 - Distribuição populacional nos maiores bairros de Mossoró.....	55
Figura 19 - Distribuição espacial por bairros das torres de estação de rádio base e radiodifusão (cada cor uma operadora).	56
Figura 20 - Representação das quatro zonas de análise.....	57
Figura 21 - Metodologia para a escolha dos locais baseada nas distâncias médias entre as torres e o centroide da zona de análise	59

Figura 22 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 01.	60
Figura 23 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 02.	61
Figura 24 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 03.	62
Figura 25 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 04.	63
Figura 26 - Localização dos 200 pontos onde foram realizadas as medições	64
Figura 27 - Medidor Tenmars TM-196	65
Figura 28 - Medidor Tenmars TM-196 montado sobre o tripé.	67
Figura 29 - GPS modelo GPS map 78s - GARMIN.....	67
Figura 30 - Sistema de medição na: (a) Zona 01; (b) Zona 02; (c) Zona 03; (d) Zona 04.	68
Figura 31 - Telas de trabalho do software SURFER [®] : (a) entrada dos dados; (b) escolha do método de interpolação; (c) criação de mapa de contorno; (d) criação de superfície 3D.	70
Figura 32 - Gráfico comparativo entre os valores medidos e estimados através do método da krigagem.	72
Figura 33 - Variação dos valores medidos na Zona 01: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	74
Figura 34 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 01: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.	75
Figura 35 - Variação dos valores medidos na Zona 02: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	78
Figura 36 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 02: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.	80
Figura 37 - Variação dos valores medidos na Zona 03: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	83
Figura 38 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 03: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de Exposição.	85
Figura 39 – Variação dos valores medidos na Zona 04: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	89
Figura 40 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 04: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.	90
Figura 41 - Variação dos valores medidos na Zona urbana: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.	93
Figura 42 - Comparação entre os valores medidos nas quatro zonas de análise: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência.	94

Figura 43 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona urbana: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição. 96

Figura 44 - Distribuição espacial do campo elétrico: (a) em função da localização das estações de radiodifusão e rádio base; (b) em função da localização dos pontos de medição. 98

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_{μ}	Atenuação do sinal para zonas urbanas com relação ao espaço livre
A_e	Abertura efetiva da antena;
a_{ij}	Coefficientes do método de interpolação de curvatura mínima
B	Densidade de fluxo magnético
C_m	Fator de correção para os ambientes no modelo COST de propagação
c	Calor específico
D	Densidade de fluxo elétrico
d	Distância entre a fonte transmissora e a receptora do sinal
dB	Decibel
dl	Elemento infinitesimal do comprimento da linha de carga
dS	Elemento infinitesimal da área de uma superfície de carga
dv	Elemento infinitesimal do volume de uma região de carga
E	Intensidade de campo elétrico
\vec{E}	Campo elétrico
E_{lim}	Valor limite do campo elétrico
E_m	Campo elétrico de movimento
eV	Eletron-volt
F_m	Força magnética
f	Frequência
$G(h_t)$	Fator de ganho devido à altura da estação transmissora
G_{AREA}	Fator de ganho devido ao ambiente
H	Intensidade de campo magnético
\vec{H}	Campo magnético
H_{lim}	Valor limite do campo magnético
h_r	Altura da estação receptora
h_t	Altura da estação transmissora
I	Corrente elétrica
J_c	Densidade de corrente elétrica de condução

J_d	Densidade de corrente elétrica de deslocamento
$J(h_r)$	Fator de correção devido à altura do terminal móvel
K	Fator de correção para o ambiente;
$L_{fs}(f, d)$	Perda no espaço livre em função da frequência e da distância
L_{ms}	Perda por difração devido às fileiras de prédios que sombreia o receptor no nível da rua
L_{rts}	Perda por dispersão e difração do telhado à rua
L_p	Valor médio da perda devido à propagação
N	Número de amostras
N_e	Número de espiras
PL	Atenuação do sinal propagado
P_r	Potência elétrica
p	Peso do parâmetro
Q	Carga elétrica
r_n	Raio do primeiro elipsoide de Fresnel
S	Densidade de potência
\vec{S}	Vetor densidade de potência
$s(x, y)$	Função do polinômio para o interpolador de curvatura mínima
T	Temperatura
t	Tempo
V_{fem}	Força eletromotriz induzida
v	Velocidade de uma carga elétrica em um campo magnético
v_d	Parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff
z	Valor medido
\hat{z}	Valor estimado
Z_0	Impedância intrínseca do meio

Letras Gregas

α	Constante de atenuação da onda
β	Constante de fase da onda
Γ	Coefficiente de reflexão de Fresnel
γ	Constante de propagação da onda

$\gamma(h)$	Semivariograma estimado
ϵ	Permissividade elétrica do meio
ϵ_0	Permissividade elétrica no espaço livre
θ	Ângulo de incidência da onda
λ	Comprimento de onda
λ_i	Soluções do sistema linear associado ao método da krigagem
μ	Permeabilidade magnética do meio
ρ	Densidade de carga
ρ'	Densidade da massa específica do tecido
ρ_L	Densidade de carga linear
ρ_v	Densidade de carga volumétrica
σ	Condutividade elétrica do meio

Siglas

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

COST – *European Cooperation in Science and Technology* (Cooperação Europeia para Ciência e Tecnologia)

EHF – *Extremely High Frequency* (Frequência Extremamente Elevada)

ER – *Exposure Ratio* (Razão de Exposição)

ERB – Estações de Rádio Base

HF – *High Frequency* (Alta Frequência)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (Comissão Internacional para Proteção Contra Radiação Não Ionizante)

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

ITU – *International Telecommunication Union* (União Internacional de Telecomunicações)

IDP – *Inverse Distance to a Power* (Inverso Ponderado da Distância)

KG – *Kriging* (Krigagem)

LF – *Low Frequency* (Baixa Frequência)

MAE – *Mean Error Absolute* (Erro Médio Absoluto)

MF – *Medium Frequency* (Frequência Média)

OMS – Organização Mundial da Saúde

RBF – *Radial Basis Function* (Função de Base Radial)

RMSE – *Root Mean Square Error* (Erro Quadrático Médio)

SAR – *Specified Absorption Rate* (Taxa de Absorção Específica)

SHF – *Super High Frequency* (Frequência Super Elevada)

UHF – *Ultra High Frequency* (Frequência Ultra Alta)

VHF – *Very High Frequency* (Frequência Muito Alta)

VLf – *Very Low Frequency* (Frequência Muito Baixa)

WHO – *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	CAMPOS VARIANTES NO TEMPO.....	17
2.1.1	Fem de transformação	18
2.1.2	Fem de movimento	19
2.1.3	Corrente de deslocamento	20
2.1.4	Equações de Maxwell	21
2.1.5	Equação da Onda	22
2.1.6	Densidade de Potência	23
2.1.7	Regiões do Campo Eletromagnético	24
2.1.8	Espectro Eletromagnético.....	26
2.1.9	Radiação Eletromagnética.....	27
2.1.10	Taxa de Absorção Específica de Energia (SAR)	29
2.1.11	Razão de Exposição.....	30
2.2	PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	30
2.2.1	Mecanismos de Propagação.....	31
2.2.1.1	Reflexão	31
2.2.1.2	Difração	32
2.2.1.3	Dispersão	34
2.2.2	Ambientes de Propagação	34
2.2.3	Propagação no Espaço Livre.....	35
2.2.4	Modelos de Propagação	36
2.2.4.1	Modelo de Okumura	36
2.2.4.2	Modelo de Okumura-Hata	39
2.2.4.3	Modelo COST 231 - Hata.....	40
2.2.4.4	Modelo de Walfisch e Bertoni	40
2.3	EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	41
2.3.1	Efeitos Térmicos	43
2.3.2	Efeitos não Térmicos	44

2.4	NORMAS REGULAMENTADORAS PARA EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS.....	44
2.4.1	ICNIRP.....	45
2.4.1.1	Restrições Básicas.....	46
2.4.1.2	Níveis de Referência.....	47
2.4.2	ANATEL.....	49
2.5	TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO.....	49
2.5.1	Inverso Ponderado da Distância.....	51
2.5.2	Krigagem.....	51
2.5.3	Função de Base Radial.....	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	55
3.2	ESCOLHA DOS PONTOS.....	57
3.2.1	Zona 01.....	60
3.2.2	Zona 02.....	61
3.2.3	Zona 03.....	62
3.2.4	Zona 04.....	63
3.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	65
3.3.1	Calibração do Medidor Tenmars TM-196.....	66
3.4	CAMPANHA DE MEDIÇÃO.....	66
3.5	TRATAMENTO NUMÉRICO COMPUTACIONAL.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1	ZONA 01.....	72
4.2	ZONA 02.....	77
4.3	ZONA 03.....	82
4.4	ZONA 04.....	87
4.5	ZONA URBANA.....	92
5	CONCLUSÕES.....	100
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
	REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria das telecomunicações passou por uma evolução em seus sistemas, causada principalmente pelo avanço da tecnologia das comunicações móveis. Esse avanço fez com que o número de estações de rádio base (ERB) nos ambientes urbanos aumentasse em grande proporção, aproximando-as cada vez mais de regiões altamente povoadas nos centros urbanos. Essa aproximação faz com que as autoridades responsáveis aumentem sua preocupação com os possíveis efeitos negativos que essa exposição maior a campos eletromagnéticos possa causar à saúde das pessoas que ali residem (LINHARES et al. 2013). Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), dentre os principais efeitos negativos associados a esse tipo de exposição podem ser destacados o cansaço, a fadiga e a dor de cabeça.

Para diminuir esses impactos, vários órgãos nacionais e internacionais estabelecem limites máximos de exposição a campos eletromagnéticos ao quais as pessoas podem estar submetidas, além da avaliação dos possíveis efeitos biológicos que isso pode trazer à saúde das pessoas, assim como parâmetros e métodos para determinar se os valores de intensidade dos campos eletromagnéticos estão dentro dos limites aceitáveis para uma determinada região. Segundo Lewicki (2009), há duas formas básicas de se realizar essa avaliação, através da utilização de medições de campo e através de modelos teóricos, onde cada um desses métodos possui características específicas sendo adequados para determinados modelos de análise.

Para as medições de campo, podem ser utilizados medidores que trabalhem em uma frequência selecionada específica ou em uma faixa que considere a soma das contribuições individuais em todas as direções e polarizações (LINHARES et al. 2014). A escolha dos pontos onde as medições serão realizadas é de suma importância para uma avaliação correta da exposição aos campos eletromagnéticos, porém para uma avaliação mais completa da influência que os campos exercem em uma determinada área é necessário que se conheça de que forma esses campos estão distribuídos espacialmente nessa área (SANTANA et al. 2017).

Essa distribuição é feita com o auxílio de técnicas de interpolação espacial capazes de estimar valores em locais não amostrados através de equações específicas, onde a correta escolha do método de interpolação faz com que a superfície gerada represente de forma mais real os dados amostrados (AZPURUA E DOS RAMOS, 2010).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a distribuição da radiação eletromagnética na região urbana da cidade de Mossoró, através da medição da intensidade dos campos elétricos, campos magnéticos e densidade de potência com medidor na faixa de 10 MHz a 8 GHz.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A seguir são mostrados os objetivos específicos que devem ser realizados para se chegar ao objetivo geral.

- Identificar a localização das principais fontes de poluição eletromagnética na região urbana de Mossoró;
- Medir a intensidade de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência na faixa de 10 MHz a 8 GHz;
- Estimar a distribuição espacial dos campos eletromagnéticos na região urbana de Mossoró;
- Comparar os valores obtidos através das medições com os valores limites estabelecidos pelos órgãos regulamentadores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos usados para o desenvolvimento desse trabalho. Nas seções a seguir são abordados conceitos fundamentais sobre poluição eletromagnética, campos eletromagnéticos e suas principais características, explicando de que forma eles se propagam e como interagem com o corpo humano. Também serão vistos os principais aspectos legais que regulamentam a intensidade de exposição que a população pode estar submetida a esse tipo de radiação, além de alguns métodos de interpolação usados nesse estudo.

2.1 CAMPOS VARIANTES NO TEMPO

Após a demonstração de que uma corrente elétrica tem a capacidade de interagir com uma agulha magnética feita por Oersted em 1820, Faraday convenceu-se que, assim como a corrente elétrica tem a capacidade de gerar um campo magnético, o campo magnético será capaz de produzir uma corrente elétrica (HAYT JÚNIOR, 2013).

Segundo Wentworth (2006), Faraday observou através de seus experimentos, juntamente com Joseph Henry, que a variação temporal do fluxo magnético em um circuito elétrico tem a capacidade de induzir corrente elétrica nesse circuito. É possível dizer então que, a variação temporal do campo magnético, em um circuito fechado, produz uma força eletromotriz induzida (V_{fem}) igual à taxa de variação temporal do fluxo magnético enlaçado por esse circuito, esse é o enunciado da Lei de Faraday que pode ser representada matematicamente através da Equação 1.

$$V_{fem} = -N \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

onde N é o número de espiras no circuito, ψ é o fluxo em cada espira e V_{fem} a força eletromotriz induzida em Volts. O sinal negativo na Equação 1 é consequência da Lei de Lenz e representa que a tensão induzida age de forma a gerar um fluxo que se opõe ao fluxo original (WENTWORTH, 2006).

Escrevendo a Equação 1 em função do campo elétrico e do campo magnético, ela se torna a Equação 2.

$$V_{fem} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

onde \vec{E} representa o vetor campo elétrico e \vec{B} o vetor densidade de fluxo magnético. Para que V_{fem} surja, é necessário que haja uma variação temporal do fluxo magnético através do circuito, isso pode ocorrer através da variação do campo magnético com o tempo, *fem* de transformação, e através da variação da superfície contendo o fluxo, *fem* de movimento (WENTWORTH, 2006).

2.1.1 Fem de transformação

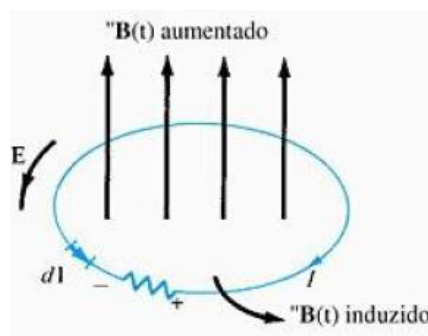
Nesse caso, o fluxo magnético varia com o tempo fazendo com que o termo dt possa ser tomado dentro do sinal da integração. Aplicando o Teorema de Stokes à Equação 2 é possível obter a Equação 3 que representa uma das quatro Equações de Maxwell.

$$\int (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

A partir da Equação 3 é possível notar que o campo elétrico variável no tempo é um campo não conservativo já que $\nabla \times \vec{E} \neq \vec{0}$. A Figura 1 ilustra a *fem* de transformação.

Figura 1 - Fem induzida devido a uma espira estacionária imersa em um campo magnético B variável no tempo.



Fonte: SADIKU, 2004.

2.1.2 Fem de movimento

Nesse caso, o fluxo magnético variável é obtido pela variação da área do circuito em um campo magnético constante. Sendo assim, a Equação 2 pode ser modificada utilizando-se o conceito de força magnética (HAYT JÚNIOR, 2013). Sabe-se que a força magnética \vec{F}_m em uma carga Q que se move com velocidade \vec{v} em um campo magnético \vec{B} pode ser dada pela Equação 4.

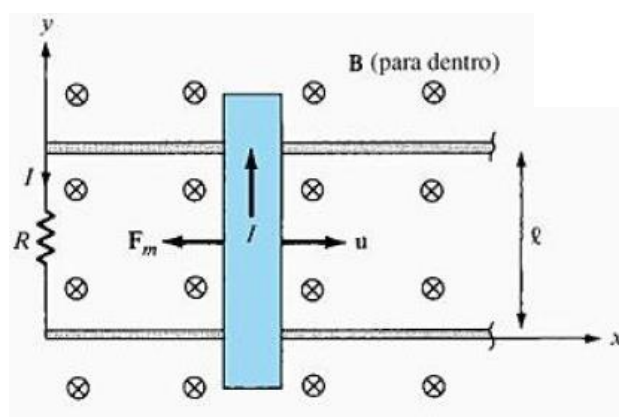
$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

Definindo o campo elétrico de movimento, \vec{E}_m como a relação entre a força magnética \vec{F}_m por unidade de carga Q , a força eletromotriz induzida, V_{fem} pode ser dada pela Equação 5.

$$V_{fem} = \oint \vec{E}_m \cdot d\vec{L} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (5)$$

A força eletromotriz dada através da Equação 5 é o tipo de *fem* que se encontra nas principais máquinas elétricas como motores, geradores e alternadores. A Figura 2 ilustra a *fem* de movimento.

Figura 2 - Fem induzida devido à uma espira que se movimenta em um campo magnético estático.



Fonte: SADIKU, 2004.

2.1.3 Corrente de deslocamento

Para campos eletromagnéticos estáticos, a lei circuital de Ampère pode ser dada pela Equação 6.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c \quad (6)$$

onde \vec{H} é a intensidade do campo magnético e \vec{J}_c é a densidade de corrente de condução. Porém, aplicando o divergente a ambos os lados da Equação 6, obtém-se o resultado dado pela Equação 7.

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \nabla \cdot \vec{J}_c = 0 \quad (7)$$

Entretanto, pela equação da continuidade da corrente, tem-se que $\nabla \cdot \vec{J}_c \neq 0$, o que mostra que a lei circuital de Ampere viola essa condição, tornando-a inválida para campos variantes no tempo (WENTWORTH, 2006). Para solucionar esse problema, Maxwell adicionou à Equação 7 um novo termo chamado de densidade de corrente de deslocamento, \vec{J}_d , que representa a taxa de variação temporal da densidade de fluxo elétrico. Isso faz com que a lei circuital de Ampere torne-se válida para campos variantes no tempo e possa ser representada matematicamente através da Equação 8.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (8)$$

onde \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico e o termo $\partial \vec{D} / \partial t$ representa a densidade de corrente de deslocamento. A semelhança existente entre as Equações 8 e 3 ilustra a dependência existente entre os campos elétrico e magnéticos variantes no tempo (WENTWORTH, 2006). Integrando ambos os lados e aplicando o Teorema de Stokes à Equação 8 é possível obter a forma integral da lei circuital de Ampère que pode ser visualizada na Equação 9.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = \int \vec{J}_c \cdot d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (9)$$

2.1.4 Equações de Maxwell

A principal base teórica para o entendimento dos fenômenos eletromagnéticos pode ser formulada através das equações de Maxwell formuladas em 1865. Essas equações foram desenvolvidas pelo físico escocês James Clark Maxwell (1831-1879) que é considerado o fundador da Teoria Eletromagnética. Ele elaborou sua teoria baseando-se nos trabalhos de Ampere, Gauss e Faraday com o objetivo de unificar esse conhecimento desenvolvido por eles sobre quatro equações (POZAR, 2012). Essas equações são capazes de descrever as relações existentes entre o campo elétrico e o campo magnético. De forma resumida, as equações mostram que um campo magnético variante no tempo induz a formação de um campo elétrico e vice-versa (WENTWORTH, 2006).

As equações podem ser escritas nas formas integral e diferencial e recebem o nome de Lei de Faraday, Lei de Ampere, Lei de Gauss e Lei de Gauss para o magnetismo. A Tabela 1 lista essas Equações.

Tabela 1 - Forma geral das Equações de Maxwell.

Equações	Forma diferencial	Forma integral
Lei de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Lei circuital de Ampère	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{J}_c \cdot d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{D} \cdot d\vec{S}$
Lei de Gauss	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q_{env}$
Lei de Gauss para magnetismo	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

Fonte: WENTWORTH, 2006.

portanto, \vec{E} representa a o vetor campo elétrico, \vec{B} o vetor densidade de fluxo magnético, \vec{H} o vetor intensidade de campo magnético, \vec{D} o vetor densidade de fluxo elétrico, \vec{J}_c o vetor densidade de corrente de condução, Q_{env} a carga envolvida e ρ_v a densidade volumétrica de carga.

2.1.5 Equação da Onda

Segundo Wentworth (2006), se existe, em algum ponto do espaço, uma fonte de campo elétrico variante, pela lei circuital de Ampère, um campo magnético variante será induzido ao redor desse ponto e, como esse campo magnético também é variável no tempo, segundo a lei de Faraday, um campo elétrico será induzido por esse campo magnético. Esses campos se afastam da fonte de maneira esférica até que, em uma determinada região do espaço, os campos se comportam como ondas planas uniformes, onde os campos elétrico e magnético se tornam ortogonais com relação à direção de propagação (WENTWORTH, 2006).

Uma equação que possa representar a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço pode ser obtida através da utilização das Equações de Maxwell mostradas na Tabela 1. Aplicando as condições relativas aos meios materiais simples, ou seja, lineares, isotrópicos, invariantes no tempo e homogêneos, as Equações de Maxwell podem ser escritas utilizando o conjunto de Equações 10.

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0\end{aligned}\tag{10}$$

onde σ, ε e μ representam, respectivamente, a condutividade, a permissividade e a permeabilidade do meio a que estão inseridos. Aplicando o rotacional à lei de Faraday mostrada no conjunto de Equações 10, ela se torna a Equação 11.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H})\tag{11}$$

Reescrevendo a Equação 11 através da substituição do valor de $\nabla \times \vec{H}$ dado pelo conjunto de Equações 10, obtém-se a Equação 12.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (12)$$

Utilizando manipulação algébrica e identidades vetoriais, é possível reescrever a Equação 12 de modo que ela se torne a Equação 13.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (13)$$

Através de raciocínio análogo, é possível obter a Equação 14 representando o campo magnético H .

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (14)$$

As Equações 13 e 14 são as equações de onda de Helmholtz para campos elétrico e magnético, respectivamente. Ambas as equações podem ser decompostas em função dos eixos x , y e z tornando-se equações escalares que podem ser resolvidas em função da posição e do tempo (WENTWORTH, 2006). Derivando com relação ao tempo as Equações 13 e 14, é possível escrevê-las sob a forma do conjunto de Equações 15.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} &= \vec{0} \\ \nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} &= \vec{0} \end{aligned} \quad (15)$$

onde γ , dado por $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta$, é a constante de propagação, enquanto α e β representam, respectivamente, a constante de atenuação e a constante de fase da onda propagada.

2.1.6 Densidade de Potência

Segundo Paul (2004), em campos eletromagnéticos há energia armazenada, porém ao contrário dos circuitos elétricos, onde a energia e a potência estão localizadas nos elementos, em campos eletromagnéticos a energia armazenada está distribuída através dele não estando concentrada em um ou mais pontos.

Nesses campos, a potência é transportada através do meio de propagação de um ponto a outro, sendo assim estabelece-se uma relação entre as magnitudes de campo elétrico, \vec{E} , em V/m e campo magnético, \vec{H} , em A/m para indicar o quanto de potência está sendo transmitida de um local a outro na região do campo, a essa relação dá-se o nome de densidade de potência e sua unidade é W/m^2 . A Equação 16 indica essa relação:

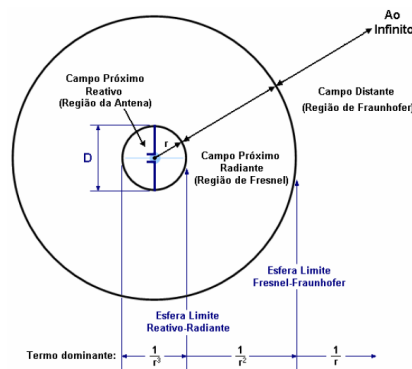
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (16)$$

onde \vec{S} é o vetor densidade de potência, \vec{E} o vetor campo elétrico e \vec{H} o vetor campo magnético. A Resolução 303 da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) de 2002 define a densidade de potência como sendo a potência expressa em Watt por metro quadrado que atravessa uma unidade de área normal à direção de propagação.

2.1.7 Regiões do Campo Eletromagnético

À medida que a onda eletromagnética se propaga no espaço e se afasta de forma gradativa da fonte geradora, suas características e propriedades se alteram, fazendo com que sejam necessárias equações diferentes para representar a onda nessas zonas que são conhecidas como regiões do campo eletromagnético (BALANIS, 2005). Segundo a União Internacional de Telecomunicações (*ITU – International Telecommunication Union*), as regiões do campo eletromagnético se dividem em quatro tipos: região de campo reativo próximo, região de campo radiante próximo (zona de Fresnel) e região de campo distante (zona de Fraunhofer). A Figura 3 representa as regiões do campo eletromagnético no entorno de uma antena, sendo d a maior dimensão da antena e r o raio da esfera limite.

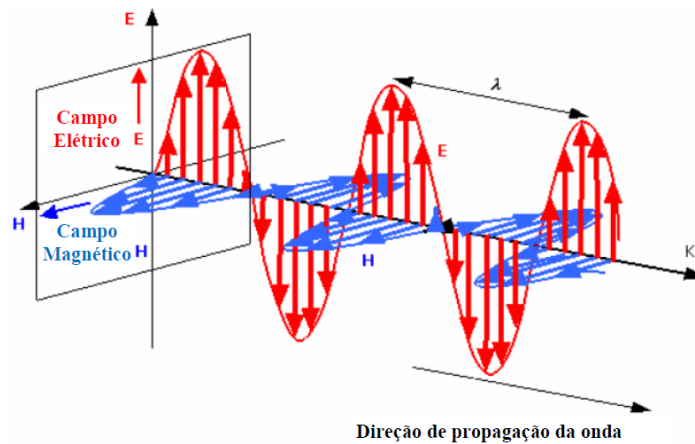
Figura 3 - Regiões do campo eletromagnético



Fonte: VALENTE JÚNIOR, 2006.

Nas regiões de campo próximo há um predomínio de campo reativo e a frente de onda não possui a forma de uma geometria plana, fazendo com que o ganho máximo nessa região seja menor (ITU, 2008). Com o afastamento da fonte geradora, a onda entra na região de campo distante, onde sua impedância se aproxima da impedância intrínseca do meio no valor de $120\pi \Omega$ e a densidade de potência se torna constante sendo o produto entre os vetores de campo elétrico e magnético, que junto com o vetor direção de propagação tornam-se perpendiculares entre si (SOUZA FILHO, 2015). A Figura 4 representa o comportamento da onda eletromagnética na região de campo distante.

Figura 4 - Representação da onda eletromagnética na região de campo distante.



Fonte: SOUZA FILHO, 2015.

As principais características das regiões do campo eletromagnético podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos campos eletromagnéticos em diferentes regiões do espaço.

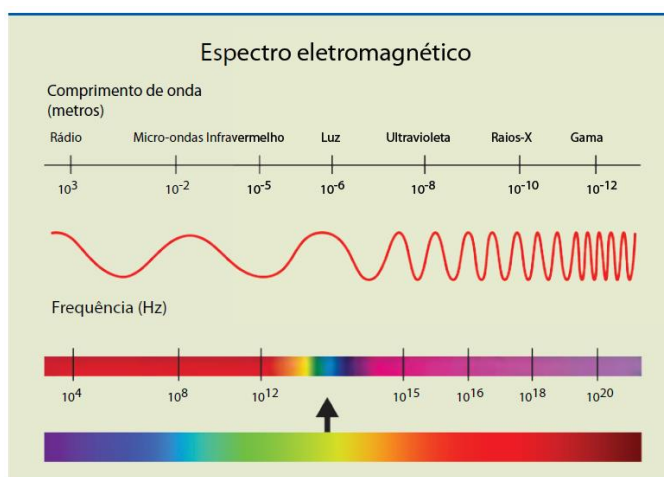
	Campo reativo próximo	Campo radiante próximo	Campo distante
Limite inferior	0	3λ	Máx ($3\lambda; 2d^2/\lambda$)
Limite superior	λ	Máx ($3\lambda; 2d^2/\lambda$)	∞
Densidade de potência S [W/m ²]	$S \leq \vec{E} \vec{H} $	$S \leq \vec{E} \vec{H} \approx \frac{ \vec{E} ^2}{Z_0}$ $\approx Z_0 \vec{H} ^2$	$S = \vec{E} \vec{H} = \frac{ \vec{E} ^2}{Z_0}$ $= Z_0 \vec{H} ^2$
$\vec{E} \perp \vec{H}$	Não	Localmente	Sim
$Z = \vec{E} / \vec{H} $	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$

Fonte: Adaptado de ITU, 2008.

2.1.8 Espectro Eletromagnético

As ondas de campo elétrico e campo magnético podem ser divididas de acordo com sua frequência em várias faixas. Cada uma dessas faixas possui aplicações, características e emitem tipos de radiações diferentes. Ao intervalo completo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética dá-se o nome de espectro eletromagnético (MARTINS, 2000). Esse espectro se estende das ondas de baixa frequência, como as ondas de rádio, até as ondas de maior frequência como as ondas de radiação gama. A Figura 5 mostra uma representação do espectro eletromagnético.

Figura 5 - Espectro eletromagnético



Fonte: CARVALHO e BADINHAN, 2011.

Segundo Novo (2011), cada uma dessas regiões do espectro eletromagnético é função do processo físico a que lhes deu origem, assim como do tipo de interação que existe entre a onda e o objeto sobre o qual ela incide. Sendo assim, cada uma dessas faixas se torna mais adequadas ao uso em determinadas aplicações em diversas áreas que vão desde a área de comunicação até o uso em setores da medicina. A Tabela 3 mostra a divisão do espectro eletromagnético em função de algumas de suas atribuições relacionadas a uma faixa de frequência específica.

Tabela 3 – Atribuição de faixas de frequência no Brasil.

