

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

LUIZ FELIPE VELHO

**ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DA OCUPAÇÃO URBANA
NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

2014

LUIZ FELIPE VELHO

**ANÁLISE DA DINÂMICA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DA
OCUPAÇÃO URBANA NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE**

Tese de Doutorado apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Sensoriamento Remoto pelo Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ORIENTADORA:

Prof.^a Dr.^a Eliana Lima da Fonseca

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Denise Cybis Fontana

Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino

Prof.^a Dr.^a Renata Dias Silveira

Porto Alegre

2014

CIP - Catalogação na Publicação

Velho, Luiz Felipe

Análise da temperatura de superfície da ocupação urbana no município de Porto Alegre / Luiz Felipe Velho. -- 2014.

116 f.

Orientadora: Eliana Lima da Fonseca.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Sensoriamento Remoto urbano. 2. Clima urbano. 3. Ocupação urbana. 4. Infravermelho termal. 5. Modelo linear de mistura espectral. I. Fonseca, Eliana Lima da, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Rosa Velho (in memoriam), pois sem seu apoio incondicional e a sua dedicação em não me deixar desistir, seria impossível chegar ao final desta etapa.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz Oscar e Maria Rosa (*in memoriam*), e a minha irmã, Rochéle, pelo apoio e pelo incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica.

À Prof.^a Dr.^a Eliana Lima da Fonseca, minha orientadora, que me deu a oportunidade de trabalhar com assuntos totalmente novos para mim.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR), pela oportunidade de realização da minha qualificação profissional. Agradeço, também, aos professores, funcionários e estagiários do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) e do PPGSR pelo conhecimento adquirido e pela atenção dada às solicitações, às matrículas e aos demais processos do curso.

Ao Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões e ao Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino, por me acolherem de forma tão generosa no Centro Polar e Climático (CPC/UFRGS). O apoio e a atenção de vocês foram fundamentais na elaboração e na finalização desta tese.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) pela concessão do afastamento para estudos. O afastamento foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Ao IFRS – Câmpus Porto Alegre, em especial aos meus colegas da Área Acadêmica de Ciências Ambientais e Biológicas, por compreenderem minha dupla jornada e me apoiarem nas tarefas institucionais e nos encargos didáticos. Um obrigado especial ao Prof. Dr. Telmo Ojeda, meu colega e amigo, que assumiu a coordenação do Curso Técnico em Meio Ambiente para que eu pudesse me dedicar ao doutorado.

Aos alunos dos cursos Técnico em Meio Ambiente e Tecnologia em Gestão Ambiental, do IFRS – Câmpus Porto Alegre, que foram compreensivos durante minha saída, em pleno período letivo, para o afastamento para estudos.

À Prefeitura Municipal de Porto Alegre, pela cedência dos dados da varredura laser. Um agradecimento especial aos Engenheiros Cartógrafos Christiane Silva Salomoni e Tiago Rutsatz Salomoni, pela atenção dada à solicitação feita para a Prefeitura.

Aos queridos colegas e amigos do CPC/UFRGS pelo ombro amigo, pelas conversas, pelo café, pelo carinho, pelas risadas, pela colaboração nos trabalhos. Ana Maria Sanches, André Medeiros, Carina Petsch, Carolina Simões, Claudia Uchoa, Enoil Júnior, Flávia Moraes, Franciele Schwanck, Paola Costa, Pedro Valente e Venisse Schossler: vocês foram incríveis nessa reta final. Sem a energia boa de todos, eu não teria finalizado este trabalho.

Aos meus amigos, que me apoiaram de forma comovente neste último um ano e meio. O falecimento da minha mãe foi bastante difícil de ser superado, mas a dedicação diária de vocês valeu a pena. Meu obrigado aos queridos Lisiane Santos e João Naujorks, Sabrina Couto da Silva, Claudia Wyrvalski, Luzardo Breyer, Ingrid Linck