Sigla	Designação	Faixa de frequência	Principais atribuições
VLF	Muito baixa	3 kHz a 30 kHz	Radionavegação, Móvel, Fixo
LF	Baixa	30 kHz a 300 kHz	Fixo, Móvel, Radionavegação aeronáutica
MF	Média	300 kHz a 3 MHz	Radiodifusão, Móvel aeronáutico
HF	Elevada	3 MHz a 30 MHz	Fixo, Móvel, Radiodifusão
VHF	Muito elevada	30 MHz a 300 MHz	Radiodifusão, Fixo, Radionavegação aeronáutica
UHF	Ultra elevada	300 MHz a 3 GHz	Radiodifusão, Operação espacial, Radionavegação aeronáutica
SHF	Super elevada	3 GHz a 30 GHz	Operação Espacial
EHF	Extremamente elevada	30 GHz a 300 GHz	Radioastronomia, Aplicações médicas

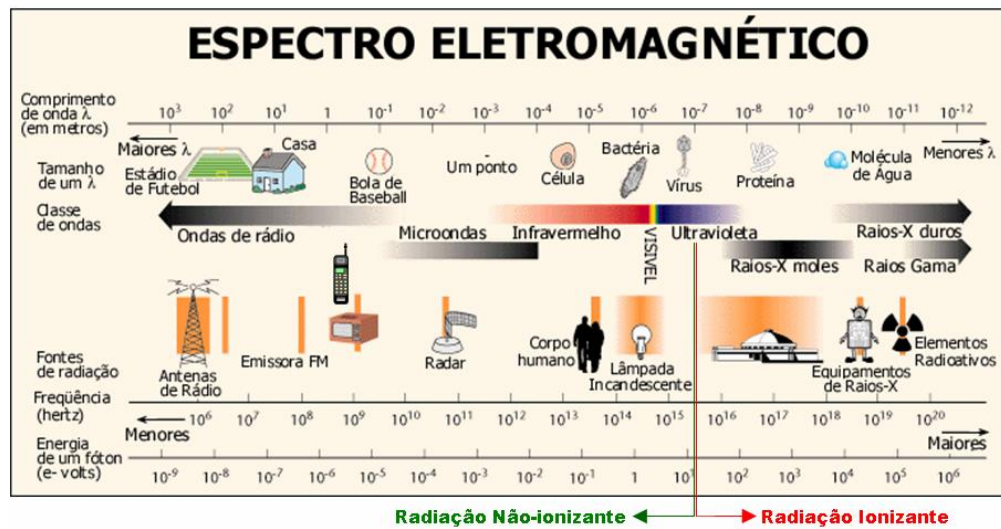
Fonte: Adaptado de ANATEL, 2012.

A ANATEL possui um plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequências no Brasil, onde é estabelecida a atribuição para a utilização de determinadas faixas de frequências de acordo com tratados internacionais, além de facilitar o planejamento para o uso do espectro de radiofrequências no Brasil (ANATEL, 2012).

2.1.9 Radiação Eletromagnética

Segundo Lopes Netto e Azevedo (2005), a radiação eletromagnética pode ser definida como a propagação de energia através do espaço e da matéria pela variação temporal dos campos elétricos e magnéticos caracterizados por sua frequência. De acordo com o modo com que interage com os materiais, a radiação eletromagnética pode ser dividida em dois tipos, radiação ionizante e radiação não ionizante. A Figura 6 ilustra a distribuição das radiações ionizantes e não ionizantes ao longo do espectro eletromagnético.

Figura 6 - Distribuição da radiação ionizante e não ionizante ao longo do espectro eletromagnético.



Fonte: VALENTE JÚNIOR, 2006.

A radiação ionizante é o tipo de radiação capaz de ionizar os átomos do material com que interage, caracterizado por possuir energia, por fóton, maior ou igual a 12 eV, e frequências maiores do que 300 GHz (ANATEL, 2002). A energia desse tipo de radiação é maior do que a energia da ligação dos elétrons ligados aos átomos dos elementos que interagem com ela, sendo assim capaz de removê-los (PINHEIRO, 2015).

Esse tipo de radiação tem a capacidade de produzir efeitos diretos e indiretos no DNA ao interagir com ele, provocando lesões em sua estrutura (COATES et al. 2004). Não há um consenso sobre um limite mínimo permitido para exposição a esse tipo de radiação, de modo que qualquer dose possa provocar efeitos biológicos nocivos, já que os elétrons retirados dos átomos se rearranjam a outros átomos alterando o valor de sua carga danificando as substâncias químicas existentes no interior das células (MESQUITA, 2011).

Segundo a Comissão Internacional de Proteção contra Radiação não Ionizante (ICNIRP – *International Commission on Non Ionizing Radiation Protection*), a radiação não-ionizante é caracterizada por possuir comprimento de onda maior que 100 nm, frequência abaixo de 300 GHz e energia, por fóton, inferior a 12 eV, não possuindo portanto energia suficiente para ionizar a matéria (ICNIRP, 2009). De modo geral, basicamente todos os serviços de radiocomunicação como telefonia móvel, radiodifusão e TV são abrangidos por essa faixa do espectro eletromagnético (PINHEIRO et al. 2015).

A radiação não-ionizante pode causar dois tipos principais de efeitos biológicos, os efeitos térmicos que são causados pelo aquecimento direto dos tecidos biológicos como

resultado da absorção da energia eletromagnética e, os efeitos não térmicos que são efeitos bioquímicos causados pela interação do organismo com o campo eletromagnético (SALLES, 1999).

Os níveis de referência estabelecidos pelos principais órgãos regulamentadores de exposição à radiação eletromagnética são baseados nos efeitos térmicos da radiação não ionizante. Para avaliar os possíveis efeitos dessa exposição é necessária a utilização de um parâmetro dosimétrico adequado capaz de quantificar a energia absorvida pelo meio biológico, o principal parâmetro utilizado para esse objetivo é a Taxa de Absorção Específica (*SAR – Specific Energy Absorption Rate*) (WOLLINGER, 2003).

2.1.10 Taxa de Absorção Específica de Energia (SAR)

A Taxa de Absorção Específica de Energia, SAR (*Specific Energy Absorption Rate*) é definida como a taxa na qual a energia eletromagnética é absorvida no tecido do corpo em Watt por quilograma (W/kg) (ANATEL, 2002). Segundo Souza Filho (2015), essa taxa é a principal medida utilizada em estudos sobre exposição a campos eletromagnéticos na faixa de 100 kHz a 10 GHz. A quantidade de energia eletromagnética que uma pessoa absorve está ligada com a intensidade do campo elétrico a que ela esteja submetida, dessa energia, uma parte é absorvida enquanto o restante atravessa o corpo ou é refletida dependendo da frequência do sinal (VALBERG, 2005), sendo as crianças o grupo mais vulnerável aos possíveis efeitos nocivos da radiação eletromagnética devido a diferenças existentes entre seu sistema fisiológico e o dos adultos (IBRANI et al., 2014).

Matematicamente, essa taxa de absorção pode ser calculada através da Equação 17:

$$SAR = \frac{\sigma |\vec{E}|^2}{\rho'} \quad (17)$$

onde $|\vec{E}|$ é o módulo do valor eficaz do campo elétrico em V/m , σ é a condutividade do tecido sob análise em S/m e ρ' é a densidade de massa específica do tecido em kg/m^3 .

É possível observar que SAR implica em absorção de energia o que resulta em efeitos térmicos como o acréscimo da temperatura no corpo exposto. A relação entre o aumento de temperatura e a quantidade de energia absorvida pelo corpo pode ser dada através da Equação 18:

$$SAR = \frac{c\Delta T}{\Delta t} \quad (18)$$

onde ΔT é a variação de temperatura em $^{\circ}\text{C}$, Δt é o intervalo de tempo em que o tecido está exposto à radiação em s e c é o calor específico do tecido em $J/kg^{\circ}\text{C}$. A análise do SAR pode ser feita com relação ao corpo inteiro, nesse caso utiliza-se o conceito de SAR média que é uma relação entre a potência total absorvida pelo corpo e sua massa, ou feita localmente onde tem-se o conceito de SAR local, que é definida como a potência absorvida por um grama de tecido (ICNIRP, 1998).

2.1.11 Razão de Exposição

Embora a SAR sirva como um parâmetro importante para avaliação sobre os níveis de exposição à radiação eletromagnética que uma pessoa está sujeita em um determinado ambiente, quando há uma exposição simultânea a múltiplas frequências, uma melhor avaliação pode ser feita através da utilização do parâmetro Razão de Exposição (*ER - Exposure Ratio*) (PINHEIRO, 2015).

Segundo a União Internacional de Telecomunicações (2014), a Razão de Exposição é uma relação quadrática entre os valores de campos elétricos ou campos magnéticos medidos em torno de uma determinada frequência e o valor limite estabelecido para a grandeza avaliada. Matematicamente, a Razão de Exposição pode ser calculada pela Equação 19:

$$ER = \left(\frac{|\vec{E}|}{\vec{E}_{lim}} \right)^2 = \left(\frac{|\vec{H}|}{\vec{H}_{lim}} \right)^2 \leq 1 \quad (19)$$

onde $|\vec{E}|$ é o módulo do valor eficaz do campo elétrico e $|\vec{H}|$ é o módulo do valor eficaz do campo magnético em uma determinada frequência analisada e \vec{E}_{lim} e \vec{H}_{lim} são os valores limites estabelecidos por norma, Caso esteja sendo utilizada uma faixa de frequência para se avaliar a exposição a radiação eletromagnética, os valores limites devem ser escolhidos como os valores mais rigorosos dentro dessa faixa (ITU, 2014).

2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

A propagação da onda eletromagnética em ambientes que possuam algum tipo de urbanização faz com que ela sofra interferências que causam variações em seu sinal de diversas formas (SOUZA FILHO, 2015). Entre os principais mecanismos associados à

propagação da onda eletromagnética destacam-se a reflexão, a difração e a dispersão que variam de acordo com a complexidade e características do ambiente em que está ocorrendo a propagação (CASTILHO, 2006). Por esse motivo, vários modelos de propagação foram desenvolvidos com o objetivo de prever qual o valor médio com que um sinal transmitido chega ao seu destino após sofrer a influência de fatores que alterem suas características de propagação.

2.2.1 Mecanismos de Propagação

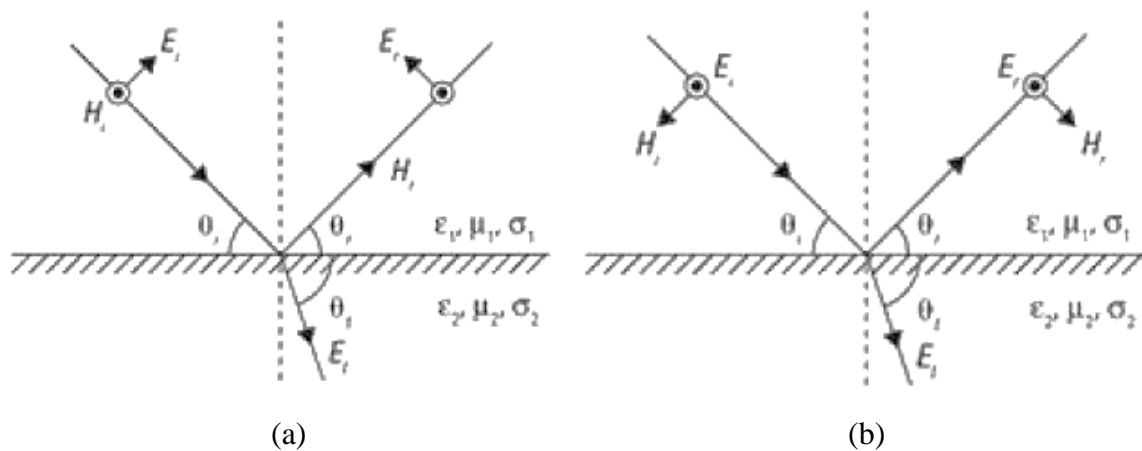
Segundo Rappaport (2009), reflexão, difração e dispersão são os principais mecanismos que influenciam na propagação de ondas eletromagnéticas em um sistema de comunicação móvel. Desse modo, a quantidade de potência recebida em um receptor pode ser descrita baseando-se nas características de reflexão, difração e dispersão de um meio. Esses mecanismos de propagação são descritos a seguir:

2.2.1.1 Reflexão

Quando uma onda eletromagnética se propagando no espaço colide com um objeto de dimensões muito maiores do que seu comprimento de onda, ocorre o efeito da reflexão. Ao colidir com um meio que possui propriedades dielétricas distintas, uma parte da onda é refletida enquanto outra parte é absorvida. As intensidades dos campos elétricos gerados por essas parcelas refletidas e transmitidas podem ser associadas à onda original através da utilização do coeficiente de reflexão de Fresnel Γ . Esse coeficiente depende, entre outras coisas, da frequência e do ângulo de incidência da onda propagada (RAPPAPORT, 2009).

A Figura 7 ilustra a incidência de uma onda eletromagnética a um plano onde parte da onda é refletida e outra parte é transmitida.

Figura 7 - Incidência de uma onda eletromagnética: (a) Campo E no plano de incidência; (b) Campo E normal ao plano de incidência.



Fonte: RAPPAPORT, 2009.

O coeficiente de reflexão para os casos mostrados nas Figuras 7.a e 7.b podem ser calculados através das Equações 20 e 21, respectivamente.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_i|} = \frac{\eta_2 \text{sen}(\theta_t) - \eta_1 \text{sen}(\theta_i)}{\eta_2 \text{sen}(\theta_t) + \eta_1 \text{sen}(\theta_i)} \quad (20)$$

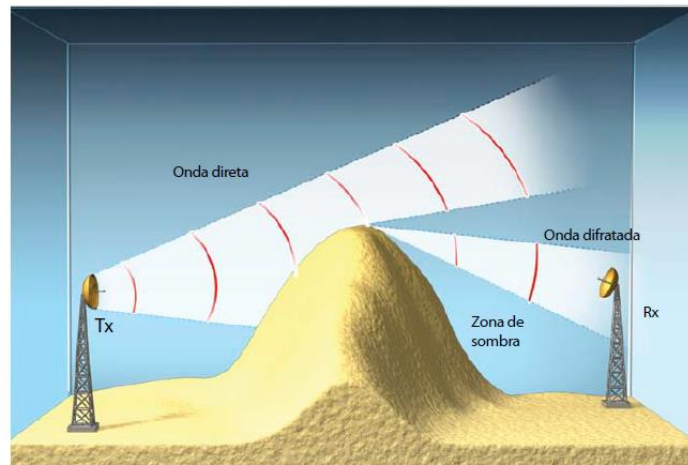
$$\Gamma_{\perp} = \frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_i|} = \frac{\eta_2 \text{sen}(\theta_i) - \eta_1 \text{sen}(\theta_t)}{\eta_2 \text{sen}(\theta_i) + \eta_1 \text{sen}(\theta_t)} \quad (21)$$

onde $|\vec{E}_r|$ e $|\vec{E}_i|$ são as intensidades de campo elétrico para as ondas refletidas e incidentes, respectivamente, θ_t e θ_i são os ângulos de incidência das ondas transmitidas e incidentes, respectivamente e η_i é a impedância intrínseca do i -ésimo meio.

2.2.1.2 Difração

Segundo Rappaport (2009), esse fenômeno ocorre quando uma superfície com grande quantidade de arestas obstrui o caminho entre o elemento transmissor e o receptor, fazendo com que surjam ondas secundárias provenientes dessa superfície de modo que apareça uma curvatura que permita a propagação da onda através da realização do contorno desses obstáculos. O desvio provocado na onda propagada ao encontrar um obstáculo pode ser visualizado na Figura 8.

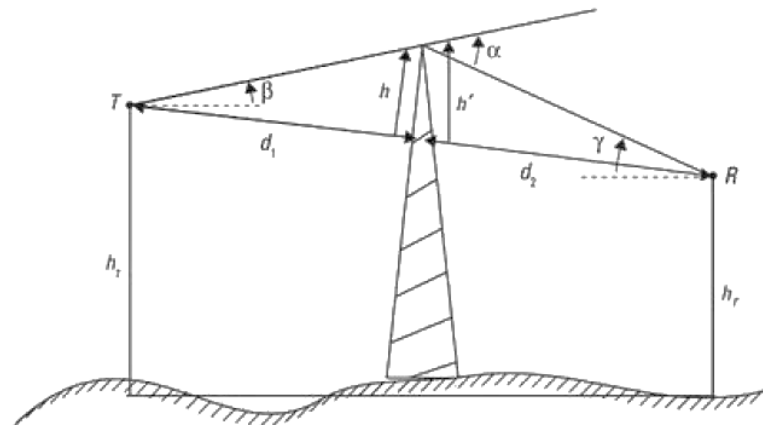
Figura 8 - Difração de ondas de rádio com obstáculo.



Fonte: CARVALHO E BADINHAN, 2011.

O processo de difração está ilustrado na Figura 9, onde é possível notar que a onda propagando do transmissor (T) ao receptor (R) por cima do obstáculo percorre um caminho maior do que a propagada em caminho direto da linha de visão.

Figura 9 - Representação do efeito de difração causado por uma obstrução entre o elemento transmissor e o receptor.



Fonte: RAPPAPORT, 2009.

Nesses casos, a diferença de fase correspondente é dada pela Equação 22.

$$\phi = \frac{\pi}{2} v_d^2 \quad (22)$$

onde v_d corresponde ao parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff dado pela Equação 23.

$$v_d = (\beta_a + \gamma_a) \sqrt{\frac{2d_1d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (23)$$

onde β_a representa o ângulo entre o topo do transmissor e o topo do elemento de obstrução, γ_a o ângulo entre o topo do receptor e o topo do elemento de obstrução, λ é o comprimento de onda da onda propagada e d_1 e d_2 representam a distância entre o obstáculo e o transmissor e o receptor, respectivamente.

2.2.1.3 Dispersão

De acordo com Rappaport (2009), esse efeito ocorre devido à presença de objetos com dimensões pequenas, quando comparados com o comprimento de onda da onda em propagação, no meio pelo qual a onda se desloca. Isso faz com que, de um modo geral, o sinal detectado em um ambiente de rádio comunicação seja mais forte do que o previsto, já que essa dispersão faz com que o sinal se espalhe em todas as direções sendo absorvidos por outros receptores que obtêm energia adicional. Nos ambientes urbanos entre os elementos responsáveis por essa dispersão, destacam-se postes e árvores.

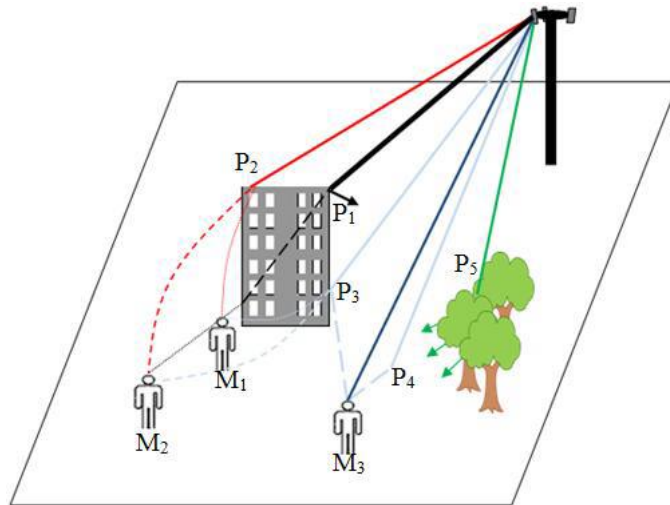
2.2.2 Ambientes de Propagação

De acordo com o nível de urbanização de um local, um ambiente de propagação pode ser dividido em três regiões: rural, urbana e suburbana que se diferenciam pela quantidade de edifícios no local, existência de locais abertos, presença de vegetação, entre outras características (PEREIRA, 2007).

Cada um desses obstáculos faz com que diferentes fenômenos associados a propagação surjam nesses ambientes, como uma maior reflexão e atenuação do sinal devido a grande concentração de edifícios, isso aumenta a dificuldade na elaboração de modelos que representem de modo mais preciso as características desses locais (LOW, 1992)

Em ambientes urbanos, uma pessoa está exposta a ondas que se dividem em outras com sinais de amplitudes e fases distintas devido à presença de vários obstáculos já que, uma parte da energia emitida pela fonte de radiação é absorvida, parte é refletida e parte atravessa os obstáculos presentes, provocando uma exposição combinada de raios refletidos e raios diretos (SOUZA FILHO, 2015). A Figura 10 ilustra uma situação de exposição a ondas eletromagnéticas em ambientes urbanos.

Figura 10 - Representação da propagação de uma onda em um ambiente urbano.



Fonte: SOUZA FILHO, 2015.

2.2.3 Propagação no Espaço Livre

Esse modo de análise de propagação é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando entre o transmissor e o receptor existe um caminho limpo de linha de visão (RAPPAPORT, 2009). O nível de potência que chega até o receptor é inversamente proporcional à distância entre o transmissor e o receptor elevada a alguma potência, ou seja, é uma função de lei de potência. A potência recebida pode ser calculada através da Equação 24.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (24)$$

onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_r é o ganho da antena receptora, G_t é o ganho da antena transmissora, d é a distância entre as duas antenas, L é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação, sempre ≥ 1 e λ é o comprimento de onda da antena. O ganho G de uma antena pode ser calculado através da Equação 25.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (25)$$

onde A_e representa a abertura efetiva da antena.

A atenuação do sinal, PL , medida em dB é dada pela diferença entre a potência transmitida e a recebida, podendo ser calculada através da Equação 26.

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (26)$$

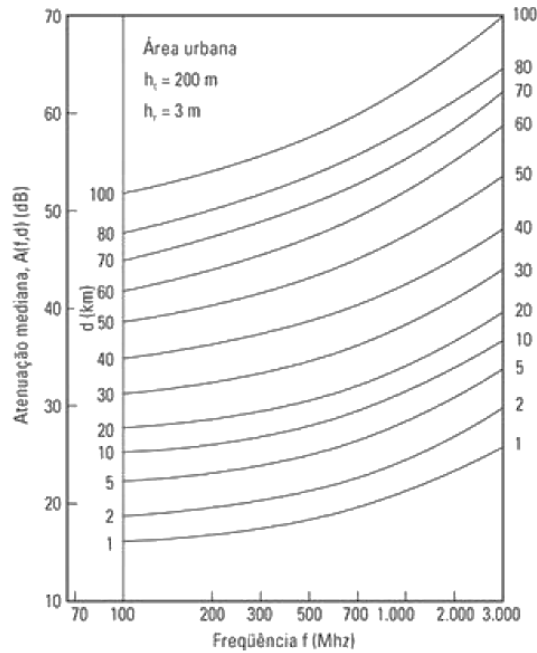
2.2.4 Modelos de Propagação

De um modo geral, os modelos de propagação podem ser divididos em duas grandes categorias, os modelos empíricos que se baseiam em medidas relacionando a atenuação do sinal com a distância entre a fonte e o receptor e modelos teóricos que utilizam informações obtidas através da análise de dados topográficos (PEREIRA, 2007). Segundo Pereira (2007), os modelos empíricos se destacam por levarem em consideração todos os fatores que estão afetando o desempenho do sinal no ambiente em análise, porém deve ser validado para vários ambientes através de medições, enquanto que os modelos teóricos possuem grande flexibilidade para se adequar a diferentes locais através da mudança de seus parâmetros. Serão apresentados a seguir, alguns dos principais modelos empíricos de propagação de ondas em ambientes urbanos.

2.2.4.1 Modelo de Okumura

Modelo empírico proposto por Yoshihisa Okumura em 1968 através da realização de medições de propagação na cidade de Tóquio entre os anos de 1962 e 1963. Suas medições levaram em consideração o nível de urbanização e a variação do terreno da região sob análise. Essas medições tinham como objetivo a construção de curvas que representassem a predição do sinal através de formatos gráficos (OKUMURA et al., 1968). A Figura 11 mostra as curvas de Okumura relacionando a frequência do sinal em MHz e a atenuação média em dB.

Figura 11 - Curvas de Okumura que relacionam a frequência do sinal com a atenuação média.



Fonte: RAPPAPORT, 2009.

As curvas mostradas na Figura 11 são referentes ao modelo de Okumura e foram obtidas através de medição utilizando antenas omnidirecionais verticais. Para a aplicação desse método, a região medida deve ser uma área urbana, ou seja, com uma grande quantidade de edifícios, com terreno quase plano e com alturas de antenas padronizadas de 200 m para a antena de estação de rádio base e 3 m para a antena do terminal móvel, caso contrário vários fatores de correção devem ser aplicados para a elaboração dessas curvas (PEREIRA, 2014). Esse modelo pode ser utilizado para uma faixa de frequência de 150 a 2000 MHz e distância da fonte de radiação para o ponto onde está sendo feita a medição variando de 1 a 100 km.

A atenuação do sinal através do modelo de Okumura pode ser calculada através da Equação 27:

$$L_p = L_{fs}(f, d) + A_\mu(f, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{AREA} \quad (27)$$

onde L_p é o valor médio da perda devido a propagação em dB , L_{fs} é a perda no espaço livre em dB em função da frequência e da distância, A_μ é a atenuação adicional em dB para zonas urbanas com relação ao espaço livre, f é a frequência do sinal em MHz , d é a distância do ponto de medição e a fonte de radiação em km , $G(h_t)$ é o fator de ganho em dB devido à altura da estação transmissora h_t , $G(h_r)$ é o fator de ganho em dB devido à altura da estação

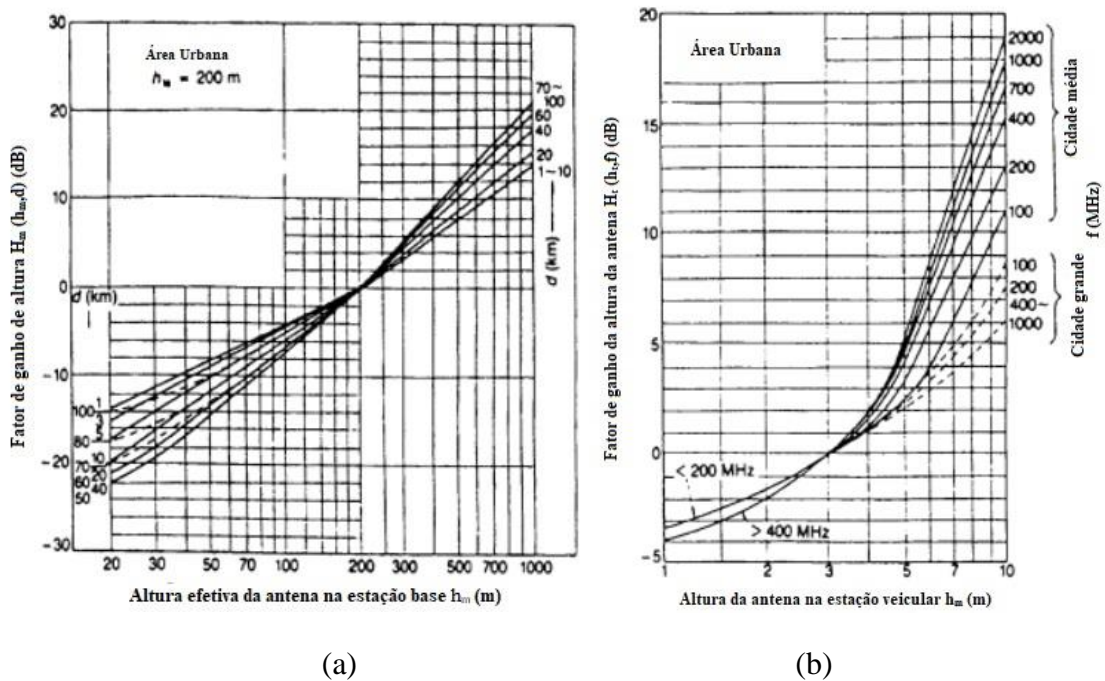
receptora h_r e G_{AREA} é o ganho em dB devido ao ambiente em que o sistema está operando, podendo ser um ambiente urbano, suburbano ou rural.

Os valores de atenuação adicional e o do ganho devido ao ambiente de operação podem ser obtidos através das curvas de Okumura que são mostradas nas Figuras 12 e 13, enquanto que os fatores de ganho devido à altura da estação transmissora e receptora podem ser obtidos através de fórmulas empíricas que estão representadas nas Equações 28 e 29.

$$G(h_t) = 20 \log\left(\frac{h_t}{200}\right), 30 \text{ m} < h_t < 1000 \text{ m} \quad (28)$$

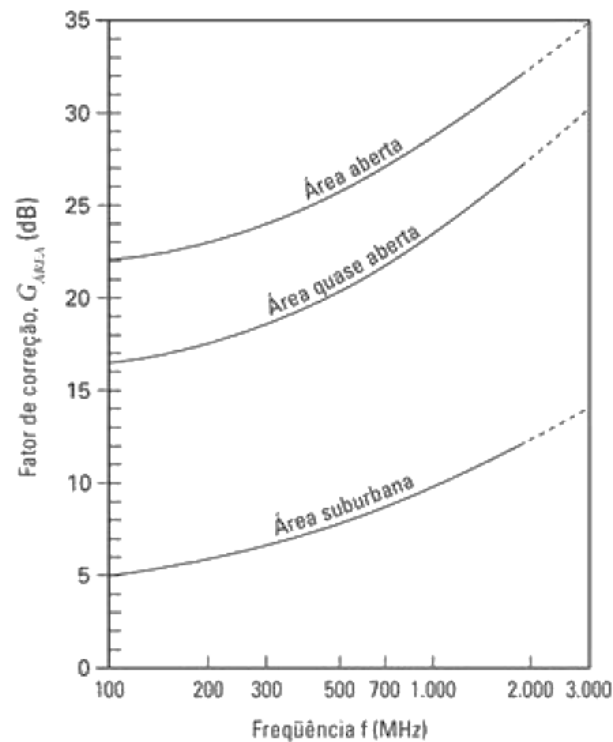
$$G(h_r) = \begin{cases} 10 \log\left(\frac{h_r}{3}\right), & h_r \leq 3 \text{ m} \\ 20 \log\left(\frac{h_r}{3}\right), & 3 \text{ m} < h_r < 10 \text{ m} \end{cases} \quad (29)$$

Figura 12 - Curvas de correção do ganho de altura através do método de Okumura em função da: (a) Altura efetiva da estação base; (b) Altura da antena na estação veicular.



Fonte: Adaptado de PARSONS, 2000.

Figura 13 - Curvas de correção do ganho de área através do método de Okumura



Fonte: RAPPAPORT, 2009.

Segundo Pereira (2014), um dos principais problemas associados a esse modelo de propagação é o fato de que os fatores de correção aplicados à cidade de Tóquio nem sempre se mostram válidos para outras regiões com diferentes tipos de construções e obstáculos fazendo com que sua aplicação seja contestada.

2.2.4.2 Modelo de Okumura-Hata

Em 1980, Masaharu Hata baseou-se nos estudos de Okumura para criar um modelo que conseguisse reunir as informações dadas através das curvas de Okumura em forma de equações. Esse conjunto de expressões empíricas estabelece de forma mais prática um método para se calcular a perda de propagação em áreas urbanas (HATA, 1980). Esse método é válido para uma faixa de frequência de 150 a 1500 MHz e uma distância de 1 a 20 km entre a estação transmissora e a receptora.

A perda de propagação em ambientes urbanos através do modelo de Okumura-Hata pode ser calculada através da Equação 30.

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_t) + [44.90 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) - J(h_r, f) - \sum K \quad (30)$$

onde J é o fator de correção, em dB , devido a altura do terminal móvel e K representa os fatores de correção caso o ambiente em que se esteja sendo feita a análise se diferencie de uma área urbana com terreno quase plano.

O fator J varia de acordo com o tipo do ambiente podendo ser calculado através da Equação 31 caso seja a região se caracterize como uma pequena ou média cidade e através da Equação 32 se a região for classificada como uma grande cidade (HATA, 1980).

$$J(h_r, f) = [1.10 \log(f) - 0.70]h_r - [1.56 \log(f) - 0.80] \quad (31)$$

$$J(h_r) = \begin{cases} 8.29 \log^2(1.54h_r) - 1.10, & 150 \text{ MHz} \leq f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2 \log^2(11.75h_r) - 4.97, & 200 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz} \end{cases} \quad (32)$$

2.2.4.3 Modelo COST 231 - Hata

Como o modelo Okumura-Hata só é válido para frequências de até 1500 MHz estudos foram realizados com o objetivo de se desenvolver equações que consigam calcular a perda de propagação de uma onda em uma faixa de frequência superior a essa. Desse modo, pesquisadores da Cooperação Europeia de Investigação em Ciência e Tecnologia (*COST - European Cooperation in Science and Technology*) reescreveram e adaptaram de forma empírica as equações obtidas por Hata de modo que cobrissem a faixa de frequências de 1500 a 2000 MHz e distância de 1 a 20 km entre a fonte e o receptor (COST, 1991). A perda de propagação através desse modelo pode ser calculada pela Equação 33.

$$L_p = 46.30 + 33.90 \log(f) - 13.82 \log(h_t) + [44.90 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) - J(h_r, f) + C_m - \sum K \quad (33)$$

onde $C_m = 3 \text{ dB}$ para grandes centros urbanos e $C_m = 0 \text{ dB}$ para demais localidades.

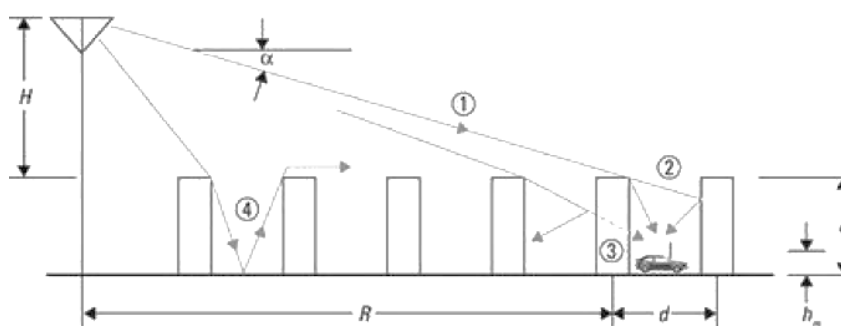
2.2.4.4 Modelo de Walfisch e Bertoni

Esse modelo utiliza a difração para levar em consideração o impacto causado pela altura dos edifícios e pelos telhados no sinal transmitido e, assim determinar a sua intensidade média no nível da rua (WALFISCH e BERTONI, 1988). Esse modelo considera que a perda de propagação no caminho L_p é dada pela Equação 34.

$$L_P = L_{fs} + L_{rts} + L_{ms} \quad (34)$$

onde L_P é o valor da perda no caminho em dB , L_{fs} representa a perda no espaço livre, L_{rts} representa a perda por dispersão e difração do telhado à rua e, L_{ms} representa a perda por difração devido às fileiras de prédios que sombreia o receptor no nível da rua. A geometria utilizada nesse modelo pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 - Geometria de propagação utilizada no modelo de Walfisch e Bertoni.



Fonte: RAPPAPORT, 2009.

2.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Devido ao crescente número de estações rádio base nos centros urbanos, vários estudos estão sendo realizados com o objetivo de verificar os possíveis efeitos que essa radiação pode provocar quando exposta a seres humanos. Os principais efeitos estudados são aqueles associados à radiação eletromagnética não ionizante. Valente Júnior (2006) afirma que os principais fatores que caracterizam a suscetibilidade de um ser humano a radiação eletromagnética são: tipo de radiação exposta, tempo de exposição, densidade de potência, taxa de absorção específica, correntes induzidas e correntes de contato.

Os efeitos da radiação eletromagnética no corpo humano dependem principalmente da quantidade de energia que é absorvida devido a essa exposição, sendo assim a Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (1998) estabelece quatro faixas de frequências distintas para o estudo sobre esses possíveis efeitos. A Tabela 4 destaca essas quatro faixas.

Tabela 4 - Comportamento da absorção de energia eletromagnética de acordo com a frequência do sinal.

Faixa de frequência	Característica de absorção
100 kHz a 20 MHz	A absorção ocorre de maneira mais significativa nas pernas e no pescoço. Nível de absorção diretamente proporcional à frequência.
20 MHz a 300 MHz	Alto valor de absorção por todo o corpo
300 MHz a 10 GHz	Absorção não uniforme pelo corpo
Acima de 10 GHz	Maior parte da energia está na camada superficial do corpo

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

Como visto anteriormente, os principais efeitos associados à radiação eletromagnética não ionizante, ou seja, aquela que não possui capacidade de ionizar os átomos e as moléculas nos seres vivos se dividem em dois tipos: efeitos térmicos e efeitos não térmicos. Dentre esses dois efeitos, os efeitos térmicos são mais fáceis de serem detectados e mensurados estando associados ao aumento da temperatura e a indução de corrente no corpo (WOLLINGER, 2003). Da onda que incide no corpo humano, parte é refletida enquanto outra é transmitida e absorvida pelo organismo gerando esses dois efeitos. A Tabela 5 mostra alguns dos principais efeitos biológicos associados com a exposição à radiação eletromagnética.

Tabela 5 - Principais efeitos associados à exposição a radiação eletromagnética

Faixa de frequência	Local de maior efeito	Principal efeito associado
$f > 10 \text{ GHz}$	Pele	Aquecimento da pele devido à absorção
$f = 10 \text{ GHz}$	Pele	Aquecimento da pele com sensação de calor
$3 \text{ GHz} < f < 10 \text{ GHz}$	Camadas superficiais da pele e olhos	Sensibilidade extrema nos olhos
$1 \text{ GHz} < f < 3 \text{ GHz}$	Olhos	Formação de catarata e danos aos testículos
$150 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz}$	Órgãos internos	Prejuízo aos órgãos internos devido ao aquecimento
$f < 150 \text{ MHz}$	–	Pouco efeito

Fonte: Adaptado de McREE, 1979.

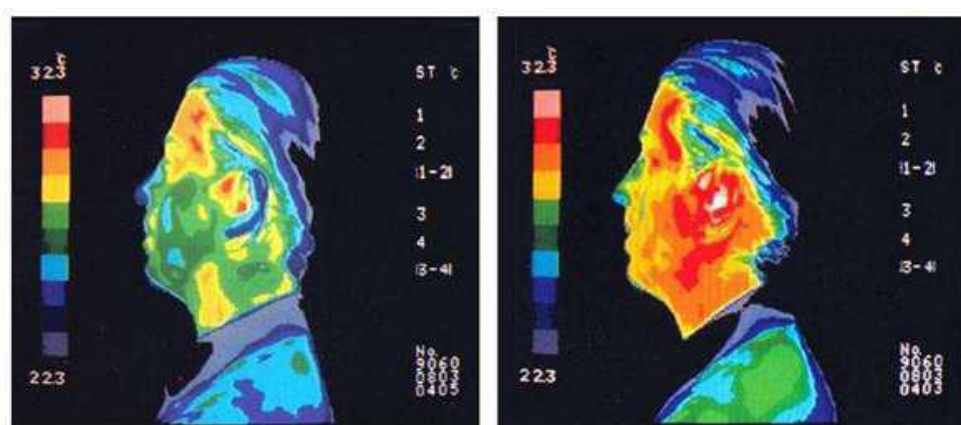
2.3.1 Efeitos Térmicos

São causados devido ao aquecimento dos tecidos através da absorção de radiação eletromagnética em um meio dissipativo, são os efeitos biológicos associados aos campos eletromagnéticos conhecidos a mais tempo, o que faz com que grande parte das normas que limitam essa exposição sejam baseadas nesses efeitos, já que a elevação de mais de 1 grau Celsius pode provocar riscos (SALLES, 1999).

Os locais mais propícios a riscos são as áreas com baixa presença de vasos sanguíneos, já que eles se dilatam reduzindo o aquecimento através do fluxo sanguíneo (SALLES, 1999). Os órgãos mais susceptíveis a esse tipo de efeito são os olhos, pois eles não possuem vasos sanguíneos que facilitem a dissipação desse aquecimento e estão presentes numa parte superficial do corpo, além de estar em contato com um ambiente aquoso o que favorece a absorção (CRUZ, 2005).

O aumento da temperatura em uma parte do corpo está ligado a SAR, principal responsável pelos efeitos térmicos que provocam o aquecimento localizado devido ao uso equipamentos como os telefones celulares (SALLES et al., 2003). A Figura 15 ilustra os efeitos térmicos causados pela utilização de um celular após uma conversa de 15 minutos.

Figura 15 - Imagem termográfica indicando os efeitos térmicos causados na cabeça humana: (a) Antes da utilização do celular; (b) Após a utilização do celular.



(a)

(b)

Fonte: LIN, 2011.

Nas Figuras 16.a e 16.b, as regiões de cor vermelha e amarela representam os locais onde a temperatura está mais alta. Desse modo, é possível observar que, após a utilização do telefone celular, toda a região da face da cabeça humana teve uma elevação em sua temperatura. Segundo a Organização Mundial de Saúde, outros possíveis efeitos térmicos

causados pela absorção desse tipo de energia são queimaduras internas, queimaduras externas, exaustão e, dependendo da intensidade e do tempo de exposição, catarata (WHO, 2002).

2.3.2 Efeitos não Térmicos

Efeitos que não estão interligados com o aquecimento do corpo humano, segundo Bronzino (1995), são efeitos bioquímicos ou eletrofísicos causados pela interação do corpo humano com os campos eletromagnéticos induzidos. Dentre os sistemas que podem ser afetados por esses efeitos destacam-se o sistema imunológico, o nervoso e o sistema cardiovascular. Segundo Bernhart (1992), entre alguns efeitos não térmicos demonstrados, destacam-se a alteração no fluxo de íons através das membranas das células e efeitos na resposta das células a alguns tipos de moléculas sintetizantes como é o caso dos hormônios, fatores de crescimento e neurotransmissores.

Uma grande incerteza a respeito desses efeitos é o fato de não ser possível confirmar se essas reações podem ocorrer em pessoas expostas a níveis de radiação abaixo dos limites estabelecidos (BERNHART, 1992). Além disso, também não há um consenso a respeito sobre as reais consequências desses efeitos nos organismos vivos, já que não existem evidências científicas que comprovem qualquer relação desses efeitos com a radiação, devida principalmente a dificuldade na execução de técnicas experimentais (RODRÍGUEZ, 2001).

2.4 NORMAS REGULAMENTADORAS PARA EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

A crescente preocupação com os possíveis efeitos negativos que a exposição a campos eletromagnéticos pode causar nas pessoas faz com que vários órgãos reguladores, nacionais e internacionais, estabeleçam limites específicos baseados na faixa de frequência do sinal e no tipo de público exposto. Essas regulamentações podem ser divididas em dois grupos principais, as regulamentações recomendadas por órgãos normativos que possuem um caráter científico e não são de caráter obrigatório e as regulamentações existentes na forma de leis ou decretos emitidas por órgãos governamentais que possuem um caráter obrigatório (LOPES, 2009).

As normas regulamentadoras dividem os ambientes de exposição em dois tipos: ambientes de exposição controlada, composto por um grupo de pessoas conhecido como população ocupacional que engloba um grupo de pessoas que estão cientes das condições de

exposição a qual estão submetidos e ambientes de exposição não controlada, composto pelo público geral formado por pessoas que não estão cientes do nível de exposição que enfrentam, desse modo os limites de exposição adotados para o público geral são muito mais rigorosos do que os adotados para o público ocupacional (VALENTE JÚNIOR, 2006).

Essas normas são baseadas em estudos científicos realizados por vários países abordando as possíveis consequências dessa exposição para os seres vivos (TENÓRIO, 2015). Dentre os principais órgãos regulamentadores destacam-se a Comissão Internacional para Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP), o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e a União Internacional de Telecomunicações (ITU), todos órgãos reconhecidos mundialmente que possuem recomendações aprovadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS). No Brasil, a principal norma que regulamenta esse tipo de exposição é elaborada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Mesmo com a existência de normas que estabeleçam os valores limites para a exposição a campos eletromagnéticos, vários países aplicam o Princípio da Precaução, no qual adotam valores menores do que os estabelecidos pelas normas devido à incerteza científica com relação à potencialidade dos riscos existentes (WHO, 2006).

Esse princípio é utilizado especificamente em casos onde há uma evidência científica, que não necessariamente se caracteriza como uma prova definitiva, de que a falta de ação causará danos mais graves (LOPES et al. 2007). O princípio da precaução se diferencia do princípio da prevenção, pois esse último se caracteriza pela comprovação científica dos efeitos danosos gerados devido a substâncias ou atividades (SANTAREM, 2012).

2.4.1 ICNIRP

Comissão independente fundada em 1992 que tem como objetivo desenvolver pesquisas a respeito sobre os possíveis efeitos negativos da exposição humana a radiação eletromagnética não ionizante, além de estabelecer os níveis adequados para essa exposição. Seus resultados são divulgados na forma de diretrizes que visam orientar a população e os governos locais sobre esses assuntos (ICNIRP, 2017).

Um dos principais documentos elaborados pela ICNIRP é a *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)* publicado em 1998, onde são apresentadas duas classes de recomendação que são as restrições básicas e os níveis de referência que servem como parâmetros para determinar se uma pessoa, exposta a certo nível de radiação, está sob risco (SILVA, 2012).

2.4.1.1 Restrições Básicas

São restrições fundamentadas através de estudos científicos que se baseiam nos efeitos diretos à saúde da pessoa exposta. Dependendo da faixa de frequência do sinal, as restrições básicas podem ser definidas em função da densidade de corrente, da densidade de potência ou da taxa de absorção específica (SAR). A Tabela 6 mostra a relação entre a faixa de frequência do sinal e a grandeza física associada.

Tabela 6 - Relação entre a faixa de frequência e a grandeza física associada para estabelecer as restrições básicas.

Faixa de frequência	Grandeza associada a restrição básica	Tipo de prevenção
$1 \text{ Hz} < f < 10 \text{ MHz}$	Densidade de corrente	Prevenção contra efeitos no sistema nervoso
$100 \text{ kHz} < f < 10 \text{ GHz}$	SAR	Prevenção do aquecimento médio corporal e aquecimento excessivo de partes localizadas
$10 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$	Densidade de potência	Prevenção de calor excessivo na região mais superficial do corpo

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

Sendo assim, definiu-se um limiar fisiológico de risco no qual os efeitos adversos à saúde humana começam a ser detectados comprovando a existência de um risco (VALENTE JÚNIOR, 2006). Segundo Miro e De Seze (1996), verificou-se que a exposição a campos eletromagnéticos que provoquem uma SAR maior do que a 4 W/kg causava um aumento de 1 a 2 °C na temperatura média do corpo, fazendo com que surgissem entre outros problemas febre, estresse e, em alguns casos específicos, queimaduras e catarata. Desse modo, definiu-se que o limiar fisiológico de risco para o corpo inteiro é de 4 W/kg.

Baseado nesse valor do limiar fisiológico de risco, a ICNIRP (1998) adotou fatores de segurança no valor de 10 e 50 para o público ocupacional e o público geral, respectivamente, com o objetivo de restringir mais esse limite de exposição. A Tabela 7 mostra os limites médios de SAR para cada uma das categorias de exposição.

Tabela 7 - Limite de exposição média de SAR.

Categoria de Exposição	SAR médio no corpo inteiro (W/kg)	SAR localizada na cabeça e tronco (W/kg/1g)
População ocupacional	0,4	10
População geral	0,08	2

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

2.4.1.2 Níveis de Referência

Como a medição das grandezas físicas associadas às restrições básicas é muito difícil, estabeleceram-se métodos para se determinar de forma indireta o nível de SAR no corpo humano através de medições realizadas no ambiente ou técnicas computacionais, esses níveis de referência são determinados levando-se em consideração a existência de um acoplamento máximo do campo eletromagnético com a pessoa exposta (ICNIRP, 1998). Sendo assim, para se verificar os níveis de referências, as grandezas físicas utilizadas são a intensidade de campo elétrico, a intensidade de campo magnético e a densidade de potência.

As Tabelas 8 e 9 mostram os níveis de referência para exposição do público ocupacional e da população em geral, respectivamente, onde f é a frequência do sinal em MHz.

Tabela 8 - Limites para exposição ocupacional a campos eletromagnéticos em radiofrequência na faixa de 9 kHz a 300 GHz.

Faixa de frequência	Campo elétrico (V/m)	Campo magnético (A/m)	Densidade de potência (W/m²)	Tempo de Exposição (min)
9 kHz a 65 kHz	610	24,4	–	6
65 kHz a 1 MHz	610	$1,6/f$	–	6
1 MHz a 10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	–	6
10 MHz a 400 MHz	61	0,16	10	6
400 MHz a 2 GHz	$3\sqrt{f}$	$0,008\sqrt{f}$	$f/40$	6
2 GHz a 300 GHz	137	0,36	50	$\begin{cases} 6, f < 10 \text{ GHz} \\ \frac{68}{f^{1.05}}, f > 10 \text{ GHz} \end{cases}$

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

Tabela 9 - Limites para exposição do público em geral a campos eletromagnéticos em radiofrequência na faixa de 9 kHz a 300 GHz

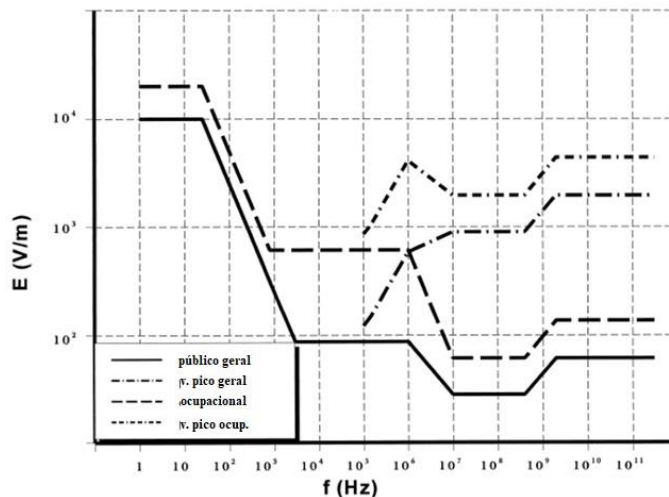
Faixa de frequência	Campo elétrico (V/m)	Campo magnético (A/m)	Densidade de potência (W/m ²)	Tempo de Exposição (min)
9 kHz a 150 kHz	87	5	—	6
150 kHz a 1 MHz	87	$0,73/f$	—	6
1 MHz a 10 MHz	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$	—	6
10 MHz a 400 MHz	28	0,073	2	6
400 MHz a 2 GHz	$1,375\sqrt{f}$	$0,0037\sqrt{f}$	$f/200$	6
2 GHz a 300 GHz	61	0,16	10	$\begin{cases} 6, f < 10 \text{ GHz} \\ \frac{68}{f^{1,05}}, f > 10 \text{ GHz} \end{cases}$

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

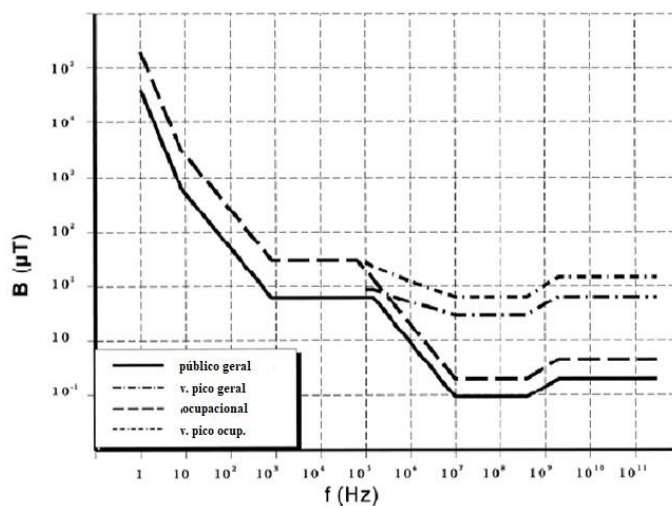
Caso os valores medidos estejam abaixo dos limites estabelecidos pelas Tabelas 8 e 9, isso significa que as restrições básicas estão sendo respeitadas, porém caso esses valores não sejam respeitados, não significa necessariamente que as restrições básicas estão sendo descumpridas sendo necessária uma análise mais aprofundada.

As Figuras 16.a e 16.b mostram de uma forma gráfica os níveis de referência para a exposição a campos elétricos e magnéticos, respectivamente.

Figura 16 - Níveis de referência para exposição a: (a) campos elétricos; (b) campos magnéticos.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de ICNIRP, 1998.

2.4.2 ANATEL

No Brasil, de acordo com a Lei Geral das Telecomunicações número 9.742 de 16 de junho de 1997, o órgão responsável por regular o nível de exposição a campos eletromagnéticos e estabelecer normas que deverão ser cumpridas pelos órgãos de telecomunicações é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) (BRASIL, 1997).

Baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela ICNIRP, em 2 de julho de 2002, a ANATEL através da Resolução número 303 estabeleceu um regulamento que limita a exposição a campos elétricos e magnéticos na faixa de radiofrequência 9 kHz a 300 GHz (ANATEL, 2002). Essa resolução, entre outras coisas, estabelece métodos para a medição desses campos, cálculo para se determinar se os limites de exposição estão sendo respeitados além de parâmetros para avaliação de sinais de múltiplas frequências (DALLA'ROSA, 2003).

2.5 TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO

Segundo Andriotti (2005), a interpolação é um método ou função matemática no qual é possível estimar valores de uma variável em locais onde os pontos de amostragem não estão disponíveis, permitindo dessa forma, representar esses dados pontuais de modo contínuo através de um mapa. Através dessas técnicas, também é possível avaliar a variabilidade espacial de uma grandeza, utilizando um conjunto de dados disponíveis em uma região (KAMINSKA E GRZYWNA, 2014).

O principal objetivo das técnicas de interpolação espacial é gerar uma superfície capaz de representar da forma mais próxima possível os valores obtidos através das medições (AZPURUA e DOS RAMOS, 2010). Segundo Burrough (1986), as técnicas de interpolação podem ser classificadas das seguintes formas: determinísticos ou probabilísticos, locais ou globais, transição gradual ou abrupta e exatos ou aproximados.

Dentre os métodos de interpolação, destacam-se os seguintes: inverso ponderado da distância (*IDP – inverse distance to a power*), krigagem (*KG – kriging*), curvatura mínima (*MC – minimum curvature*), método de Shepard modificado (*MSM – modified Shepard's method*), vizinho natural (*NN – natural neighbor*), vizinho mais próximo (*NEN – nearest neighbor*), regressão polinomial (*PR – polynomial regression*), função da base radial (*RBF – radial basis function*), triangulação com interpolação linear (*TWLI – triangular with linear interpolation*), médias móveis (*MA – moving average*) e polinômio local (*LP – local polynomial*).

Cada um desses métodos possui aplicações adequadas a determinadas características de um conjunto de dados, desse modo não há um que possa ser considerado melhor do que o outro (LENNON e TUNNER, 1995). Para se verificar qual a técnica de interpolação mais adequada para um conjunto de dados, um dos métodos utilizados é o da validação cruzada. Segundo Luo, et al. (2008), o método da validação cruzada é um procedimento no qual retira-se cada um dos valores medidos do conjunto de dados e estima-se o seu valor através de algum método de interpolação utilizando os dados remanescentes, esse processo é repetido para cada uma das n amostras do conjunto de dados.

O desempenho desses métodos é avaliado através da relação entre os valores medidos e os estimados, os principais parâmetros obtidos através do método da validação cruzada são o erro absoluto médio (*MAE – mean absolute error*) e erro quadrático médio (*RMSE – root mean square error*), além de alguns outros índices e coeficientes como o coeficiente de determinação, o coeficiente de correlação, o índice de confiança e o índice de concordância (GARDIMAN JUNIOR et al, 2012). Segundo Santana, et al. (2017), os métodos de interpolação que apresentaram desempenho mais satisfatório e menores erros para o conjunto de dados analisados nesse trabalho foram o método do inverso ponderado da distância, método da krigagem e o método da função de base radial.

Esses erros podem ser calculados através das Equações 35 e 36.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{z}(s_i) - z(s_i)] \quad (35)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{z}(s_i) - z(s_i)]^2} \quad (36)$$

onde $\hat{z}(s_i)$ é o valor estimado, $z(s_i)$ o valor medido e N o número de amostras.

2.5.1 Inverso Ponderado da Distância

Método de interpolação multivariada que estima o valor da variável ao longo de uma área atribuindo um peso maior a pontos mais próximos, diminuindo esse peso à medida que a distância aumenta, ou seja, quanto mais próximo o ponto a qual se quer estimar o valor maior será o peso atribuído ao ponto de amostra (JIMENEZ e DOMECCO, 2008). O peso atribuído a cada um dos pontos é função do coeficiente de potência p , onde quanto maior o valor desse coeficiente, maior será a influência dos pontos próximos aos valores estimados, o valor mais comum para o parâmetro p é 2 (ZONETE, 2009).

Os valores estimados por esse método de interpolação podem ser calculados através das Equações 37 e 38:

$$\hat{z}(x) = \frac{\sum_{k=0}^N w_k(x) z_k}{\sum_{k=0}^N w_k(x)} \quad (37)$$

$$w_k(x) = \frac{1}{d(x, x_k)^p} \quad (38)$$

onde $\hat{z}(x)$ é o valor estimado, z_k é um valor conhecido, $d(x, x_k)$ é a distância entre o valor conhecido e o estimado, N é o número de amostras e p o peso do parâmetro.

2.5.2 Krigagem

Conjunto de técnicas de interpolação que calcula o valor de uma grandeza baseando-se nos valores das amostras próximas a ela, para isso é necessário que as variáveis possuam uma continuidade espacial (HUISMAN, 2009). É um modelo estatístico e, assim como o método do inverso da distância ponderada, associa a variabilidade de um dado com base na distância existente entre um par de pontos através da utilização de uma combinação linear de pesos nos pontos conhecidos para estimar os valores nos locais desconhecidos (GALLARDO, 2006).

Essa associação entre a variabilidade de um dado e a distância entre os pontos pode ser obtida pelo uso de um semivariograma que, segundo Salviano (1996) tem como função definir os principais parâmetros necessários para estimar os valores em pontos não amostrados, além de avaliar o grau de dependência espacial entre as amostras em uma região.

Matematicamente, a expressão do semivariograma pode ser definida pela Equação 39.

$$\gamma(h) = \left[\left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \right] \quad (39)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$, separados pelo vetor h e $\gamma(h)$ é o semivariograma estimado.

O valor estimado através do método da krigagem é calculado através da Equação 40.

$$\hat{z}(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (40)$$

onde $z^*(x)$ é o valor estimado, $z(x_i)$ é o valor medido e λ_i são as soluções de um sistema de equações lineares associadas a cada um dos valores medidos.

2.5.3 Função de Base Radial

Segundo Fasshauer (2007), uma função é radial caso exista uma função, de um único argumento, $\varphi: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ tal que:

$$\phi(x) = \varphi(r)$$

onde $r = \|x\|$ e $\|\cdot\|$ é a norma euclidiana.

O valor de ϕ é invariável para qualquer ponto que esteja a uma distância constante até a origem. O objetivo da interpolação utilizando esse tipo de função é a reprodução de funções desconhecidas partindo de dados conhecidos (ORR, 1996).

Segundo Wong et al. (2002), o processo de interpolação de funções de múltiplos argumentos pode ser generalizado através da utilização de funções de base radial. Matematicamente, o valor estimado $\hat{z}(x)$ pode ser calculado através das Equações 41 e 42.

$$\hat{z}(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \phi(x - x_j) \quad (41)$$

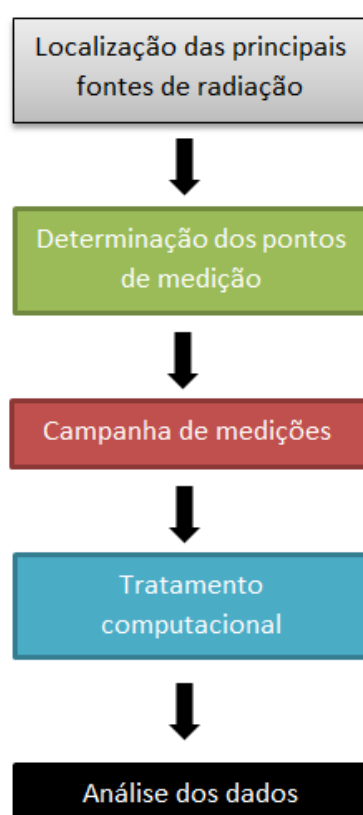
$$\begin{pmatrix} f(x_1) \\ \vdots \\ f(x_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi(x_1 - x_1) & \cdots & \phi(x_1 - x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(x_n - x_1) & \cdots & \phi(x_n - x_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} \quad (42)$$

onde $\phi(x - x_j)$ é uma função de base radial positiva e α_j são coeficientes desconhecidos que são determinados através da utilização da Equação 42.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico serão descritos os métodos empregados e os materiais utilizados para a realização deste trabalho que envolve a identificação das principais fontes de poluição eletromagnética existentes na região urbana da cidade de Mossoró até a realização das medições de campo. A Figura 17 ilustra sucintamente a metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho.

Figura 17 - Fluxograma do processo metodológico utilizado.



Fonte: Autoria própria, 2017.

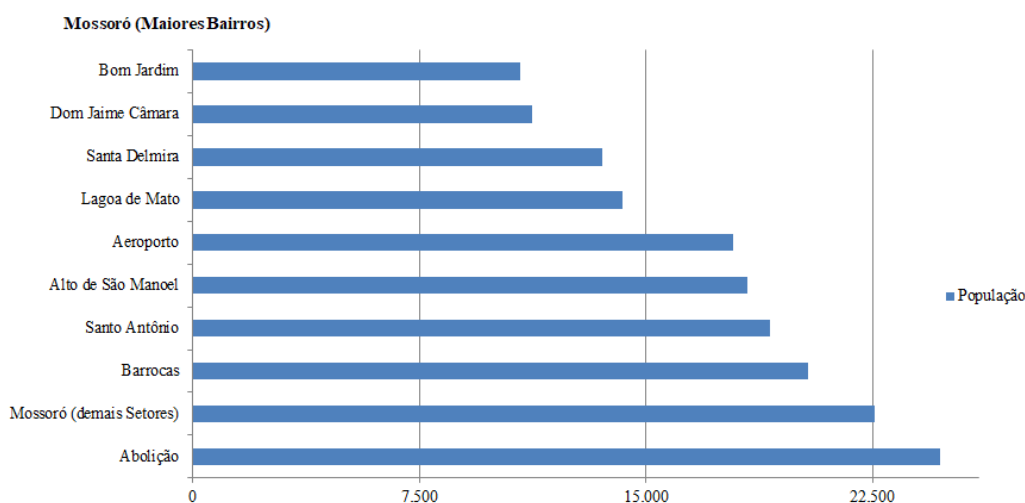
Inicialmente, utilizando dados da ANATEL que indicam a existência de ERBs em uma região, foi determinada a localização das principais fontes de radiação não ionizantes presentes na região de análise, estações de radiodifusão e estações de rádio base. Após essa etapa, a zona de interesse foi dividida em quatro regiões de acordo com a quantidade de torres espalhadas por esses locais, onde foram escolhidos 50 pontos por cada região contemplando um total de 200 pontos espalhados pelo município. Após a realização das medições nos 200 pontos escolhidos, fez-se um tratamento computacional nos dados obtidos de modo a

determinar qual método de interpolação, dentre os métodos analisados, apresentou resultados mais satisfatórios para a criação de uma superfície que represente a distribuição espacial desses campos em função de suas coordenadas.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área definida para esse estudo foi a região urbana de Mossoró, município situado na região Oeste do Rio Grande do Norte com uma população de 259.815 habitantes (IBGE, 2010). O município de Mossoró está subdividido em 27 bairros, sendo o bairro do Abolição com uma população de 24.741, o que representa 9,5% da população total da cidade, o bairro mais populoso seguido pelos bairros de Barrocas, Santo Antônio, Alto de São Manoel e Aeroporto. A Figura 18 mostra a distribuição populacional nos maiores bairros de Mossoró.

Figura 18 - Distribuição populacional nos maiores bairros de Mossoró.



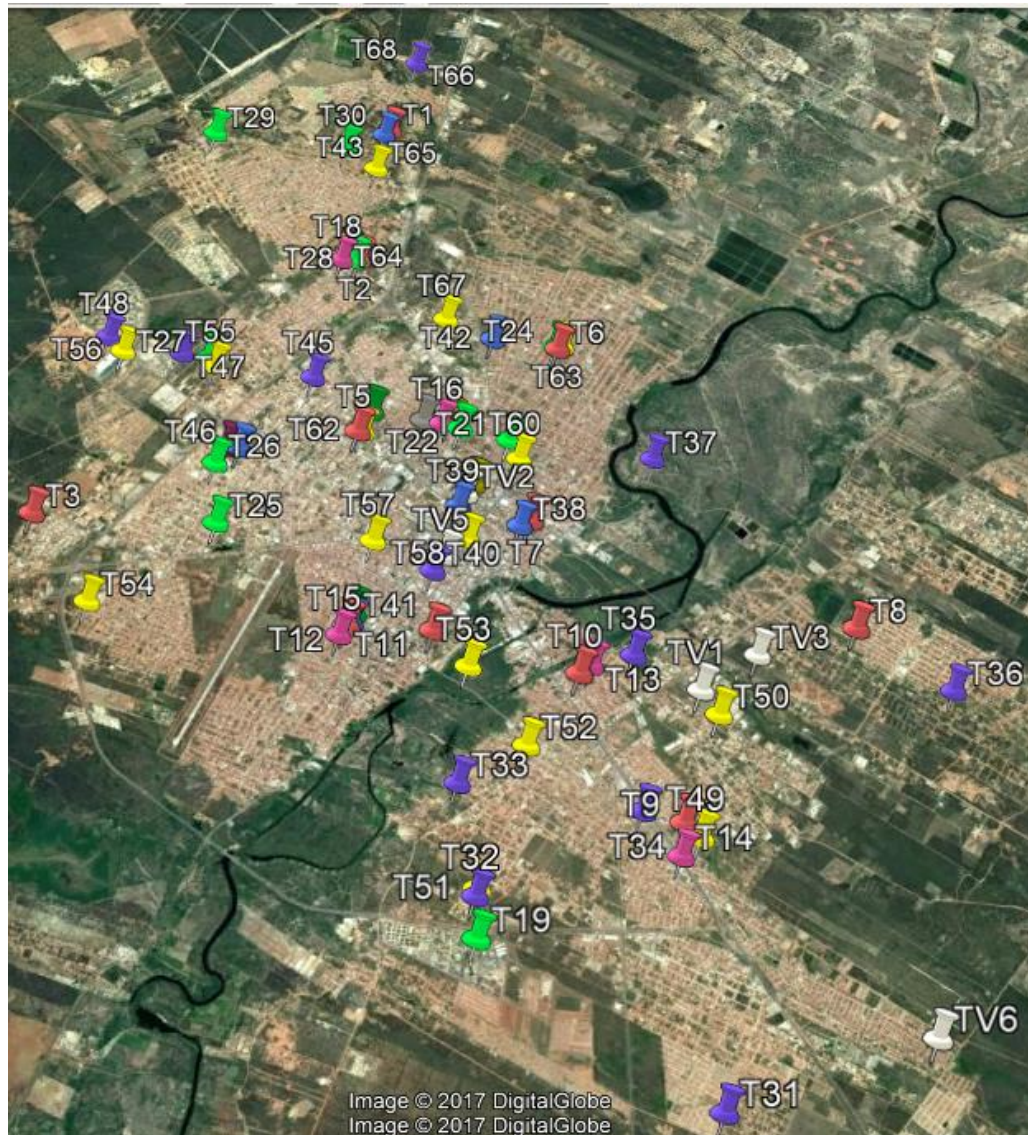
Fonte: Adaptado de IBGE, 2010.

Para a determinação dos pontos onde foram realizadas as medições, fez-se necessário primeiramente identificar a localização das principais fontes de emissão de radiação eletromagnética não ionizante na cidade, as estações de rádio base e de radiodifusão. Segundo dados da ANATEL, existem, na zona urbana de Mossoró, 95 estações de rádio base e 11 estações de TV (incluindo repetidoras) espalhadas por 20 bairros.

Com esses dados foi possível determinar a distribuição espacial dessas estações em base cartográfica através da utilização de imagens obtidas pelo *Google Earth*, sendo necessário ressaltar que o número de torres é menor do que a quantidade de estações, pois em

muitos casos a estrutura de diferentes tecnologias é compartilhada entre várias operadoras. A Figura 19 ilustra essa distribuição.

Figura 19 - Distribuição espacial por bairros das torres de estação de rádio base e radiodifusão (cada cor uma operadora).



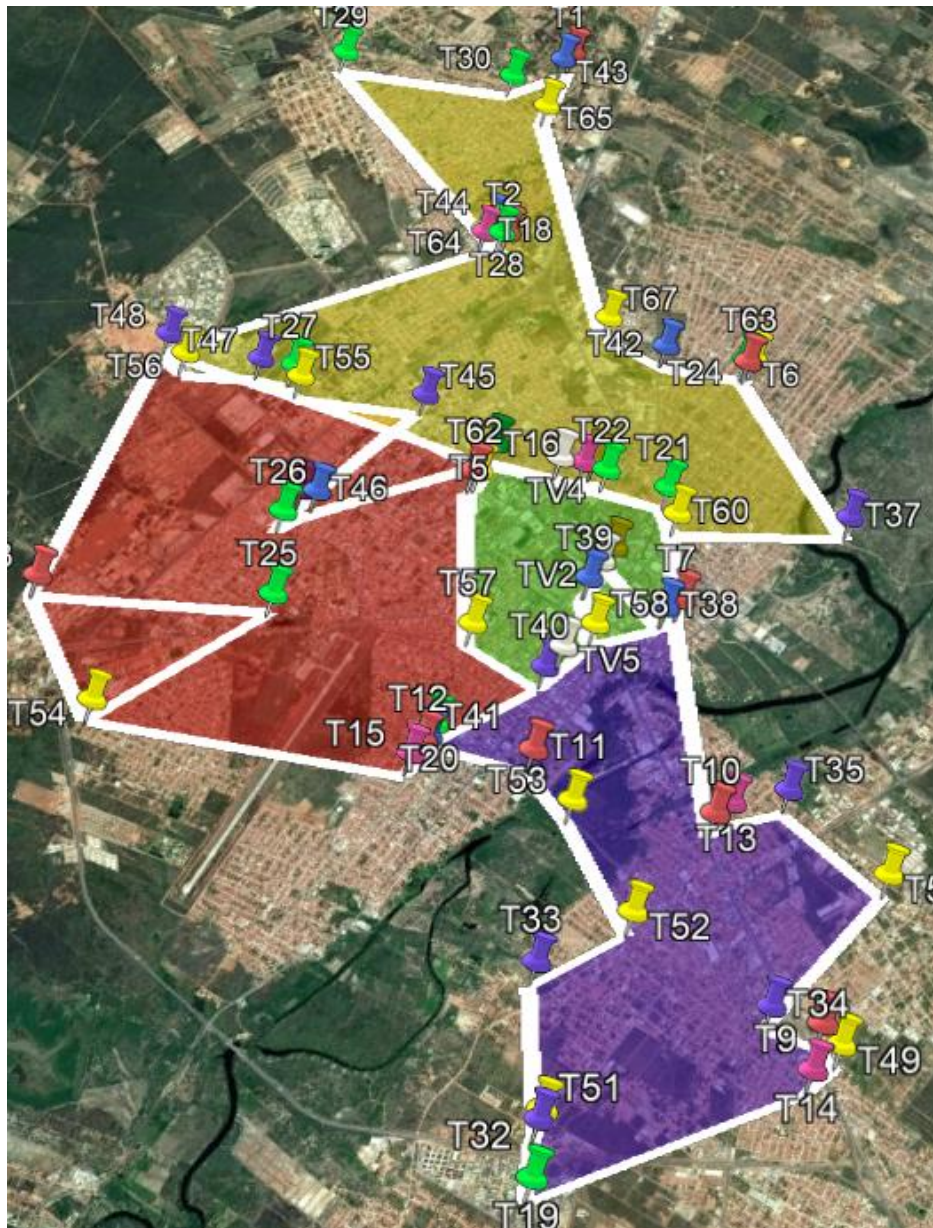
Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Através da análise da Figura 19, é possível verificar que as torres estão espalhadas por todas as regiões da cidade, concentradas em sua maioria na região central da cidade que é caracterizada pelo elevado fluxo de pessoas e carros diariamente, causado principalmente pela grande concentração de estabelecimentos comerciais nessa região.

3.2 ESCOLHA DOS PONTOS

Para a realização desse trabalho, dividiu-se a região de análise em quatro zonas de acordo com a localização geográfica e quantidade de torres presentes em cada uma dessas áreas, sendo os limites de cada uma dessas zonas delimitados pelas torres ali presentes. Essas zonas estão ilustradas na Figura 20 onde cada cor representa uma área de análise.

Figura 20 - Representação das quatro zonas de análise.



Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Na Figura 20 é possível visualizar a separação entre cada uma das zonas, a Zona 01, representada pela cor verde, engloba a região central da cidade, a Zona 02, representada na Figura 21 pela cor azul, engloba a região sul da cidade, a Zona 03, representada pela cor vermelha, abrange a região oeste, enquanto que a Zona 04 que está caracterizada pela cor amarela engloba a região norte da cidade. Em cada uma dessas zonas foram determinados 50 pontos de medição resultando num total de 200 pontos.

Para a escolha dos 50 pontos de medição em cada uma das zonas, primeiramente determinou-se o ponto médio de cada uma das quatro regiões de análise, esse ponto representa o centroide do polígono que representa a área de análise e, a partir dele são determinados outros 49 pontos em cada uma das zonas. A Tabela 10 mostra as coordenadas de cada um desses pontos.

Tabela 10 - Características dos centroides das zonas de análise

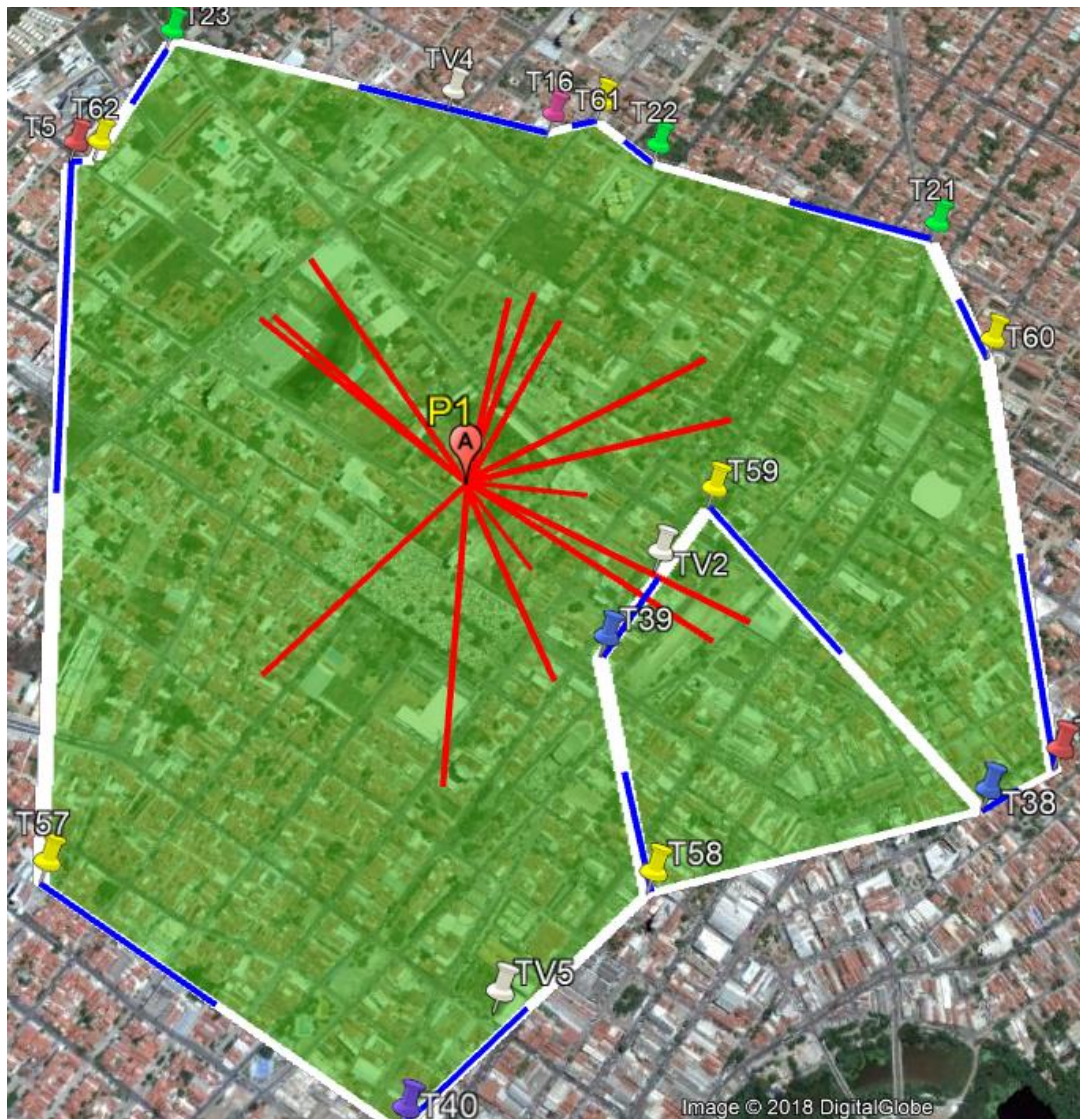
Ponto	Latitude	Longitude	Zona Pertencente	Distância média entre o ponto e as torres (m)
P1	-5,187118°	-37,347744°	Zona 01	771,9
P51	-5,210362°	-37,338027°	Zona 02	1499,48
P101	-5,187825°	-5,187825°	Zona 03	1432,35
P151	-5,169382°	-5,169382°	Zona 04	1572,83

Fonte: Autoria própria, 2017.

Através da análise da Tabela 10, é possível observar que os centroides das Zonas 02, 03 e 04 estão, em média, a mesma distância das torres de rádio base e radiodifusão. A distância menor na Zona 01 pode ser explicada, devido a essa região possuir uma área menor quando comparado às três zonas restantes.

Definido o centroide de cada uma das zonas de análise, foram determinados os pontos médios entre as torres e o centroide e, o ponto médio entre duas torres em cada região. Cada um desses pontos foi marcado como um local para medição criando, desse modo, uma malha que percorre toda a zona de análise. A Figura 21 ilustra essa metodologia aplicada a Zona 01.

Figura 21 - Metodologia para a escolha dos locais baseada nas distâncias médias entre as torres e o centroide da zona de análise



Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Na Figura 21, as linhas vermelhas representam as distâncias utilizadas para a localização dos pontos médios entre o centroide e as torres espalhadas pela região, enquanto as linhas azuis representam as distâncias referentes aos locais dos pontos médios determinados entre duas torres. No final de cada um desses segmentos de reta, foi marcado um ponto onde foi realizada a medição.

Além dos pontos determinados por essas linhas, com o objetivo de realizar as medições em 50 pontos em cada uma das zonas, também foram escolhidos locais que estivessem próximos de escolas, hospitais e torres de telecomunicação de modo que todas as

regiões das zonas de análise fossem representadas pelas medições. Essa metodologia foi aplicada às quatro zonas que são descritas a seguir.

3.2.1 Zona 01

A Zona 01 engloba a região central da cidade, ocupando partes dos bairros do Centro, Doze Anos, Bom Jardim, Nova Betânia e Paredões correspondendo a uma área de aproximadamente 2,0 km² por onde estão distribuídas 18 torres de telecomunicações. Essa área é caracterizada por possuir grande quantidade de estabelecimentos comerciais o que a torna uma área de muita movimentação de pessoas principalmente durante o dia. A Figura 22 mostra a distribuição dos pontos de medição nessa área.

Figura 22 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 01.



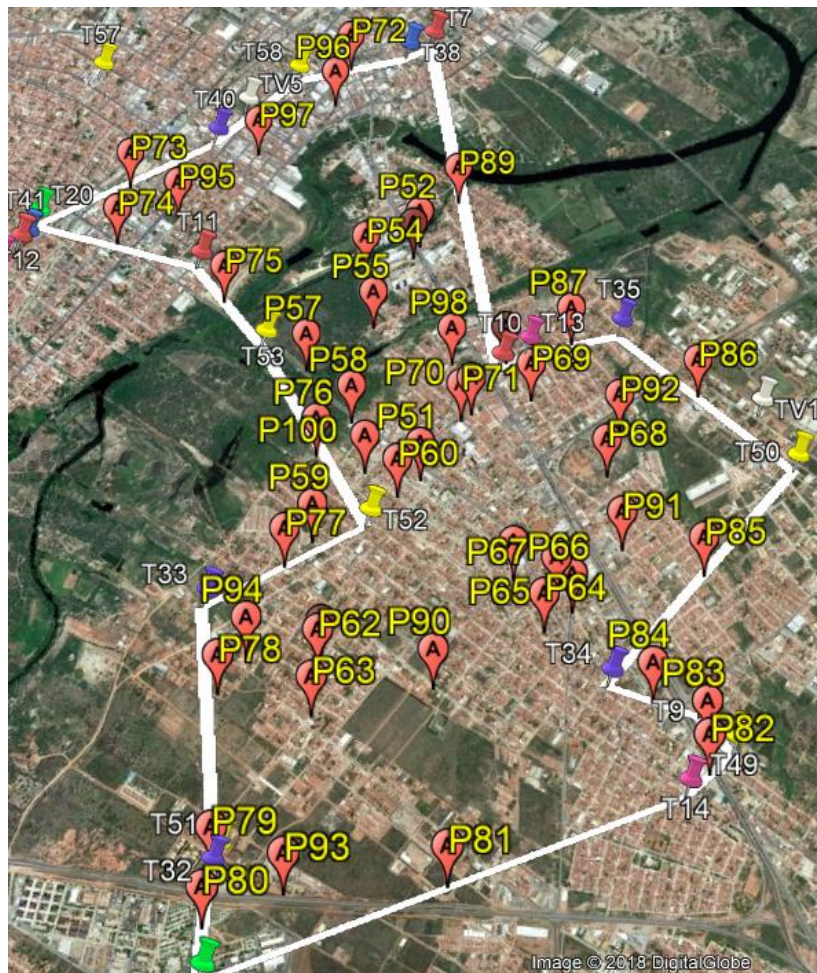
Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Através da Figura 22 é possível verificar que os 50 pontos estão espalhados por toda a região de análise de modo que eles consigam identificar as características de cada um desses locais. A distância média entre os pontos de medição e o centroide dessa zona é de 615 metros, com as distâncias variando de 187 a 1000 metros.

3.2.2 Zona 02

A Zona 02 engloba a região sul da cidade, localizada principalmente nos bairros do Alto de São Manoel, Ilha de Santa Luzia, Alto da Conceição, Costa e Silva e Centro. Nessa região estão localizadas 21 torres espalhadas por uma área de aproximadamente 5,7 km². Essa área é caracterizada pela forte presença de estações de TV em suas proximidades. A Figura 23 mostra a distribuição dos pontos de medição nessa área.

Figura 23 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 02.



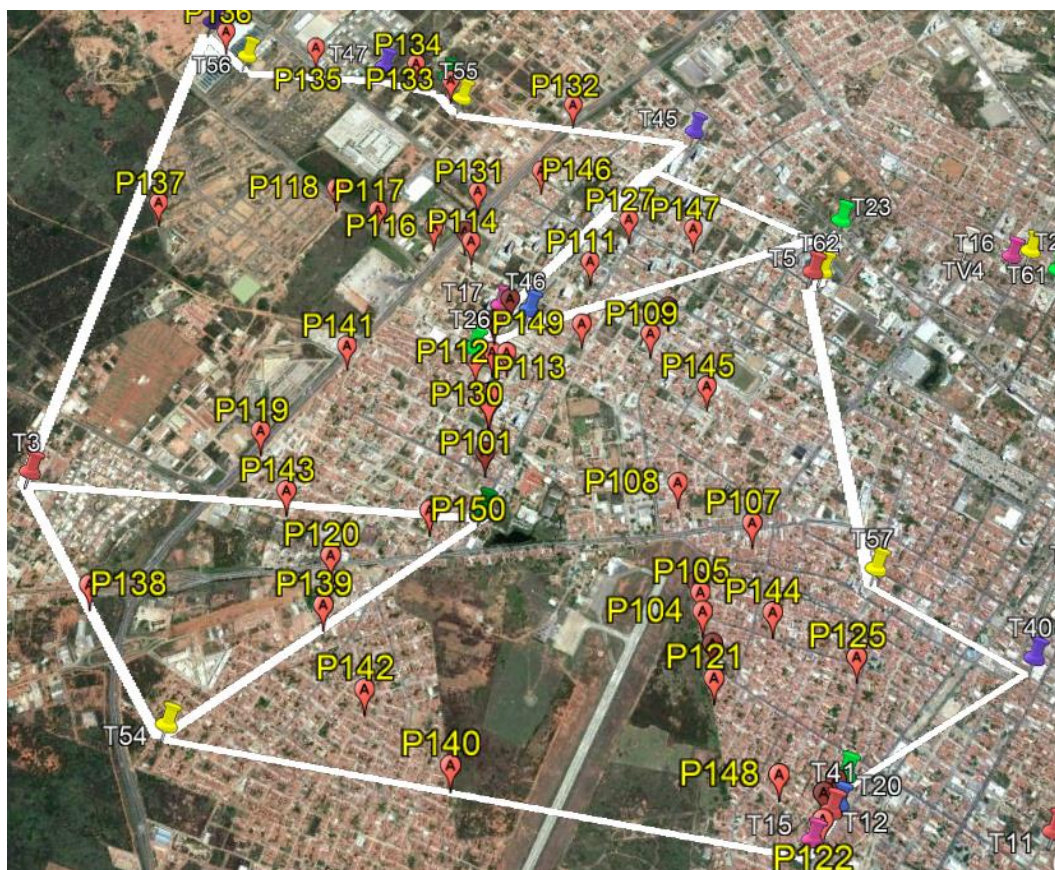
Fonte: Adaptado de Google Earth®, 2017.

Analisando a Figura 23, observa-se que os pontos de medição estão distribuídos baseando-se nas distâncias médias entre as torres e o ponto central dessa região. A distância entre os pontos de medição e o centroide dessa região varia de 116 a 2060 m, cujo valor médio é de 1067 metros.

3.2.3 Zona 03

A Zona 03 corresponde à região oeste da cidade, nessa zona estão localizados os bairros do Aeroporto, Boa Vista, Doze Anos, Nova Betânia e Dix-Sept Rosado. Essa região ocupa aproximadamente, uma área de 8,4 km², sendo, portanto a maior região de análise em área. Nela estão distribuídas 21 torres. A Figura 24 mostra a distribuição dos pontos de medição nessa área.

Figura 24 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 03.



Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Os pontos de medição dessa zona estão localizados a distância média de 1080 metros do centroide dessa localidade com valores que variam de 185 a 2056 metros.

3.2.4 Zona 04

A Zona 04 abrange a região norte da cidade, nela estão localizados os bairros do Abolição, Santo Antônio, Santa Delmira e Bom Jardim o que faz com que essa zona seja uma das mais populosas dentre as analisadas. Sua área é de aproximadamente 7,7 km² por onde estão distribuídas 25 torres. A Figura 25 mostra a distribuição dos pontos de medição nessa área.

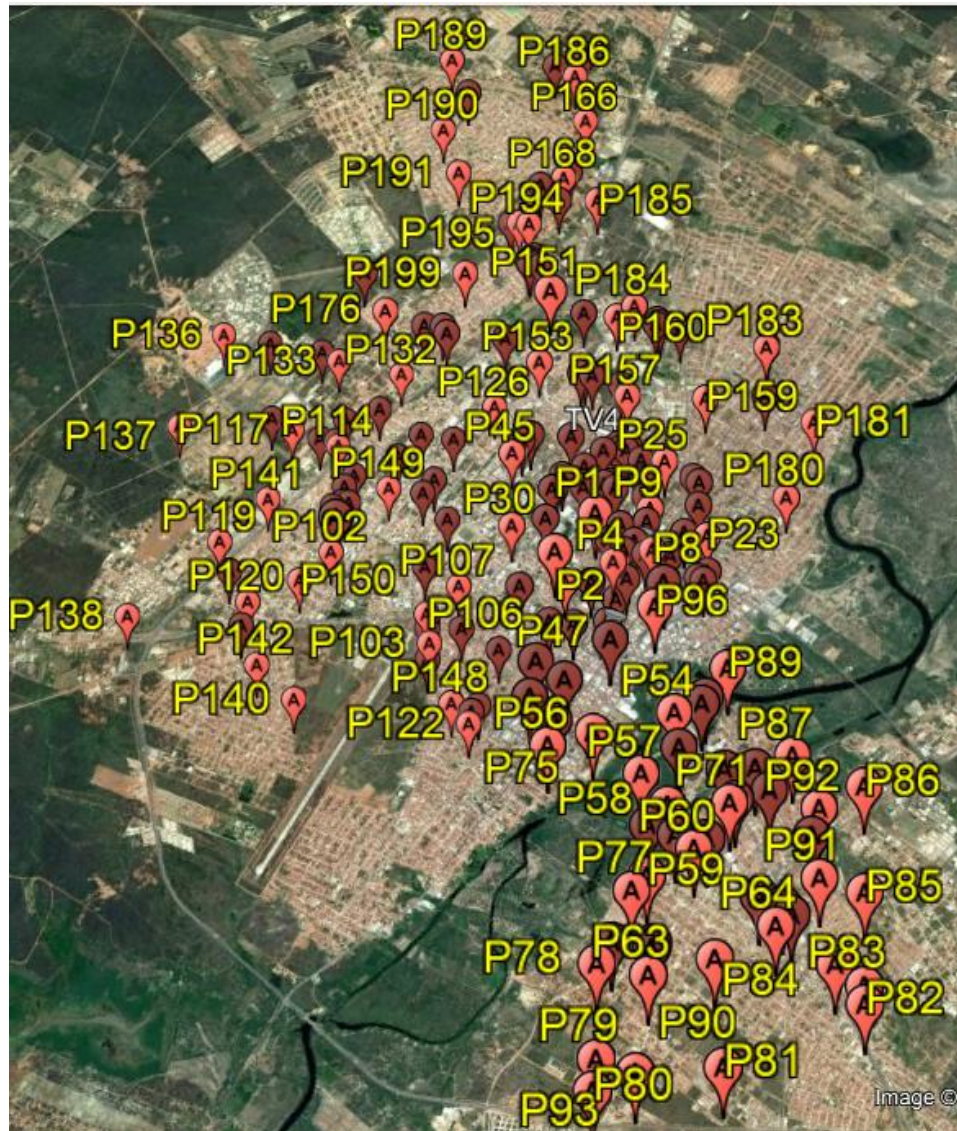
Figura 25 - Distribuição dos pontos de medição pela Zona 04.



Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

A distância entre os pontos de medição e o centroide dessa zona de análise varia de 305 a 2600 metros, com valor médio de 1200 metros. Essa região é a área que possui os pontos de medição mais distantes do ponto central da zona de análise. Aplicando a metodologia descrita anteriormente em cada uma das quatro zonas, os 200 pontos foram distribuídos conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Localização dos 200 pontos onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Através da análise da Figura 26, é possível observar que os 200 pontos espalham-se por todas as regiões da cidade, o que faz com que eles representem as diferentes características existentes em cada uma dessas zonas. As principais informações referentes às quatro zonas analisadas estão mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Principais características referentes às quatro zonas de análise.

Zona	Área	Quantidade de Torres	Distância média entre os pontos de medição e o centroide (m)	Intervalo de distância entre os pontos de medição
Zona 01	2,0 km ²	18	615 m	187 a 1000 m
Zona 02	5,7 km ²	21	1067 m	116 a 2060 m
Zona 03	8,4 km ²	21	1080 m	185 a 2056 m
Zona 04	7,7 km ²	25	1200 m	305 a 2600 m

Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a realização das medições das intensidades de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência, o instrumento utilizado foi o medidor de campo eletromagnético multibanda isotrópico de três eixos da Tenmars modelo TM-196. Esse medidor é projetado para medir e monitorar a intensidade dos campos eletromagnéticos em radiofrequência em uma faixa de medição que se estende de 8 MHz a 10 GHz, possuindo a capacidade de expressar esses valores referentes aos três eixos de medição ou a cada um deles separadamente. Seu funcionamento baseia-se no princípio da indução eletromagnética sendo capaz de indicar os valores instantâneos, médio ou máximo da grandeza a qual está analisando (TENMARS, 2009). A Figura 27 mostra esse medidor.

Figura 27 - Medidor Tenmars TM-196



Fonte: Tenmars, 2016.

3.3.1 Calibração do Medidor Tenmars TM-196.

Para a realização dessas medições, foi necessária a escolha do fator de calibração que consiste em um número que varia de 0.10 a 9.99 pelo qual o valor medido é multiplicado e assim, seu resultado possa ser indicado no visor. O fator adotado para essas medições foi de 1.0. Esse fator é muitas vezes utilizado para melhorar a sensibilidade do instrumento em função da sua resposta em frequência com o objetivo de aumentar a precisão da medição (PARAJULI, 2014).

O processo de calibração é feito da seguinte forma:

- Primeiramente, pressiona-se e segura a tecla HOLD e depois pressiona-se a tecla SET para entrar no modo de configuração;
- Pressiona-se a tecla SET por cinco vezes até a escolha do parâmetro CAL SET;
- Pressiona-se a tecla HOLD ALARM para selecionar o valor do fator de calibração;
- Pressiona-se a tecla REC TIME para selecionar os dígitos referentes ao fator de calibração;
- Pressiona-se a tecla UNIT ENTER para salvar o resultado.

3.4 CAMPANHA DE MEDIÇÃO

As medições das intensidades de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência foram realizadas nos 200 pontos seguindo metodologia apresentada na Resolução 303 da ANATEL de 2002 que define um período de 6 minutos como o tempo necessário para se calcular a média temporal da exposição contínua aos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequência. As medições foram realizadas no período de segunda à sexta-feira entre as 08:00 e 11:00 horas e das 14:00 às 17:00 horas. Os valores obtidos nessas medições são resultados das contribuições dos componentes dos campos em todas as direções.

Com o objetivo de diminuir as influências do operador durante as medições de campo elétrico, o instrumento de medição foi posicionado sobre um tripé de modo que a sonda do medidor esteja localizada a 1,5 m de altura do solo. Essa altura foi baseada na distância média entre o solo e a linha do abdômen de um adulto médio no Brasil. A Figura 28 mostra o medidor posicionado sobre o tripé.

Figura 28 - Medidor Tenmars TM-196 montado sobre o tripé.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Além da obtenção dos valores da intensidade de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência nos 200 pontos de medição, também foi determinada a localização das coordenadas desses pontos através da latitude e longitude obtidas com a utilização de Google Maps e de um GPS modelo GPSmap 78s da fabricante GARMIN® que pode ser visualizado na Figura 29.

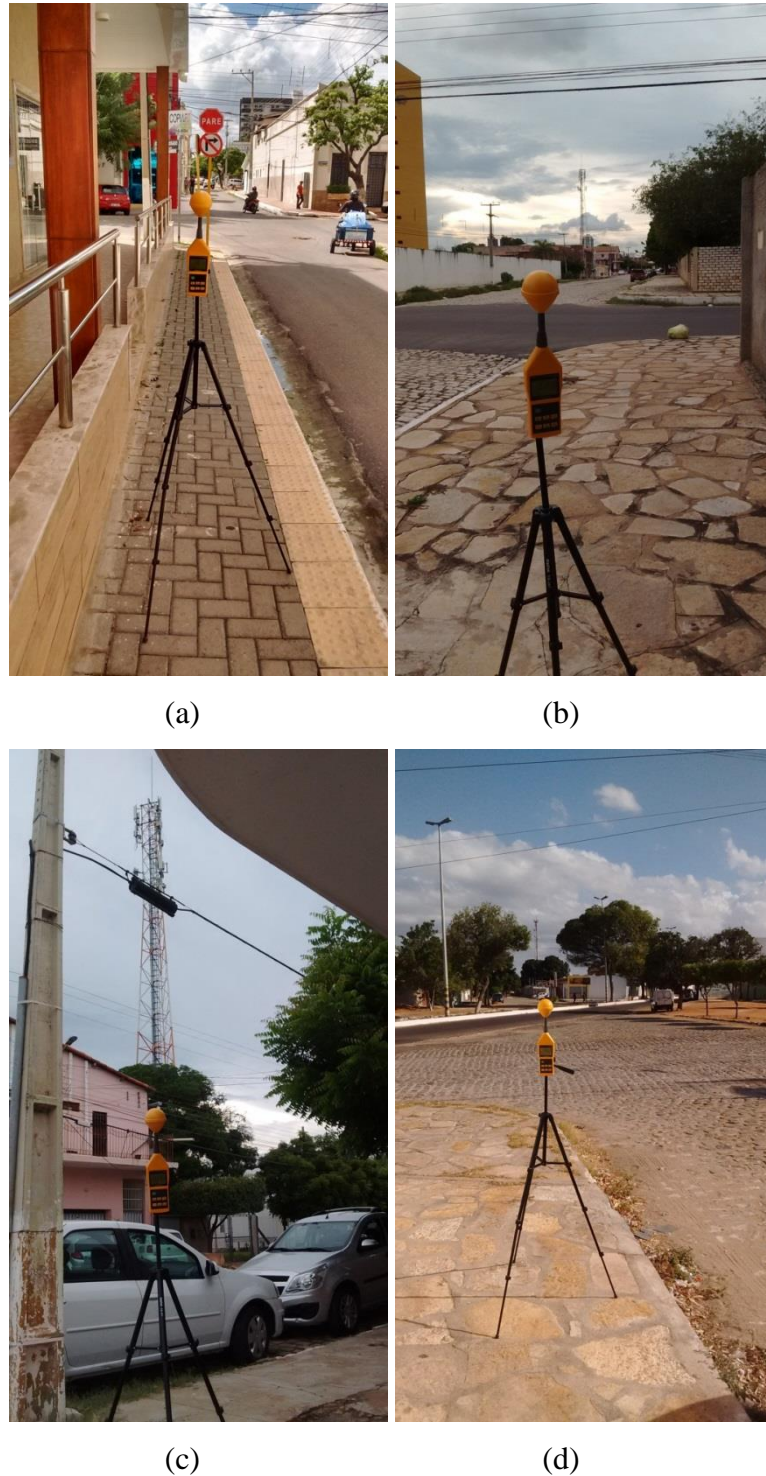
Figura 29 - GPS modelo GPS map 78s - GARMIN



Fonte: GARMIN, 2017

O valor dessas coordenadas é necessário para, através da utilização de técnicas de interpolação, realizar a distribuição espacial dos dados de medição e assim estimar de que forma esses campos se distribuem sobre a região de análise em função de suas coordenadas. A Figura 30 mostra o sistema de medição montado nas quatro zonas de análise para a realização das medições.

Figura 30 - Sistema de medição na: (a) Zona 01; (b) Zona 02; (c) Zona 03; (d) Zona 04.



3.5 TRATAMENTO NUMÉRICO COMPUTACIONAL

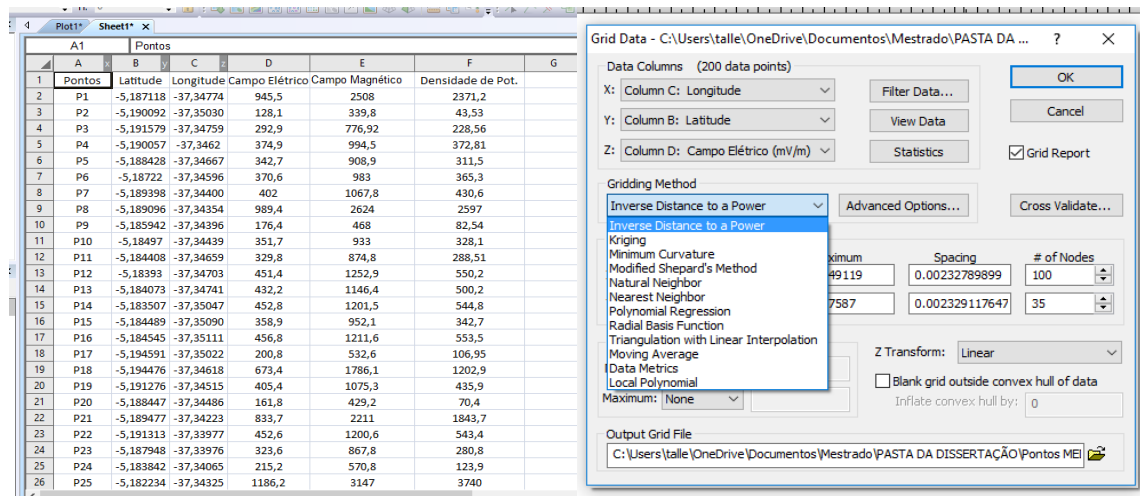
Com o objetivo de verificar de que forma os campos eletromagnéticos se distribuem espacialmente nas regiões sob análise, utilizou-se uma técnica de interpolação que consiste em um método matemático que ajusta os valores de uma função em um determinado ponto não amostrado, de acordo com os valores existentes nos pontos amostrados. Desse modo, é possível estimar os valores das intensidades de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência em lugares onde as medições não foram realizadas em função dos 200 pontos medidos.

Como cada um dos métodos de interpolação possui características e utilizações distintas, comparou-se, através da técnica de validação cruzada, o desempenho dos interpoladores Inverso Ponderado da Distância, Krigagem e Função de Base Radial aplicados ao conjunto de dados obtidos pela campanha de medição. Desse modo, foi possível calcular a eficiência de um método de interpolação quando comparado com outro, fazendo com que o método escolhido represente de forma mais adequada o conjunto de dados obtido através das medições.

A distribuição espacial desses dados e a aplicação das técnicas de interpolação foram feitas com a utilização do *software* SURFER[®] versão 13.0 que é um pacote de programas comerciais desenvolvidos pela Golden Software Inc. utilizado para a confecção de mapas de variáveis a partir de dados espacialmente distribuídos. Esses dados são representados em função de direções no eixo X-Y e, a partir deles são criados vários tipos de curvas de acordo com a variação espacial desses dados. A Figura 31 mostra algumas telas de trabalho do *software* SURFER[®].

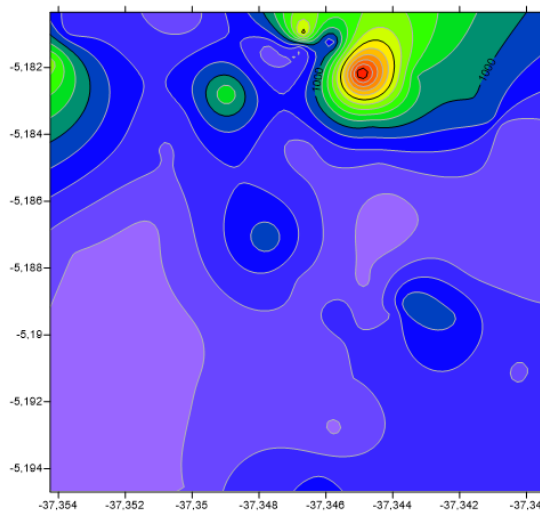
Por meio da inserção de dados na tela de entrada mostrada na Figura 31.a, é possível realizar operações numéricas, determinação de parâmetros estatísticos, criação de mapas de representação entre outras funções. Na Figura 31.b é mostrada a tela de seleção do conjunto de informações fornecidos na tela de entrada de dados, nessa tela é possível escolher o método de interpolação que será aplicado, limites de variação para o conjunto analisado, quantidade de pontos a serem interpolados além de criar a região sob qual o mapa será construído.

Figura 31 - Telas de trabalho do software SURFER®: (a) entrada dos dados; (b) escolha do método de interpolação; (c) criação de mapa de contorno; (d) criação de superfície 3D.

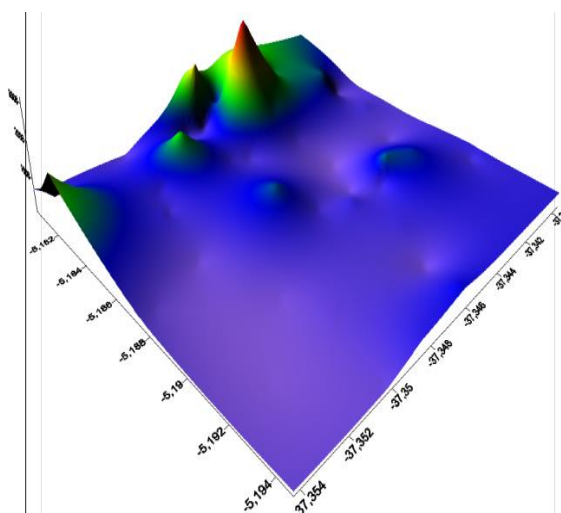


(a)

(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

As Figuras 31.c e 31.d mostram dois tipos de mapas, mapa de contorno e mapa de superfície 3D, que podem ser gerados através do tratamento estatístico dado aos valores de entrada que demonstram graficamente a distribuição espacial das grandezas analisadas. Os mapas de contorno criam curvas que indicam a intensidade de uma grandeza com relação às suas coordenadas, enquanto que o mapa de superfície 3D gera uma região cuja altura representa a amplitude do sinal em um determinado ponto de análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão analisados e apresentados os resultados referentes às etapas de medição dos campos eletromagnéticos, aplicação das técnicas de interpolação e obtenção das curvas que representam espacialmente a distribuição desses campos.

Através da aplicação do método da validação cruzada nas técnicas de interpolação Inverso Ponderado da Distância (IDP), Krigagem (KG) e Função de Base Radial (RBF) foram obtidos os parâmetros erro médio absoluto (MAE) e erro quadrático médio (RMSE) apresentados na Tabela 12.

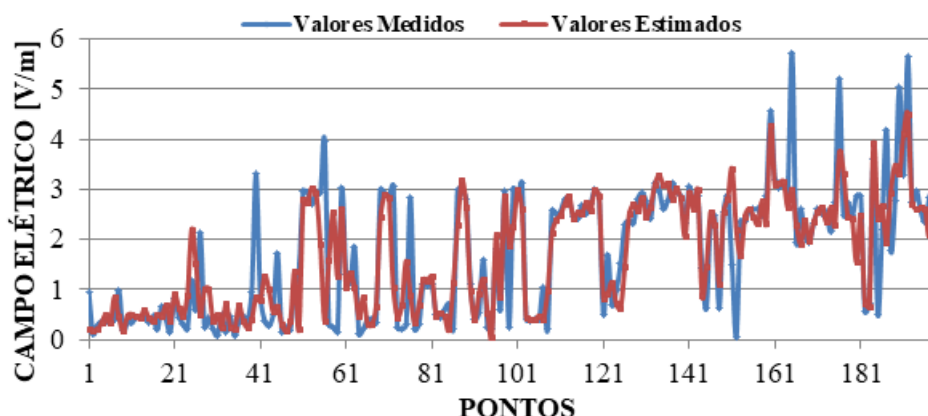
Tabela 12 - Resultados dos parâmetros estatísticos para as técnicas de interpolação.

Método de Interpolação	Erro Médio Absoluto (V/m)	Erro Quadrático Médio (V/m)²
IDP	0,57	0,82
KG	0,45	0,72
RBF	0,52	0,79

Fonte: Autoria própria, 2017.

Através da análise dos dados presentes na Tabela 11, foi possível observar que, dentre os três métodos de interpolação comparados, o método da krigagem foi o que apresentou desempenho mais satisfatório para estimar o valor do campo elétrico em vários pontos a partir de um conjunto de dados, já que foi o método que apresentou os menores valores para os parâmetros erro médio absoluto (MAE) e erro quadrático médio (RMSE) obtidos através do método da validação cruzada. A Figura 32 mostra a variação dos valores medidos e dos valores estimados pelo método da krigagem em função dos 200 pontos.

Figura 32 - Gráfico comparativo entre os valores medidos e estimados através do método da krigagem.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Com o valor do campo elétrico, foi possível calcular a partir da Equação 19 a razão de exposição a qual a população está sujeita levando em consideração o valor limite de campo elétrico mais rigoroso, estabelecido pela Resolução 303 de 2002 da ANATEL, para a faixa de frequência analisada nesse trabalho que é de 28 V/m.

Portanto, utilizou-se esse método para gerar superfícies que representem a intensidade de campo elétrico, a intensidade de campo magnético, a densidade de potência e a razão de exposição a campo elétrico em função de suas coordenadas, longitude (eixo das abscissas) e latitude (eixo das ordenadas).

Para uma melhor análise dos resultados obtidos, seus dados foram interpretados separadamente em cada uma das quatro zonas mostradas a seguir.

4.1 ZONA 01

A Zona 01 corresponde à região central da cidade, cuja principal característica dessa área é a grande presença de estabelecimentos comerciais o que faz com que haja um grande fluxo de pessoas nessa região. Os parâmetros estatísticos e os pontos que apresentaram os maiores valores medidos dentro da Zona 01 são mostrados nas Tabelas 13 e 14 respectivamente.

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 01.

Grandeza	Valor médio	Valor máximo	Valor limite	Percentual do valor máximo referente ao limite de exposição
Campo elétrico (mV/m)	570,57	3302	28000	11,79 %
Campo magnético ($\mu A/m$)	1517,77	8759	73000	11,99 %
Densidade de Potência ($\mu W/m^2$)	1591,66	28929,9	2000000	1,44 %
Razão de Exposição	0,00082	0,01391	1	1,39 %

Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 14 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 01.

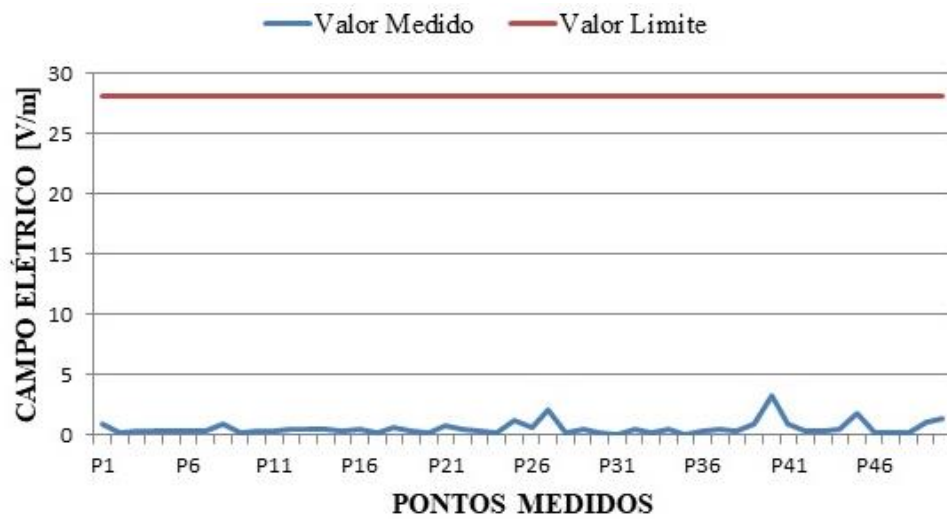
Ponto	Latitude	Longitude	E (mV/m)	H ($\mu A/m$)	S ($\mu W/m^2$)	ER
P40	-5,182173°	-37,344946°	3302	8759	28929,9	0,0139
P27	-5,180996°	-37,346697°	2138	5670	12124,8	0,0058
P45	-5,181841°	-37,354249°	1731,2	4737	8120,9	0,0038
P50	-5,182786°	-37,348968°	1396,2	3703	5185,8	0,0025
P25	-5,182234°	-37,343250°	1186,2	3147	3740	0,0018

Fonte: Autoria própria, 2017.

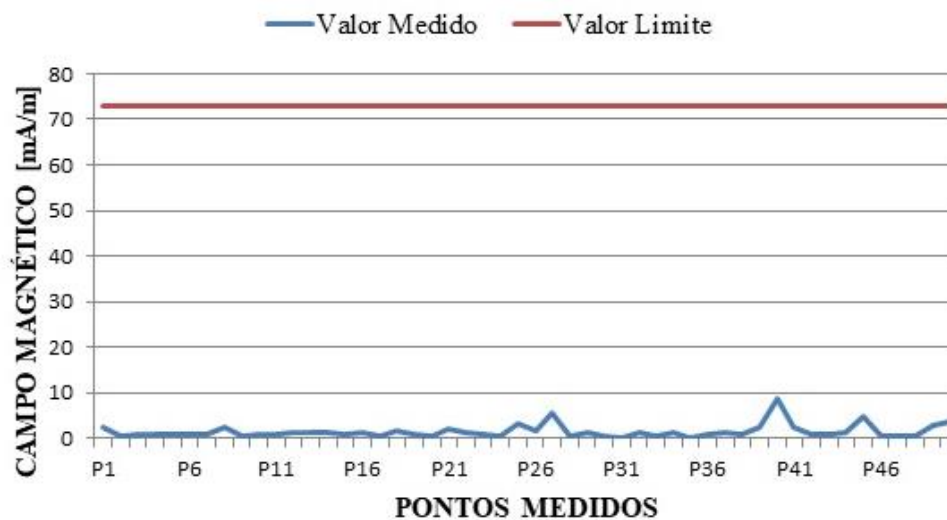
Onde E representa a intensidade de campo elétrico, H a intensidade de campo magnético, S a densidade de potência e ER a razão de exposição a campos elétricos. Observando os dados presentes nas Tabelas 12 e 13 é possível notar que, quando comparados, esses valores estão abaixo dos limites estabelecidos na Tabela 8, fazendo com que essa região esteja de acordo com os parâmetros estabelecidos pelos principais órgãos regulamentadores de exposição à radiação não ionizante.

A Figura 33 mostra graficamente a variação dos valores de intensidade de campo elétrico e campo magnético medidos em cada um dos 50 pontos de análise na Zona 01.

Figura 33 - Variação dos valores medidos na Zona 01: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.



(a)



(b)

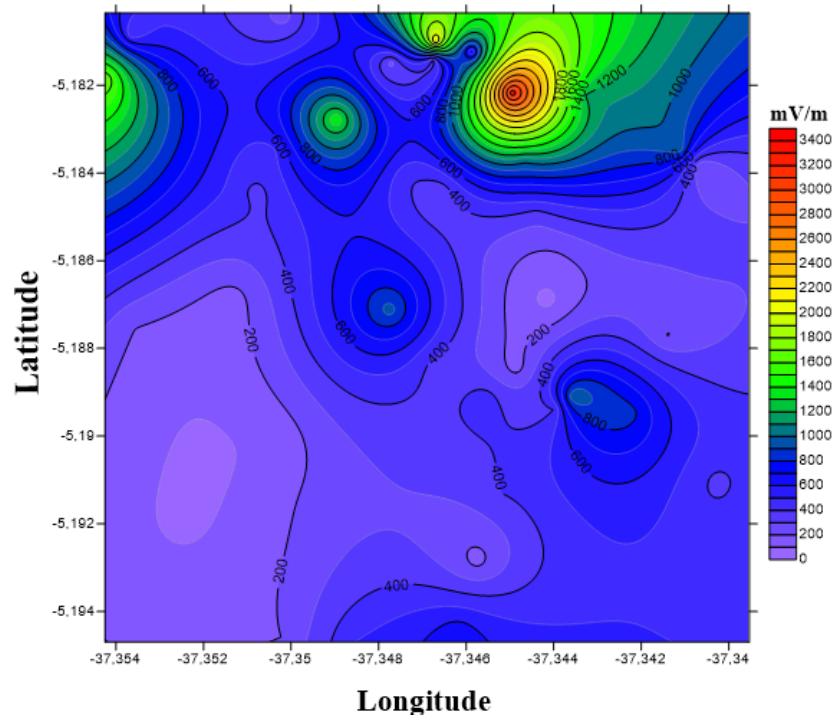
Fonte: Autoria própria, 2017.

A variação apresentada nas Figuras 33.a e 33.b ilustra que todos os pontos medidos estão abaixo dos limites estabelecidos por norma que, para a faixa de frequência analisada nesse trabalho, é de 28 V/m para campo elétrico e 73 mA/m para campo magnético.

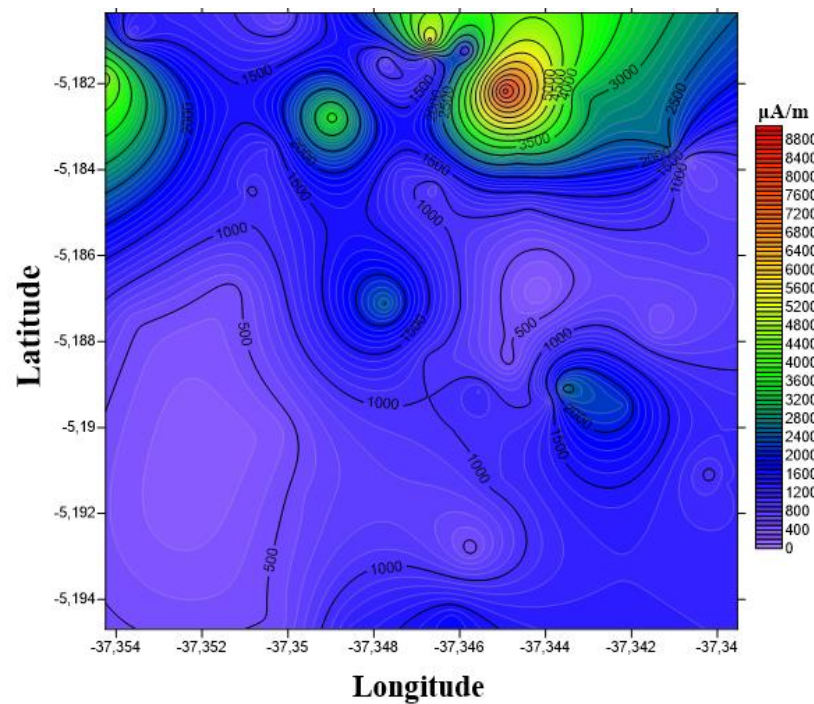
Aplicando o método da krigagem aos pontos da Zona 01, foram geradas superfícies que representam como os campos eletromagnéticos se distribuem espacialmente em função das coordenadas nessa região. A Figura 34 representa a distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 01. Nessas superfícies, os locais expostos a maior intensidade dos

campos eletromagnéticos estão representados pela cor vermelha, enquanto que a cor azul representa as regiões afetadas pelos menores valores encontrados.

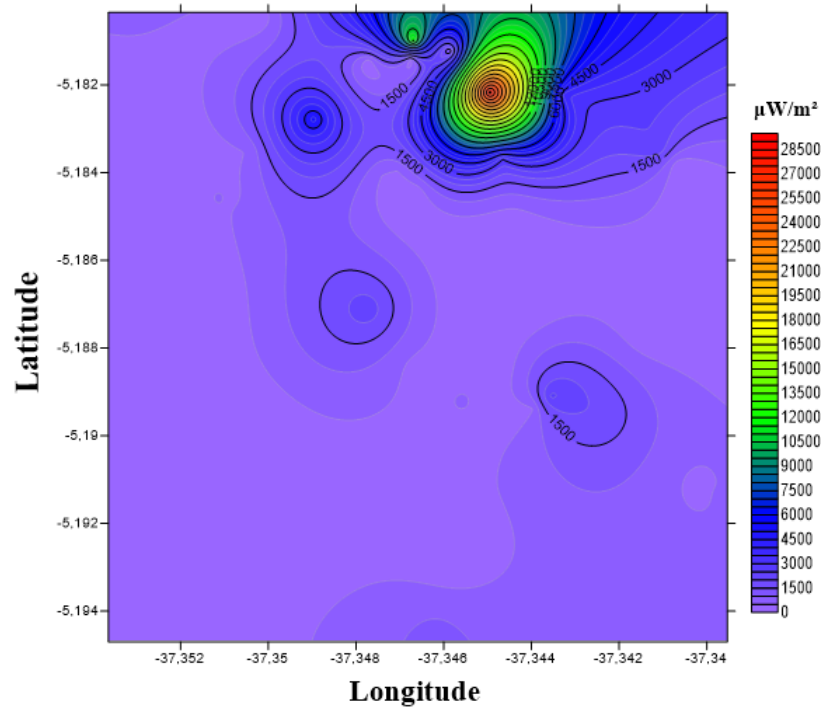
Figura 34 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 01: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.



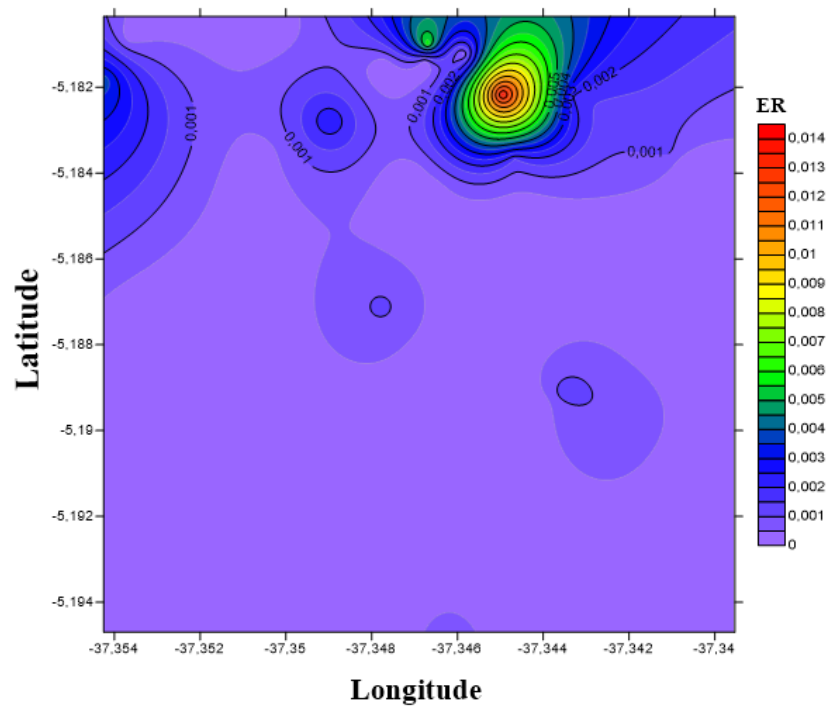
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

É possível observar que as quatro figuras apresentam comportamento semelhante, onde a maior parte da região de análise está sendo afetada por valores muito baixos de radiação eletromagnética influenciando o comportamento dos campos ao seu redor. A região

representada pela cor vermelha corresponde a uma área aberta, localizada no ponto médio entre duas torres de telecomunicação, causando um efeito cumulativo da radiação transmitido por essas estruturas. Nessa área, não há a presença de grandes edifícios ou obstáculos que possam causar atenuação do sinal transmitido, justificando desse modo, o maior nível do sinal medido nessa região.

4.2 ZONA 02

A Zona 02 corresponde à região sul da cidade, englobando partes dos bairros do Alto de São Manoel, Costa e Silva entre outros. Uma das principais características dessa região é a forte presença de estações de TV em seus arredores. Os principais parâmetros estatísticos dos dados dessa zona e os pontos que apresentaram os maiores valores medidos podem ser visualizados através das Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 02.

Grandeza	Valor médio	Valor máximo	Valor limite	Percentual do valor máximo referente ao limite de exposição
Campo elétrico (mV/m)	1427,12	3961	28000	14,15 %
Campo magnético ($\mu A/m$)	3785,46	10506,63	73000	14,39 %
Densidade de Potência ($\mu W/m^2$)	9257,01	41616,77	2000000	2,08 %
Razão de Exposição	0,00445	0,02001	1	2,00 %

Fonte: Autoria própria, 2017.

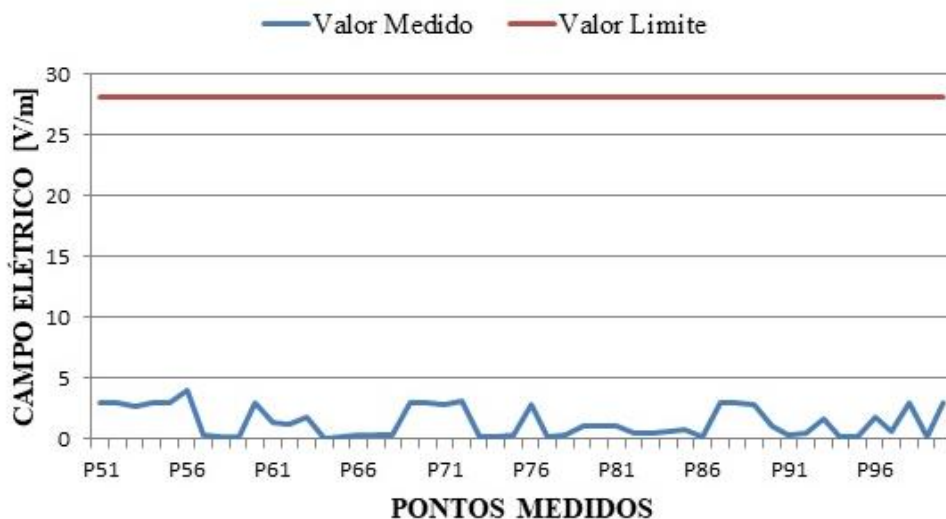
Tabela 16 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 02.

Ponto	Latitude	Longitude	E (mV/m)	H ($\mu A/m$)	S ($\mu W/m^2$)	ER
P56	-5,204180°	-37,349271°	3961	10506,63	41616,77	0,02001
P72	-5,192268°	-37,342460°	3077	8161,80	25113,87	0,01207
P60	-5,211040°	-37,338821°	3018	8005,30	24160,01	0,01161
P100	-5,210143°	-37,340121°	3014	7994,69	24096,01	0,01159
P69	-5,206956°	-37,334093°	3004	7968,17	23936,38	0,01151

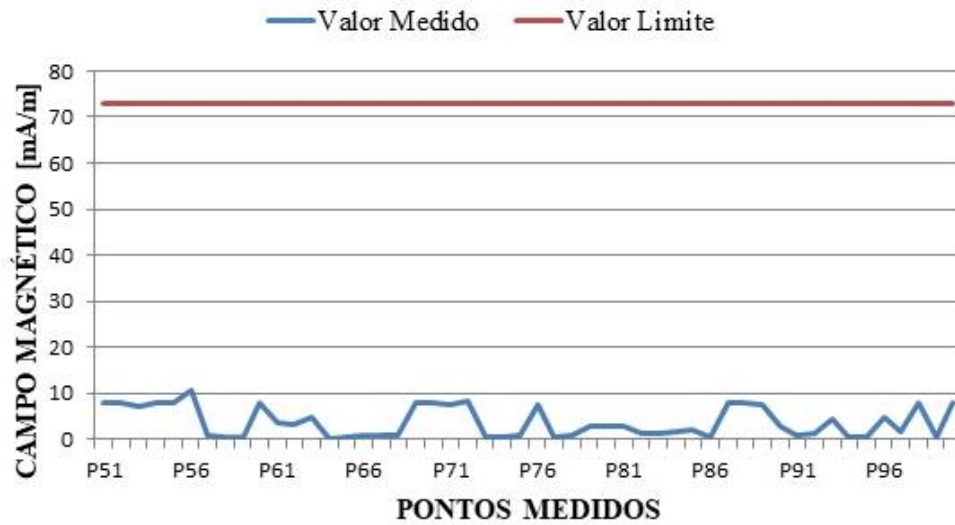
Fonte: Autoria própria, 2017.

Observando os dados presentes nas Tabelas 15 e 16 é possível avaliar que essa zona de análise está exposta, em média, a um nível de radiação maior, valor de aproximadamente 150%, do que a Zona 01 da cidade. Porém, mesmo com esse nível maior de exposição, a Zona 02 não pode ser caracterizada como uma área de risco, no que diz respeito a exposição a radiação eletromagnética, para a população residente ali, pois os valores medidos nessa área estão todos abaixo dos limites estabelecidos pelos órgãos regulamentadores. A variação dos valores medidos para campo elétrico e campo magnético em cada um dos 50 pontos pode ser visualizada através da Figura 35.

Figura 35 - Variação dos valores medidos na Zona 02: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.



(a)

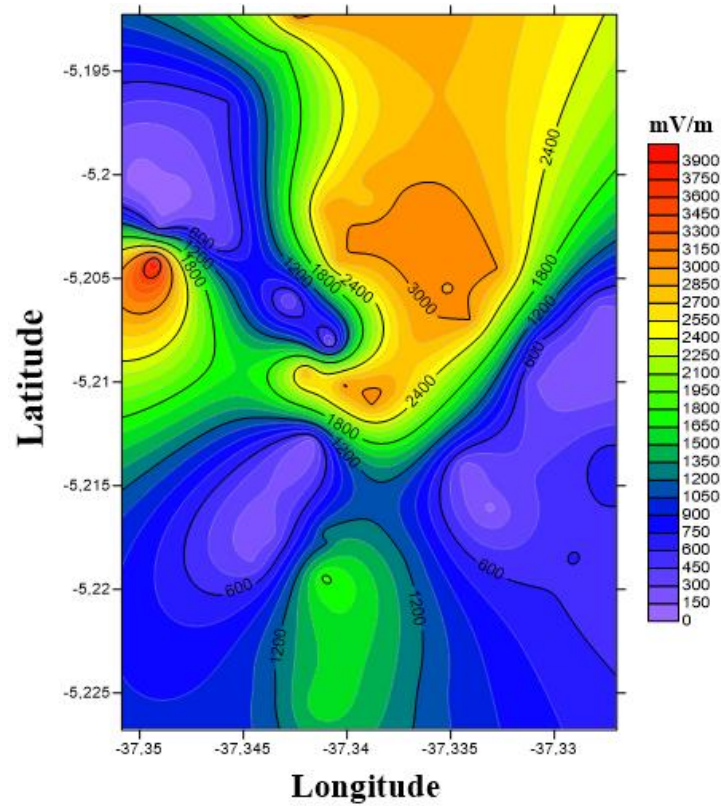


(b)

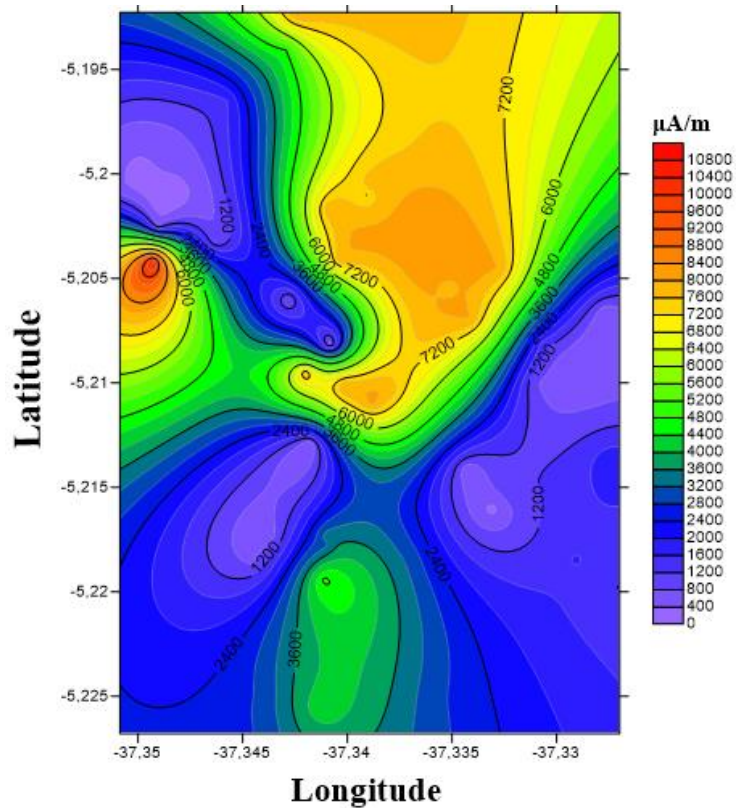
Fonte: Autoria própria, 2017.

A variação observada nas Figuras 35.a e 35.b demonstra que, mesmo nos locais que apresentam a maior intensidade dos valores medidos, os limites de exposição estabelecidos pelas normas regulamentadoras são respeitados nos 50 pontos de análise para a Zona 02. Assim como aos dados da Zona 01, aplicou-se o método da krigagem aos valores medidos na Zona 02 para gerar superfícies que representem a distribuição espacial dos campos eletromagnéticos nessa região. A Figura 36 ilustra essa distribuição onde os maiores valores medidos são representadas pela região de cor vermelha.

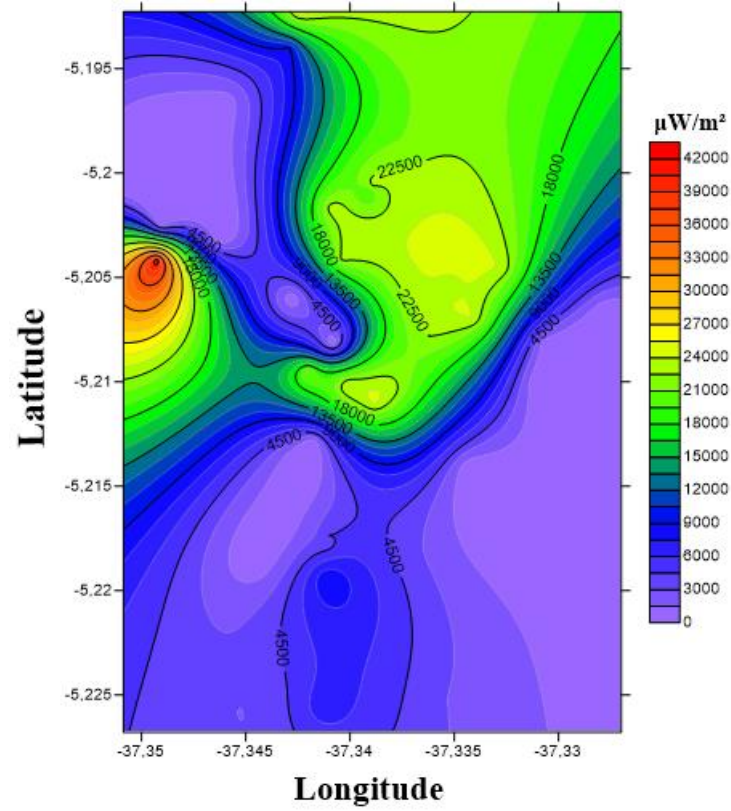
Figura 36 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 02: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.



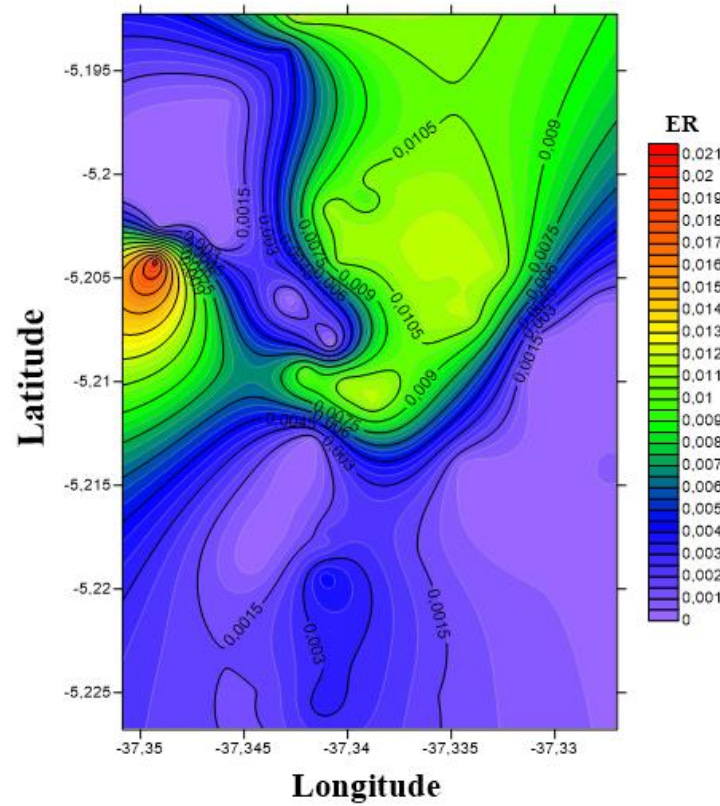
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

Analisando o comportamento da Figura 36 é possível observar que os valores medidos crescem de forma mais gradual, criando zonas de baixa exposição à radiação eletromagnética, representadas pela cor azul, regiões de exposição moderada à radiação eletromagnética, representadas pela cor verde, e regiões de maior exposição representadas pela transição entre as cores laranja e vermelho, ao contrário dos valores medidos na Zona 01, onde a transição ocorre através de uma distribuição gradativa já que as regiões encontram-se mais espaçadas entre si.

4.3 ZONA 03

A Zona 03 representa a região oeste da cidade, nessa área de análise estão englobados partes dos bairros do Aeroporto, Boa Vista, Doze Anos, Nova Betânia e Dix-Sept Rosado, dentre as quatro zonas de análise, a Zona 03 é a que possui a maior área de análise, isso faz com que os pontos dessa região sejam os mais espaçados entre si. As Tabelas 17 e 18 apresentam os principais parâmetros estatísticos e os pontos onde os maiores valores medidos foram encontrados nessa região, respectivamente.

Tabela 17 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 03.

Grandeza	Valor médio	Valor máximo	Valor limite	Percentual do valor máximo referente ao limite de exposição
Campo elétrico (<i>mV/m</i>)	2168,75	3133	28000	11,18 %
Campo magnético (<i>μA/m</i>)	5752,65	8310,34	73000	11,38 %
Densidade de Potência (<i>μW/m²</i>)	14730,16	26036,31	2000000	1,30 %
Razão de Exposição	0,00708	0,01252	1	1,25 %

Fonte: Autoria própria, 2017.

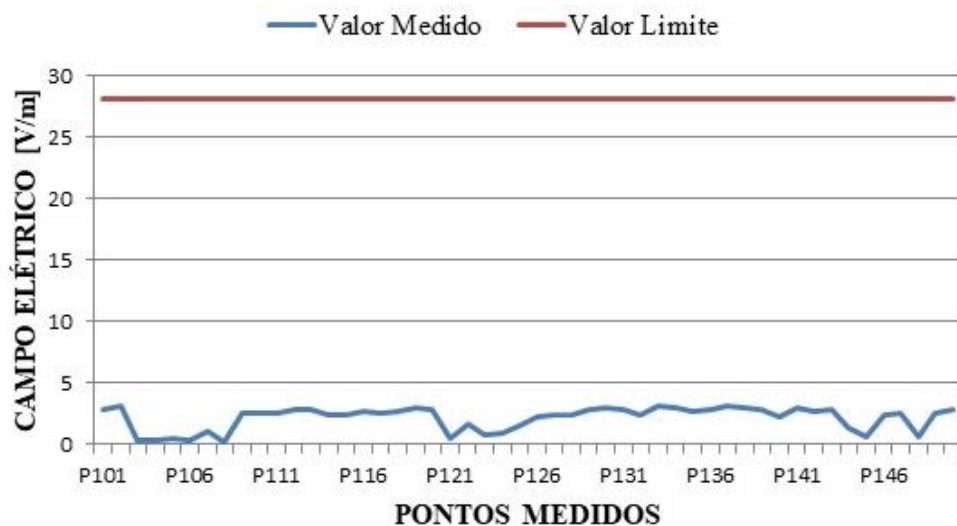
Tabela 18 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 03.

Ponto	Latitude	Longitude	E (mV/m)	H ($\mu A/m$)	S ($\mu W/m^2$)	ER
P133	-5,174491°	-37,367781°	3133	8310,34	26036,31	0,01252
P102	-5,189501°	-37,366151°	3128	8297,08	25953,27	0,01248
P137	-5,179982°	-37,378532°	3127	8294,43	25944,97	0,01247
P141	-5,185574°	-37,371214°	3051	8092,83	24691,25	0,01187
P119	-5,188889°	-37,374113°	2988	7925,73	23682,08	0,01138

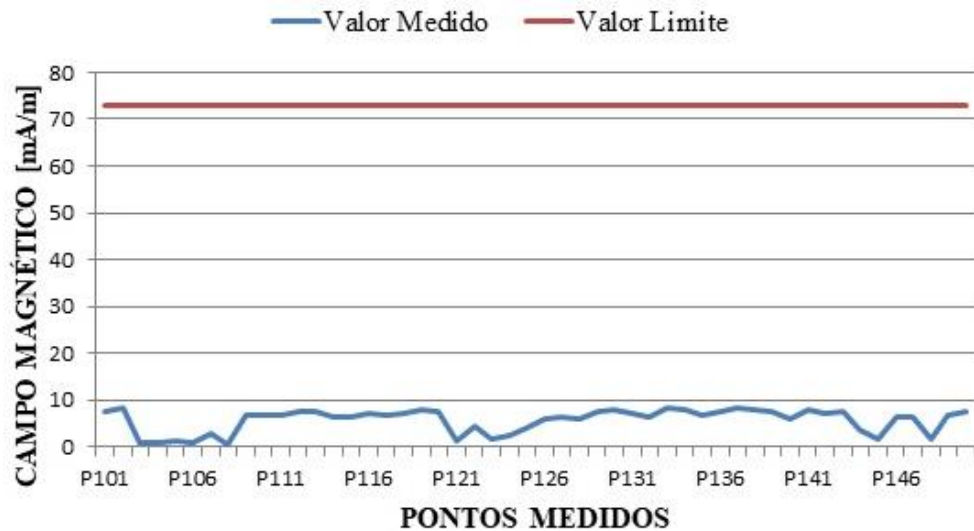
Fonte: Autoria própria, 2017.

Analisando os dados mostrados nas Tabelas 17 e 18, é possível observar que a Zona 03 possui os maiores valores médios quando comparados com os dados das Zonas 01 e 02, embora não apresente os maiores valores registrados. Isso ocorre devido a uma menor variação entre os valores medidos em cada um dos pontos, indicando que vários locais estão expostos a um nível maior de radiação, porém muito abaixo dos limites estabelecidos pelos órgãos regulamentadores. A variação dos valores medidos nos 50 pontos presentes nessa zona pode ser visto graficamente na Figura 37.

Figura 37 - Variação dos valores medidos na Zona 03: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.



(a)



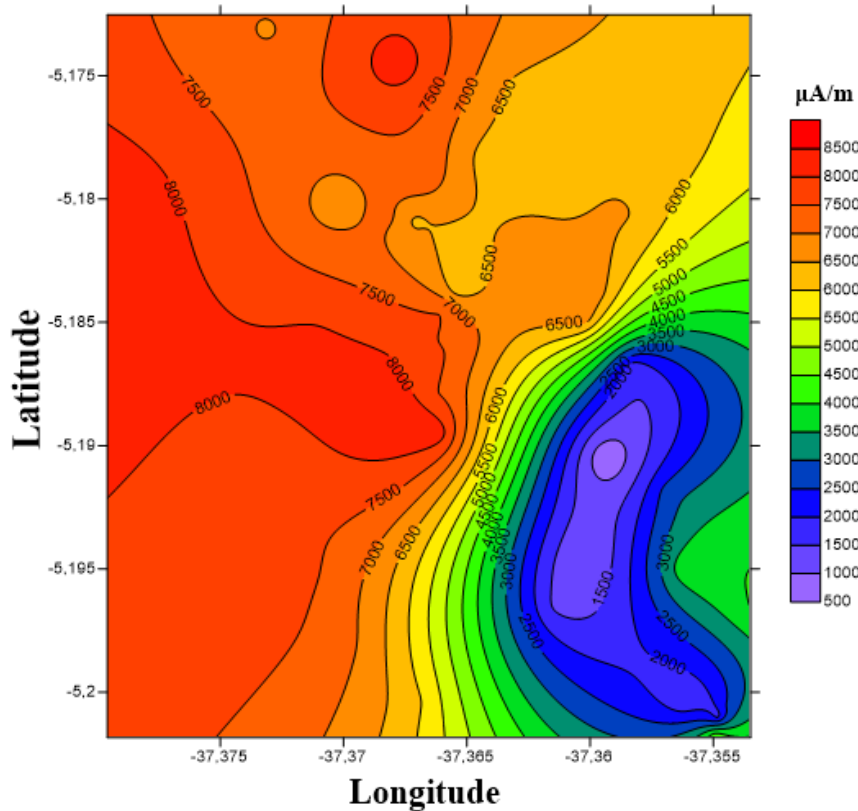
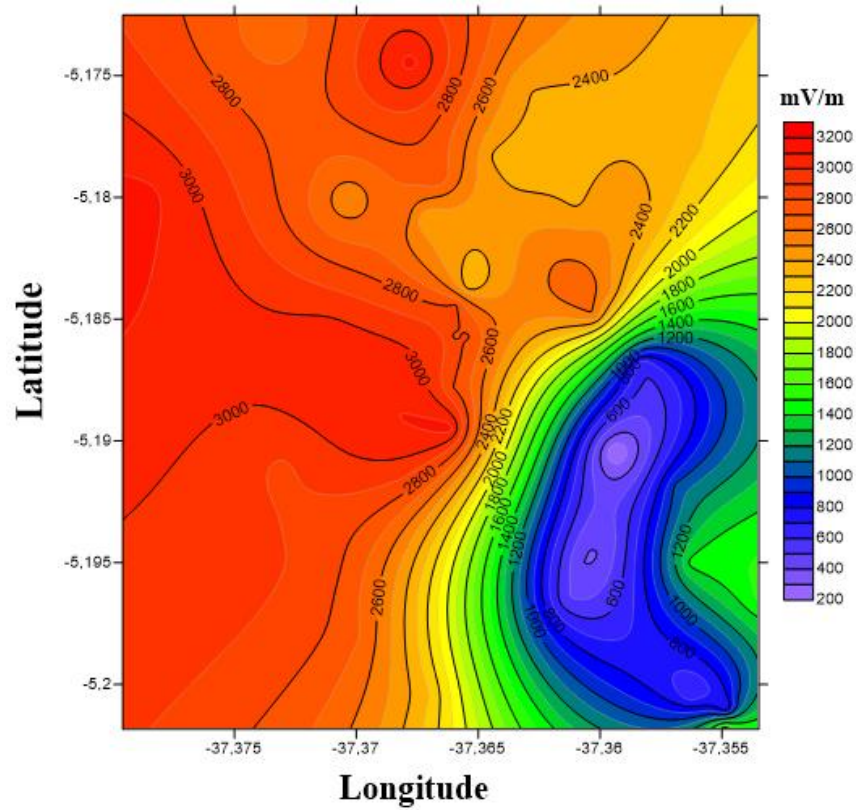
(b)

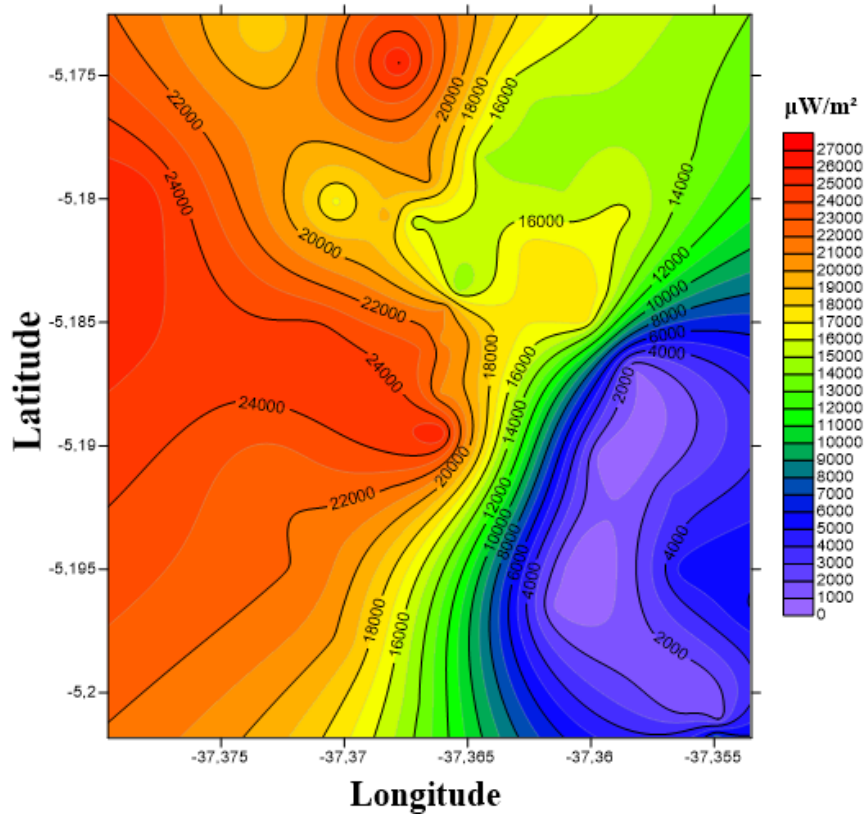
Fonte: Autoria própria, 2017.

Observando a variação dos valores medidos mostrados nas Figuras 37.a, para campo elétrico, e 37.b, para campo magnético, é possível notar que 72% dos pontos analisados estão expostos a um nível superior a 60% do valor máximo registrado nessa região, o que mostra uma menor variação dos valores medidos.

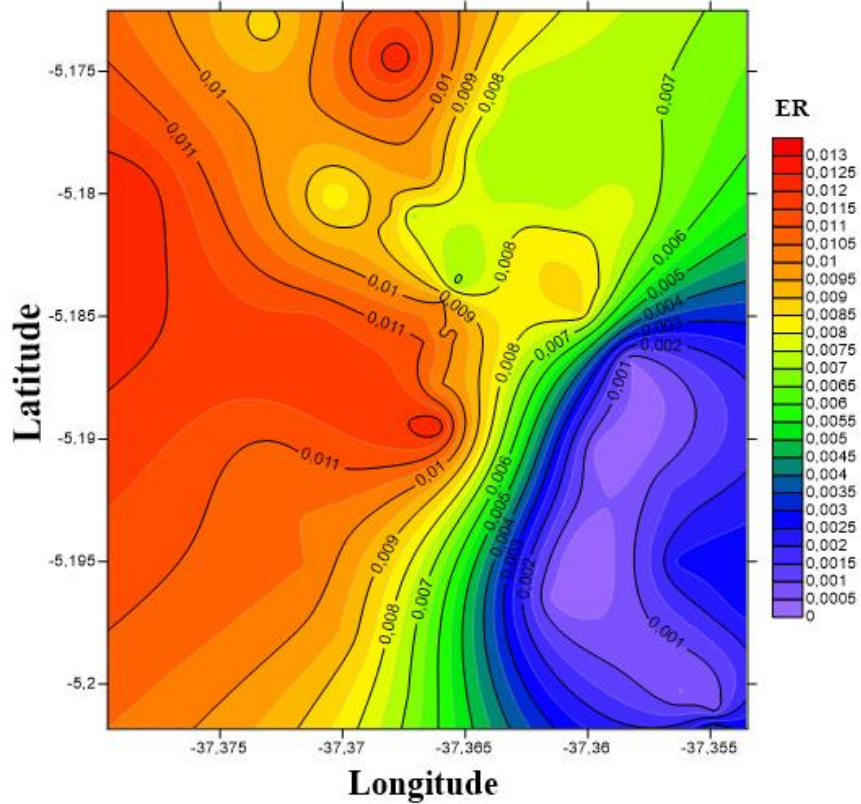
Através da aplicação do método de interpolação da krigagem a esses pontos foram geradas as superfícies que representam espacialmente a distribuição das intensidades dos campos medidos. Nas superfícies geradas, é possível visualizar a grande concentração de pontos expostos a um maior nível de radiação, quando comparados com as outras áreas de análise, através da grande presença de regiões nas cores vermelho e laranja. A Figura 38 ilustra essa distribuição.

Figura 38 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 03: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de Exposição.





(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

Nessa região, os pontos onde foram medidos os maiores valores estão localizados em áreas mais isoladas, sem a presença de grandes construções ou aglomeração de pessoas. Isso faz com que não existam grandes obstáculos que atenuem o nível do sinal emitido pelas torres existentes próximas a essa região. A medida que os pontos se aproximam de locais mais povoados, como a zona central da cidade, o nível de intensidade dos campos eletromagnéticos diminui sendo representado pela área de coloração azul na Figura 38.

4.4 ZONA 04

A Zona 04 engloba a região norte da cidade, nela estão abrangidos os bairros do Abolição, Santa Delmira, Santo Antônio, entre outros, o que faz com essa região seja uma das mais populosas dentre as analisadas, sendo dessa forma uma região de muita importância para a determinação dos possíveis efeitos prejudiciais da exposição a radiação eletromagnética. Os principais parâmetros estatísticos podem ser visualizados na Tabela 19, enquanto que a Tabela 20 mostra os pontos que apresentaram os maiores valores medidos dentro da Zona 04.

Tabela 19 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona 04.

Grandeza	Valor médio	Valor máximo	Valor limite	Percentual do valor máximo referente ao limite de exposição
Campo elétrico (mV/m)	2679,44	5718	28000	20,42 %
Campo magnético ($\mu A/m$)	7107,27	15167,11	73000	20,78 %
Densidade de Potência ($\mu W/m^2$)	22687,42	86725,53	2000000	4,34 %
Razão de Exposição	0,01091	0,04170	1	4,17 %

Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 20 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona 04.

Ponto	Latitude	Longitude	E (mV/m)	H (μ A/m)	S (μ W/m ²)	ER
P165	-5,170385°	-37,350257°	5718	15167,11	86725,53	0,04170
P192	-5,167365°	-37,366925°	5650	14986,74	84675,07	0,04071
P176	-5,170516°	-37,364935°	5213	13827,59	72083,21	0,03466
P190	-5,154741°	-37,362656°	5032	13347,48	67164,52	0,03229
P160	-5,170644°	-37,347788°	4574	12132,63	55494,63	0,02668

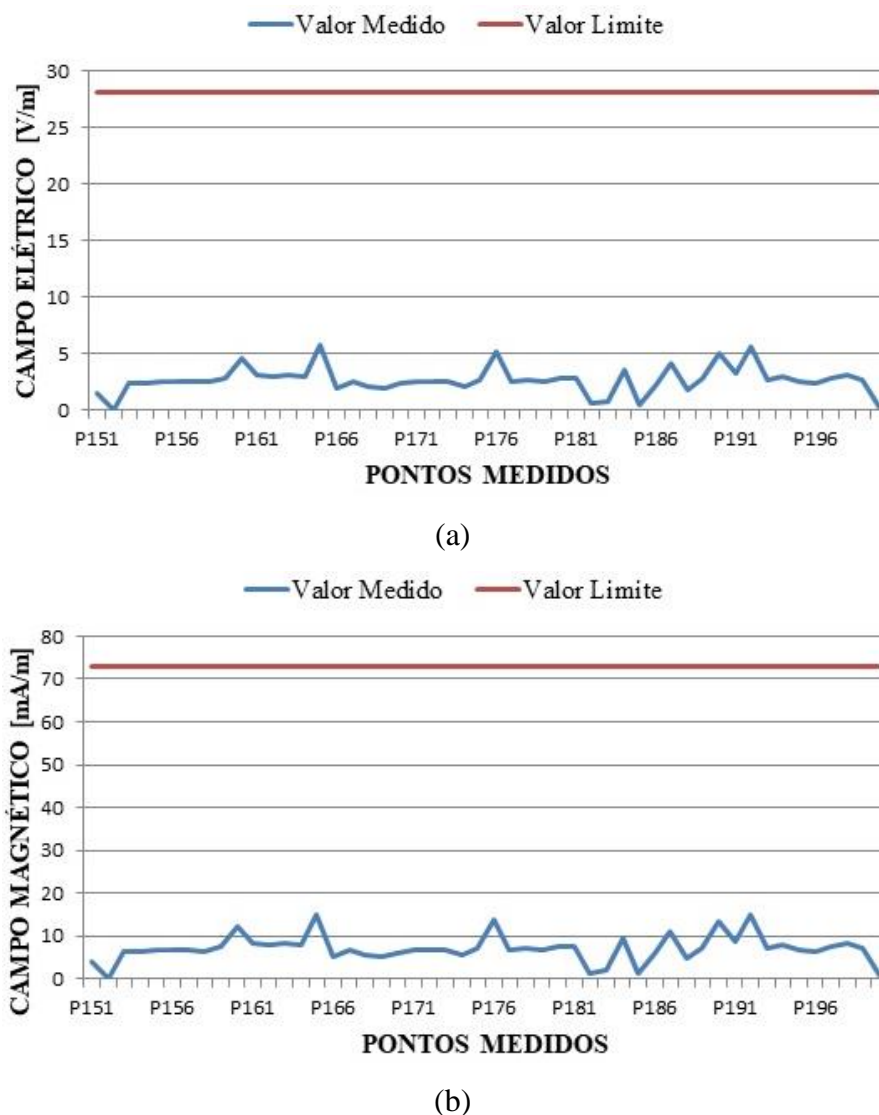
Fonte: Autoria própria, 2017.

Através da análise dos dados presentes nas Tabelas 18 e 19, nota-se que a Zona 04 é a região que está exposta aos maiores níveis de radiação eletromagnética dentre as quatro áreas avaliadas. Dos 10 pontos onde foram medidos as maiores intensidades dos campos eletromagnéticos, 8 estão localizados na Zona 04, além de nessa região estarem presentes os 6 maiores valores das medições.

Esse fato pode ser explicado pela grande quantidade de estações de rádio base presentes nessa região, 25 torres, fazendo com que essa zona seja a área com a maior quantidade de torres quando comparadas com as outras três. Outro fato que contribui para essa região ser a área mais exposta à radiação eletromagnética é que esse local é basicamente composto por pequenas residências, não havendo a presença de grandes construções que atenuem de maneira significativa os sinais gerados pelas torres de telecomunicações em suas proximidades.

Entretanto, mesmo sendo a área que apresentou os maiores níveis de radiação, essa região, assim como as outras, está dentro dos limites de exposição estabelecidos pelas principais normas nacionais e internacionais. A variação dos valores medidos de intensidade de campo elétrico e campo magnético nos 50 pontos da Zona 04 pode ser vista na Figura 39.

Figura 39 – Variação dos valores medidos na Zona 04: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.

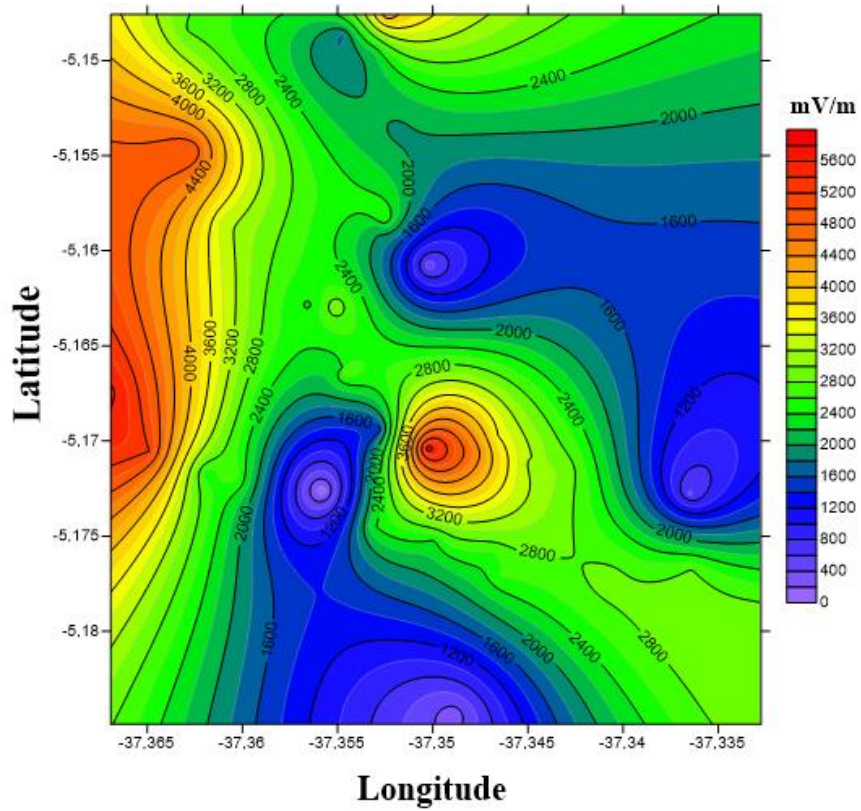


Fonte: Autoria própria, 2017.

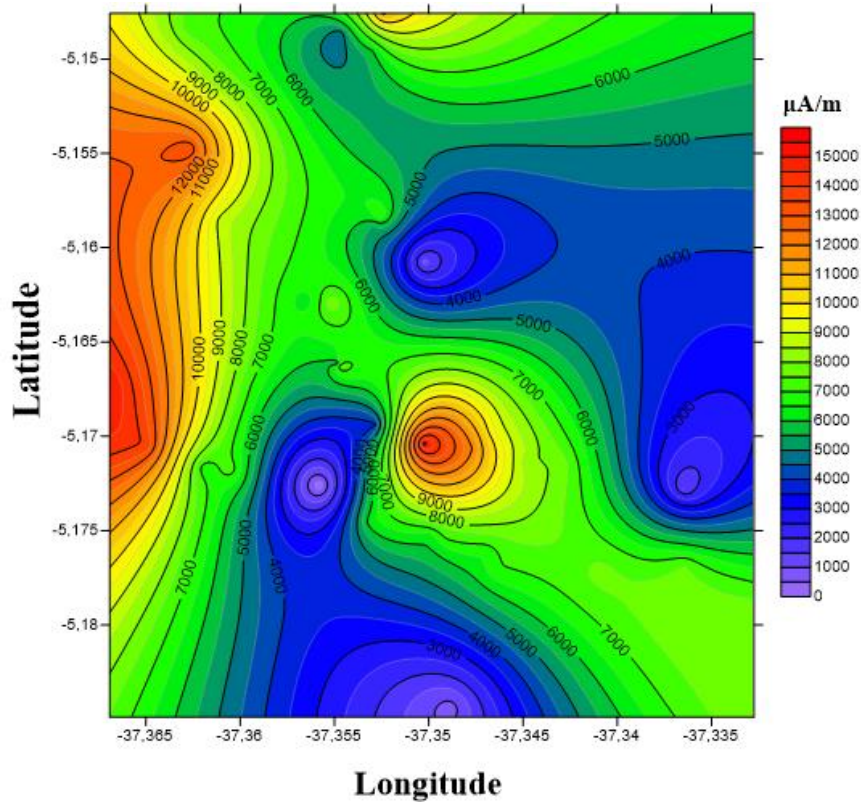
Observando a variação dos valores medidos mostrados nas Figuras 39.a, para campo elétrico, e 39.b, para campo magnético e, comparando-as com as Figuras 33, 35 e 37 que representam a variação dos valores medidos nas Zonas 01, 02 e 03 respectivamente, é possível observar que os pontos onde os maiores valores foram medidos estão concentrados na Zona 04, o que explica porque essa área possui a maior média dentro as quatro zonas avaliadas.

Através da aplicação do método da krigagem ao conjunto de dados da Zona 04, foram geradas as superfícies que representam como os campos eletromagnéticos se distribuem espacialmente nessa região. A Figura 40 ilustra essa distribuição.

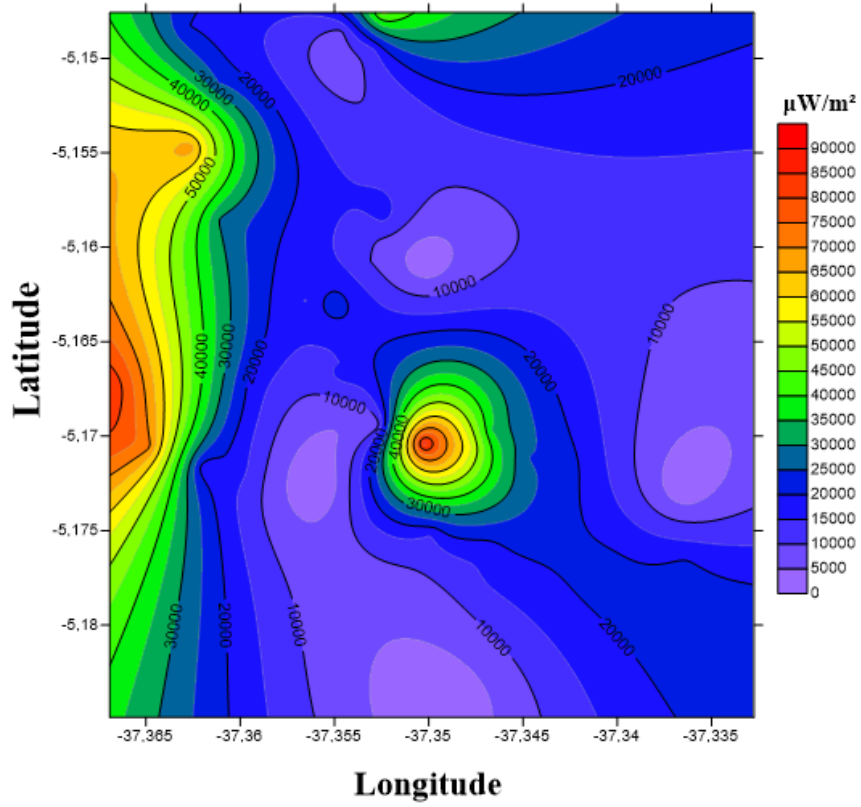
Figura 40 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona 04: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.



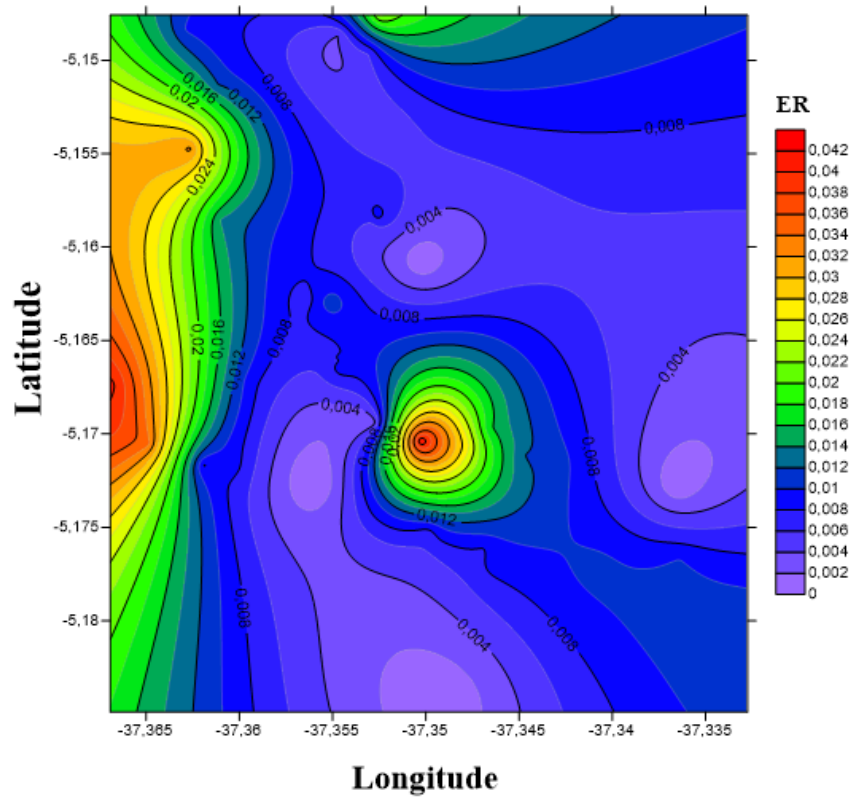
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

Observando o comportamento dessas superfícies é possível visualizar que existem duas regiões expostas ao maior nível de radiação centradas nos pontos P165 e P192. O ponto P165 está localizado próximo ao centroide da Zona 04, enquanto que o ponto P192 está localizado na fronteira da zona de análise no ponto médio entre duas estações de rádio base.

4.5 ZONA URBANA

Agrupando os dados obtidos separadamente em cada uma das quatro zonas de análise é possível visualizar como os campos eletromagnéticos estão distribuídos por toda a região urbana da cidade em função da localização das estações de rádio base e de radiodifusão, além da obtenção de seus principais parâmetros estatísticos.

A Tabela 21 mostra os principais parâmetros estatísticos obtidos dessa análise, enquanto que a Tabela 22 apresenta os pontos onde os maiores valores foram medidos.

Tabela 21 - Parâmetros estatísticos referentes às medições de campos eletromagnéticos na Zona urbana.

Grandeza	Valor médio	Valor máximo	Valor limite	Percentual do valor máximo referente ao limite de exposição
Campo elétrico (mV/m)	1711,47	5718	28000	20,42 %
Campo magnético ($\mu A/m$)	4540,79	15167,11	73000	20,78 %
Densidade de Potência ($\mu W/m^2$)	12119,20	86725,53	2000000	4,34 %
Razão de Exposição	0,00581	0,04170	1	4,17 %

Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 22 - Pontos expostos a maior intensidade dos campos eletromagnéticos na Zona urbana.

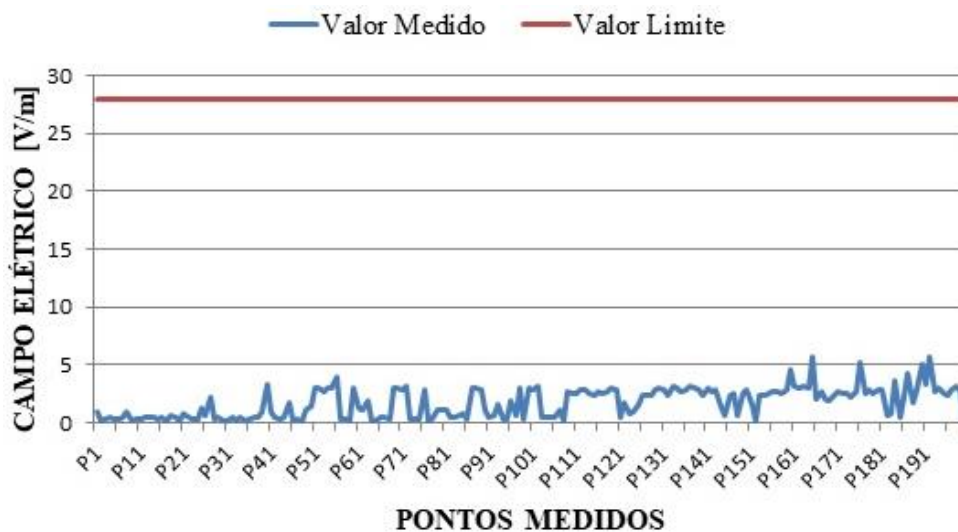
Ponto	Latitude	Longitude	E (mV/m)	H ($\mu A/m$)	S ($\mu W/m^2$)	ER
P165	-5,170385°	-37,350257°	5718	15167,11	86725,53	0,04170
P192	-5,167365°	-37,366925°	5650	14986,74	84675,07	0,04071
P176	-5,170516°	-37,364935°	5213	13827,59	72083,21	0,03466
P190	-5,154741°	-37,362656°	5032	13347,48	67164,52	0,03229
P160	-5,170644°	-37,347788°	4574	12132,63	55494,63	0,02668

Fonte: Autoria própria, 2017.

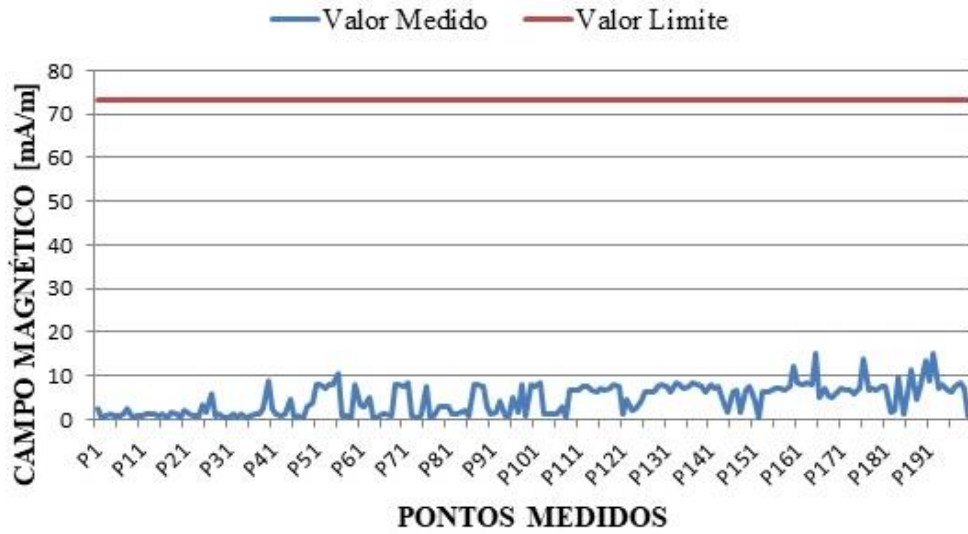
Através da análise dos dados presentes nas Tabelas 20 e 21 é possível notar que todos os valores medidos nos 200 pontos estão abaixo dos limites estabelecidos por norma que, para a faixa de frequência analisada nesse trabalho de 10 MHz a 8 GHz, são de 28000 mV/m para intensidade de campo elétrico, 73000 $\mu A/m$ para intensidade de campo magnético, 2000000 $\mu W/m^2$ para densidade de potência e 1 para a razão de exposição a campo elétrico .

Também é possível perceber que os maiores valores medidos estão localizados na Zona 04 que é caracterizada como a região exposta ao maior nível de radiação eletromagnética. Essa característica pode ser visualizada na Figura 41 que mostra a variação dos valores medidos de intensidade de campo elétrico e campo magnético na Zona urbana.

Figura 41 - Variação dos valores medidos na Zona urbana: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético.



(a)



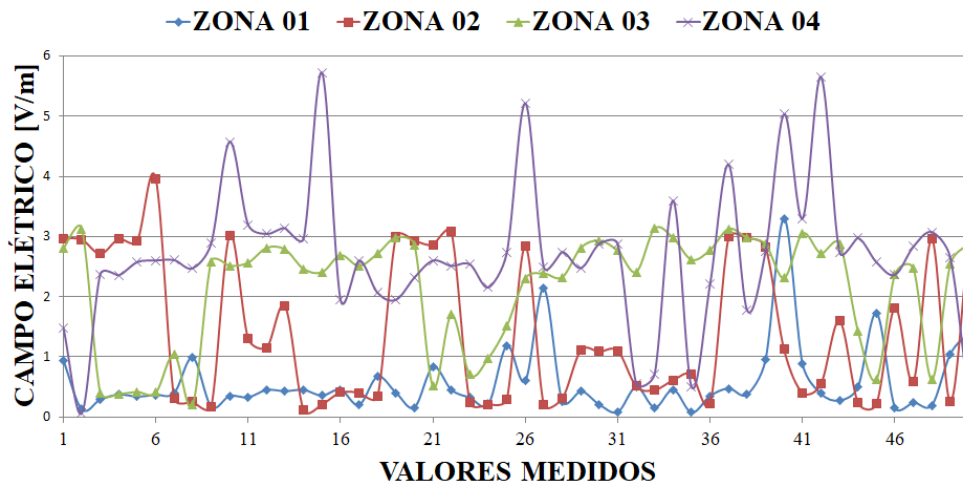
(b)

Fonte: Autoria própria, 2017.

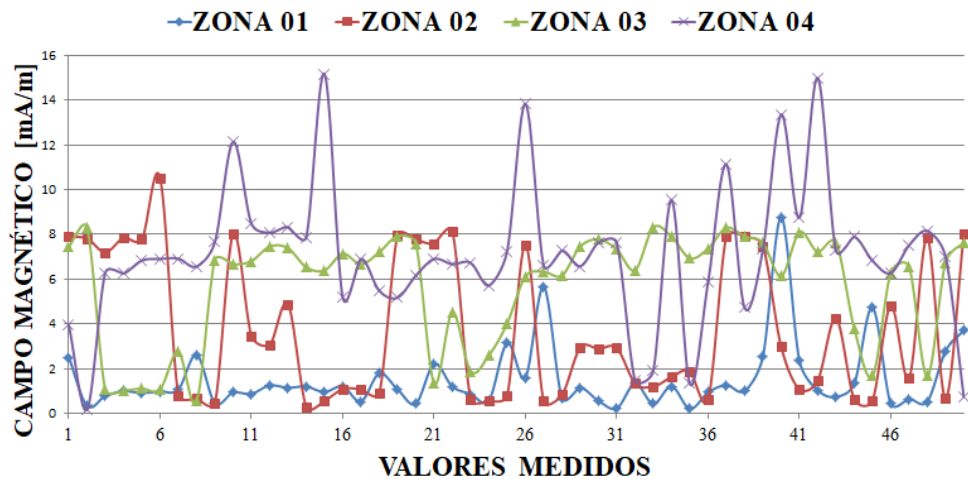
Observando as Figuras 41.a e 41.b é possível notar que os maiores valores medidos estão concentrados após a indicação do ponto P151, o que indica que esses pontos estão localizados na Zona 04 e que, os menores valores medidos estão concentrados entre os pontos P1 e P50, ou seja, são pontos que estão localizados na Zona 01 da cidade, indicando que essa região é a área que está exposta ao menor nível de radiação na faixa de frequência de 10 MHz a 8 GHz em toda a região urbana de Mossoró.

A Figura 42 mostra um comparativo entre os valores medidos para campo elétrico, campo magnético e densidade de potência em cada uma das quatro zonas analisadas.

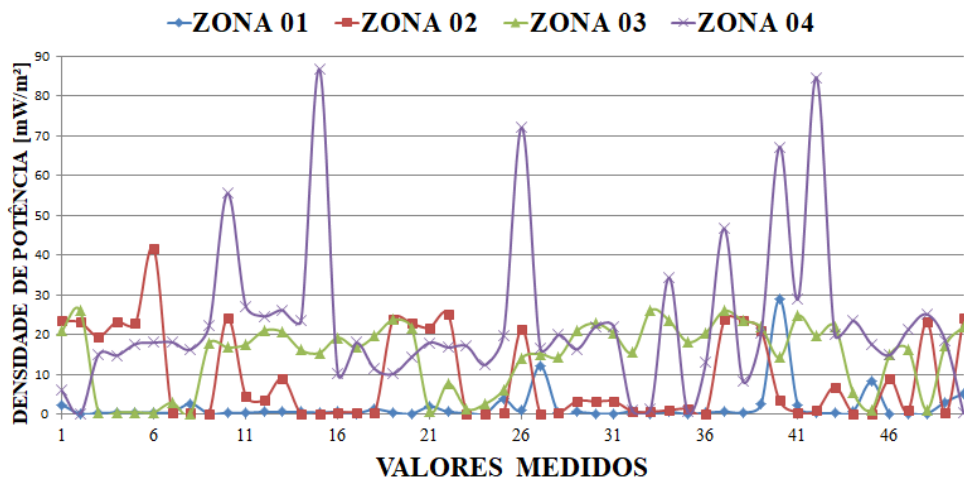
Figura 42 - Comparação entre os valores medidos nas quatro zonas de análise: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência.



(a)



(b)



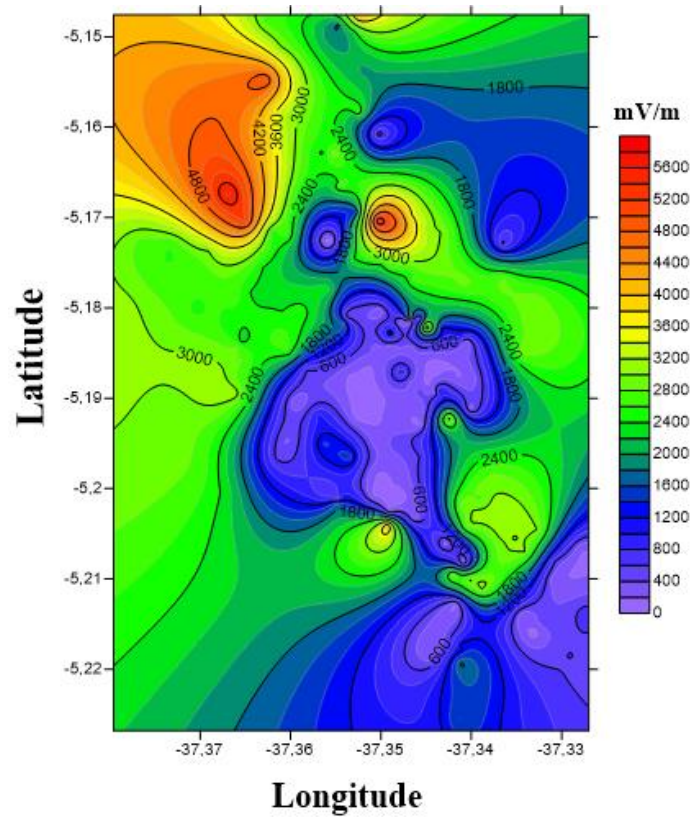
(c)

Fonte: Autoria própria, 2017.

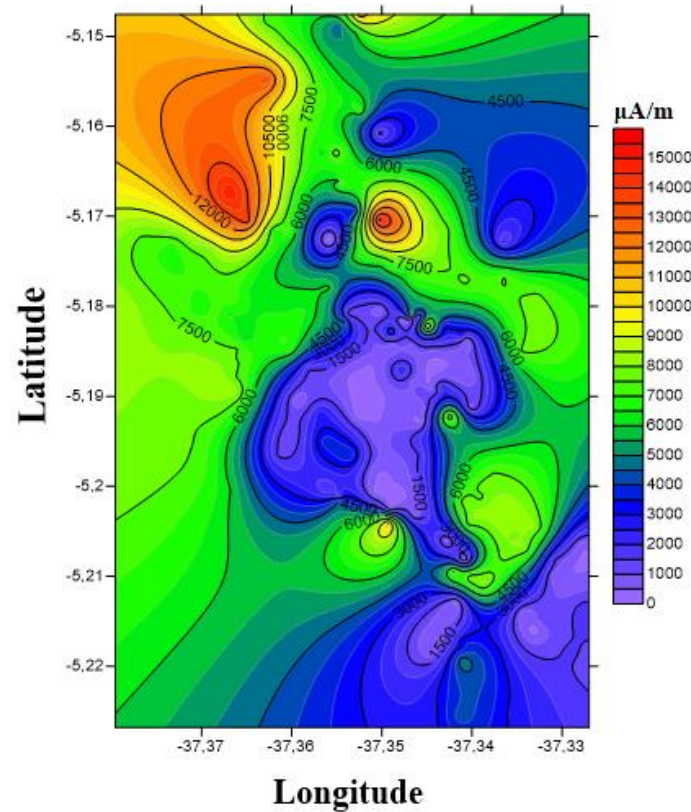
Analisando o comportamento das Figuras 42.a, 42.b e 42.c é possível notar que a Zona 04 é a região que apresenta os índices mais elevados, se destacando das demais áreas, principalmente quando compara-se os valores para a densidade de potência. Também é possível notar que a Zona 03 apresenta a menor variação entre os valores medidos, característica esta que pode ser observada por uma menor oscilação nas curvas que a representam.

Aplicando o método de interpolação da krigagem aos 200 pontos medidos para estimar o valor das grandezas analisadas em locais não amostrados, foram geradas as superfícies que representam de modo mais satisfatório a distribuição espacial dos campos eletromagnéticos nessa região. A Figura 43 mostra essa distribuição.

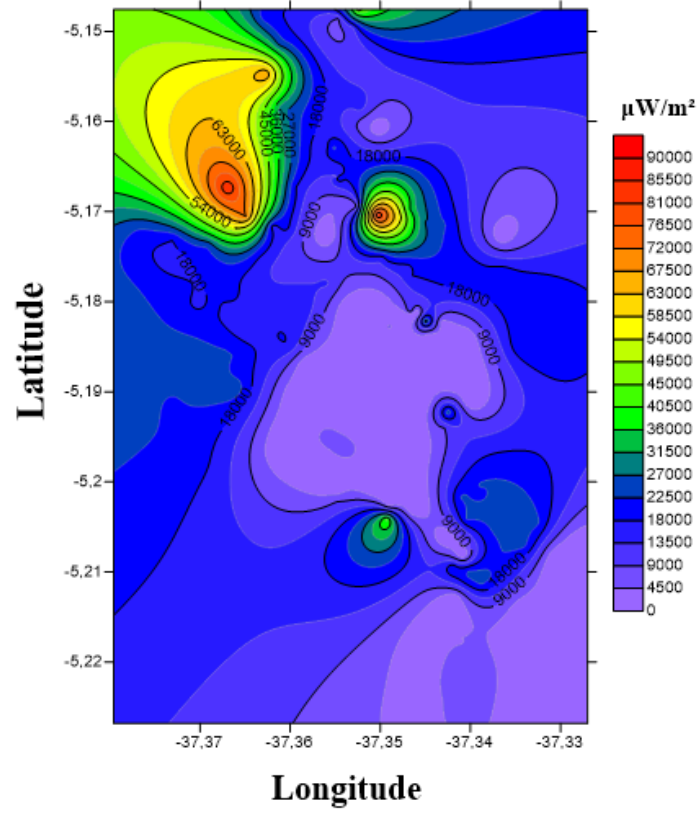
Figura 43 - Distribuição espacial das grandezas eletromagnéticas na Zona urbana: (a) Campo elétrico; (b) Campo magnético; (c) Densidade de potência; (d) Razão de exposição.



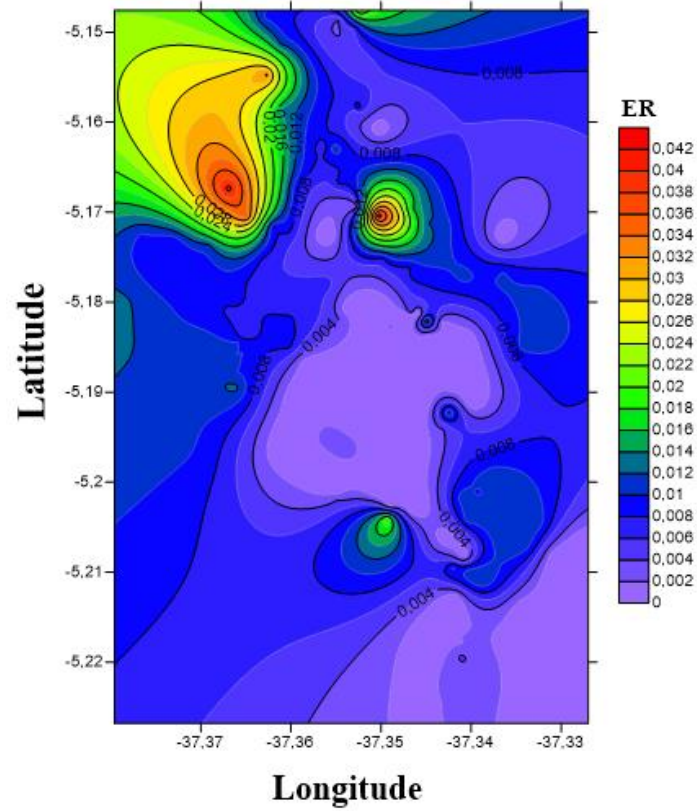
(a)



(b)



(c)



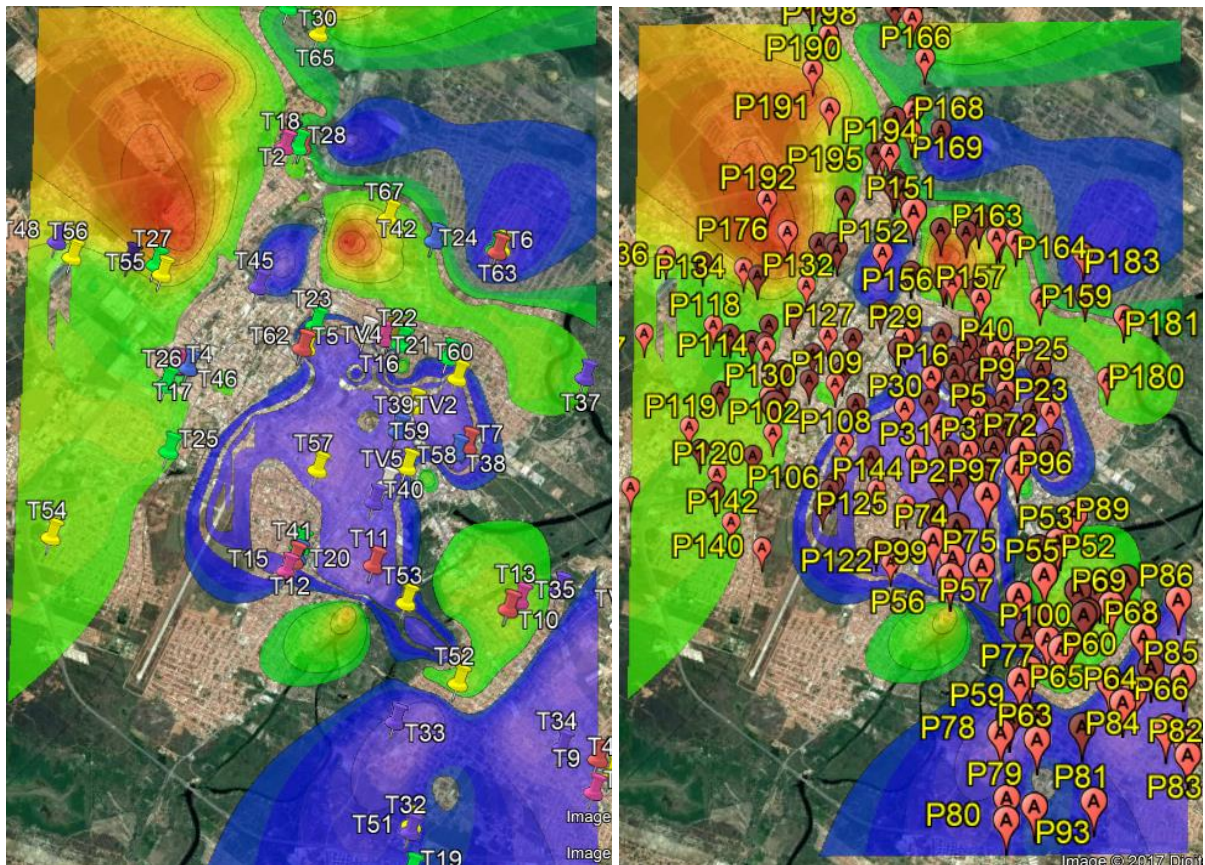
(d)

Fonte: Autoria própria, 2017.

Em cada uma das Figuras 43, as regiões de coloração avermelhada indicam os maiores valores medidos e as regiões de cor azul representam as áreas com os menores valores medidos. A área de coloração vermelha mais forte indica os pontos pertencentes à Zona 04, enquanto que a região de coloração mais azulada indica os pontos pertencentes, principalmente, a Zona 01.

Outra forma de se analisar espacialmente o comportamento dessas grandezas é visualizá-las baseando-se na localização das estações de rádio base, nas estações de radiodifusão existentes na região de análise e nos pontos de medição como mostram as Figuras 44.a e 44.b.

Figura 44 - Distribuição espacial do campo elétrico: (a) em função da localização das estações de radiodifusão e rádio base; (b) em função da localização dos pontos de medição.



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de *Google Earth*®, 2017.

Analisando as Figuras 44.a e 44.b é possível observar que a localidade exposta a maior intensidade de campo elétrico corresponde a uma região mais afastada da cidade onde não há

uma grande presença de edifícios e construções que afetem a propagação desses campos, além de ser uma área cercada por várias torres de telefonia.

Por outro lado, uma das regiões com a menor intensidade registrada de campo elétrico foi a zona central da cidade que, mesmo possuindo uma grande quantidade de torres de telefonia em sua vizinhança, devido a grande concentração de construções faz com que a maior parte desses campos sejam dispersados e apresentem valores muito baixos a 1.5 m do solo.

5 CONCLUSÕES

Para a realização desse trabalho, primeiramente foi necessário o conhecimento da região onde seria feita a análise dos níveis de radiação eletromagnética, para isso foi feita a identificação e localização das principais fontes de emissão de poluição eletromagnética na faixa de 10 MHz a 8 GHz que são as torres de radiodifusão e rádio base espalhadas por todas as regiões da cidade.

Com a localização georreferenciada dessas torres foi possível criar subzonas de análise na qual foram escolhidos pontos específicos para a realização dessas medições. Os pontos foram determinados baseando-se na distância média entre as torres e o ponto central de cada uma dessas áreas, desse modo 200 pontos foram selecionados espalhados pela região urbana da cidade.

A campanha de medição foi realizada com um medidor modelo Tenmars TM-196 seguindo metodologia proposta pela ANATEL através de sua resolução 303 de 2002, onde em cada um dos 200 pontos foi obtido o valor médio das grandezas analisadas no intervalo de 6 minutos.

Com os valores medidos nesses pontos, determinou-se, através da técnica de validação cruzada, qual método de interpolação krigagem apresentou resultados mais satisfatórios para estimar o valor dessas grandezas em localidades não medidas para que assim, pudesse ser criada uma superfície que representasse espacialmente como esses campos se distribuem pela região de análise. Essas superfícies foram criadas com o auxílio do software GOLDEN SURFER[®].

Desse modo, ao final desse trabalho, foi possível constatar que mesmo nas áreas mais expostas à radiação eletromagnética, esses valores ainda estão muito abaixo dos limites estabelecidos pelos órgãos regulamentadores tanto nacionais quanto internacionais, o que faz com que essa região não ofereça riscos às pessoas que convivem nesse local devido a poluição eletromagnética.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado no trabalho desenvolvido, algumas recomendações são necessárias para a realização de trabalhos futuros, sendo as principais:

- Utilizar um equipamento capaz de separar os valores medidos em função da frequência;
- Determinar separadamente a influência de cada uma das fontes de poluição eletromagnética presentes na região de análise;
- Realizar as medições dentro de ambientes como escolas e hospitais e avaliar como esses campos interagem com as pessoas dentro dessas localidades;
- Calcular através de modelos de propagação valores teóricos para a intensidade dos campos eletromagnéticos e comparar com os valores medidos;

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Resolução 303: Regulamenta o Limite de Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequência entre 9 kHz e 300 GHz.** Brasil, 02 de julho de 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil.** Brasil, 14 de abril de 2012.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** 2ª ed. Porto Alegre: Unisinos, 2005.

AZPURUA, M.; DOS RAMOS, K. **A Comparison of Spatial Interpolation Methods for Estimation of Average Electromagnetic Field Magnitude.** Progress In Electromagnetic Research M, Vol. 14, Iss. 14, p. 135 – 145. 2010.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design.** 3ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

BERNHART, J. H. **Non-ionizing Radiation Safety: Radiofrequency radiation, electric and magnetic fields.** Physics on Medicine and Biology, Vol. 37, Iss. 4, p. 807-844, 1992.

BRASIL. Lei nº 9.742, de 16 de julho de 1997. **Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF, 17 jul. 1997. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9472.htm>. Acesso em: 03 out. 2017.

BRONZINO, J. D. **Biologic Effects of Non-ionizing Electromagnetic Fields: The Biomedical Engineering Handbook.** In: CRC Press & IEEE Press, p. 1388-1389, 1995.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford: Clarendon Press, 1986.

CARVALHO, A. G.; BADINHAN, L. F. C. **Apostila de Telecomunicações**. Volume 5, Centro Paula Souza: São Paulo, 2011.

CASTILHO, S. D. **Ferramenta de Simulação Computacional de Canal de Propagação em Ambiente Celular Baseado em Modelos Geométricos Estatísticos**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da USP, São Paulo. 2006.

COATES, P. J.; LORIMORE, S. A.; WRIGHT, E. G. **Damaging and protective cell signalling in the untargeted effects of ionizing radiation**. Mutation Research, Vol. 568, p. 5-20, 2004.

CRUZ, S. C. **Verificação dos Níveis de Radiação Emitido pelas Antenas das ERBs e a Percepção das Comunidades Próximas**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC, Rio de Janeiro, 2005.

DALLA'ROSA, A. **Mapeamento Eletromagnético de Ambientes Através do Método da Modelagem por Linhas de Transmissão – TLM**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, Florianópolis, 2003.

European Cooperative in the Field of Science and Technical Research (EURO-COST 231). **Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz bands**. Rev. 2, 1991.

FASSHAUER, G. E. **Meshfree Approximation Methods with MATLAB**. 1ª ed. Singapura, 2007.

GALLARDO, A. **Geostatística**. Ecosistemas, Vol. 15, Iss. 3, p. 1 – 11. 2006.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A. de.; CECÍLIO, R. A. **Análise de Técnicas de Interpolação para Espacialização da Precipitação Pluvial na Bacia do rio Itapemirim (ES)**. Ambiência Guarapuava, Vol. 8, Iss. 1, p. 61 – 71. 2012.

GARMIN INTERNATIONAL Inc. **Manual do Utilizador**. Série GPSMAP®. United States, 2010.

HATA, M. **Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services**. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 29. Iss. 3. p. 317 – 325, 1980.

HAYT JUNIOR, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HUISMAN, O.; BY, J. A. de. **Principles of Geographic Information Systems**. 4ª ed. Enschede: ITC, 2009.

IBRANI, M.; AHMA, L.; HAMITI, E. **Assessment of the exposure of children to electromagnetic fields from wireless communication devices in home environments**. IET Communications, Vol. 8, Iss. 12, p. 2222 – 2228. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. 2010. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=240800>>. Acesso em 10 de outubro de 2017.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). **Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz – 300 GHz)**. Review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz – 300 GHz). 2009.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). **Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)**. Health Phys, Vol. 74, Iss. 4, p. 494 – 522, 1998.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). **Publications**. 2017. Disponível em: <<http://www.icnirp.org/en/publications/index.html>>. Acesso em: 03 out. 2017.

International Telecommunication Union (ITU). **Recommendation ITU – T K.61: Guidance on measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations.** Geneva, 2008.

International Telecommunication Union (ITU). **Recommendation ITU – T K.100: Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service.** Geneva, 2014.

JIMENEZ, K. Q.; DOMECCQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação.** Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

KAMINSKA, A. GRZYWNA, A. **Comparison of deterministic interpolation methods for the estimation of groundwater level.** Journal of Ecological Engineering, Vol. 15, Iss. 4, p. 55-60, 2014.

LENNON, J. J.; TURNER, J. R. G. **Predicting the spatial distribution of climate: Temperature in Great Britain.** Journal of Animal Ecology, Vol. 64, Iss. 3, p. 370 – 392. 1995.

LEWICKI, F. **Comparison between measurement and calculations – EMF – Estimator.** ITU-T Technical Session on EMF, Geneva, 2009.

LIN, J. C. **Electromagnetical Fields in Biological System.** CRC Press; 2011

LINHARES, A.; TERADA, M. A. B.; SOARES, A. J. M. **Estimating the Location of Maximum Exposure to Electromagnetic Fields Associated with a Radiocommunication Station.** Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 12, Iss. 1, 2013.

LINHARES, A.; SOARES, A. J. M.; TERADA, M. A. B. **Determination of Measurement Points in Urban Environments for Assessment of Maximum Exposure to EMF Associated with a Base Station.** International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2014, Iss. 2014, 2014.

LOPES, A. A. **Cálculo da Distribuição de Campo Elétrico e Indução Magnética em Subestações de Energia e Linhas de Transmissão.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE. Recife, 2009.

LOPES, J. C. R.; MELO, C. de.; BARTHUS, V. N. **Medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos.** EM – Eletricidade Moderna. Vol. 399, p. 40 – 54, 2007.

LOPES NETTO, A.; AZEVEDO, M. A. A. **Radiações Não Ionizantes.** 2005. Disponível em: <<http://www.sobes.org.br/figuras/radnaoio.pdf>>. Acesso em 03 de outubro de 2017.

LOW, K. **Comparison of Urban Propagation Models with CW Measurements.** In: IEEE Vehicular Technology Sociep 42nd VTS Conference. Frontiers of Technology from Pioneers to the 21st Century. Vol. 2, p. 936 – 942, 1992.

LUO, W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. **A Comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales.** International Journal of Climatology, Vol. 28, p. 947 – 959. 2008.

MARTINS, V. G. **Medição de Campos Eletromagnéticos em Alta Frequência (100 kHz a 3 GHz) gerados por Equipamentos Eletro-eletrônicos Visando Segurança Pessoal.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2000.

MCREE, D. I. **Review of Soviet/Eastern European Research on Health Aspects of Microwaves Radiation.** Bull NY, p. 1133 – 1151, 1979.

MESQUITA, M. A. S. B. **Avaliação Mutagênica em Cirurgiões Dentistas Expostos Ocupacionalmente à Radiação Ionizante.** Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Farmacologia do Departamento de Fisiologia e Farmacologia da UFC, Fortaleza, 2011.

MIRO, L.; DE SEZE, R. **Critical Study of the Present Standarization in the Radio Frequency Range.** In: Proceedings of the VII COST 244 Workshop on Standards. 1996.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª ed. São José dos Campos: Blucher. 2011.

OKUMURA, T.; OHMORI, E.; FUKUDA, K. **Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service**. Review Electrical Communication Laboratory. Vol. 16. p. 825 – 873, 1968.

ORR, M. J. L. **Introduction to Radial Basis Function Networks**, Edimburgo, 1996.

PARAJULI, P. **Measurement of the Electromagnetic Field (EMF) Radiated from the Cell Phone Towers in Kathmandu District**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa Pós-Graduação em Física da University of Texas, San Antonio, 2014.

PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2th ed. London: Wiley, 2000.

PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros com Aplicações**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

PEREIRA, M. A. B. **Análise de Modelos de Propagação na Área Urbana da Região de Curitiba – PR na Faixa de Frequência de 1800 MHz**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações da UFPR, Curitiba, 2007.

PEREIRA, S. D. D. **Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas em Ambientes Urbanos**. Dissertação de mestrado apresentada Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do IST, Lisboa, 2014.

PINHEIRO, F. S. R. **Emissão de Radiação Eletromagnética Não Ionizante na Cidade do Natal: Avaliação e Modelamento com Base na Intensidade do Campo Elétrico e Taxa de Exposição**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde da UFRN. Natal, 2015.

PINHEIRO, F. S. R.; MARANHÃO, T. M. O.; BERNARDO FILHO, M.; RODRIGUEZ, M. E. C.; SILVA, G. S.; SOUSA, T. P.; SANCHIS, M. A. B.; CAMARA, A. L. S.; GONÇALO, J. P. S; BRAGA, A. A. C. C. **Assessment of non-ionizing radiation from radio frequency energy emitters in the urban area of Natal City, Brazil.** Scientific Research and Essays, Vol. 10, Iss. 2, p. 79 – 85, 2015.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering.** 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2012.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas.** 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

RODRIGUEZ, C. E. F. **Efeitos Biológicos das Radiações de Rádio Frequências de Telefonia Celular – Simulação FDTD.** Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS, Porto Alegre, 2001.

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

SALLES, A. A. A. de. **Biological Effects of Microwaves and RF.** In: 1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC, 1999). 1999.

SALLES, A. A. de.; FERNÁNDEZ, C. R.; BONADIMAN, M. **Simulação da SAR na cabeça e antenas planares para telefone móveis.** Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, Vol. 19, Iss. 2, p. 77–90, 2003.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de Atributos de solo e de crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP.** Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da USP, Piracicaba, 1996.

SANTANA, T. A. A. de.; ANDRADE, H. D. de.; QUEIROZ JÚNIOR, I. S.; SILVA, I. B. T. da. **Comparison of spatial interpolation methods to determine exposure ratio to electric fields in urban environments.** Electronics Letters, Vol. 53, Iss. 18, p. 1250–1252, 2017

SANTAREM, E. W. P. **Poluição Ambiental dos Campos Eletromagnéticos de Estações de Rádio, Televisão e Estações de Radiobase da Telefonia Celular em Manaus, AM.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da UFAM, Manaus, 2012.

SILVA, H. M. O. da. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Estudo sobre Compatibilidade Eletromagnética.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFC. Fortaleza, 2012.

SOUZA FILHO, A. L. **Contribuições ao Estudo da Exposição Humana a Campos Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências.**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNB. Brasília, 2015.

TENMARS ELECTRONICS Co. Ltd. **User's Manual.** Tenmars (TM-196). Taiwan, 2009.

TENÓRIO, B. C. **Exposição Humana aos Níveis de Radiações Não Ionizantes Emitidas pelas Estações Rádio Base.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFSC, Florianópolis, 2015.

VALBERG, P. A. **Mechanistic Viewpoint on the Health Implications.** In: Proceedings International Workshop on Base Stations and Wireless Networks: Exposures and Health Consequences, 2005.

VALENTE JÚNIOR, W. **Avaliação do Ambiente Eletromagnético em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, Florianópolis, 2006.

WALFISCH, J.; BERTONI, H. L. **A theoretical model of UHF propagation in urban environments.** IEEE Transactions on Antennas Propagation, Vol. 36, p. 1788-1796, 1988.

WENTWORTH, S. M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia.** 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

WONG, S. M.; HON, Y. C.; GOLBERG, M. A. **Compactly supported radial basis functions for shallow water equations.** Applied Mathematics and Computation, Vol. 127, Iss. 1. p. 79-101, 2002.

WOLLINGER, P. R. **Estudo dos Níveis de Radiação Eletromagnética em Ambiente Urbano.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, Florianópolis, 2003.

World Health Organization (WHO). **Establishing a Dialogue on Risks from Electromagnetic Fields.** 2002. Disponível em: < <http://www.who.int/peh-emf/publications/riskenglish/en/index.html>>. Acesso em 03 de outubro de 2017.

World Health Organization (WHO). **Electromagnetic Fields and Public Health: Base Station and Wireless Technologies.** 2006. Disponível em: <<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs/304>>. Acesso em 10 de outubro de 2017.

ZONETE, M. C. C. **Avaliação do uso de Técnicas de Interpolação para estimativa de Volume em Florestas Clonais de Eucalyptus sp.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais da USP. Piracicaba, 2009.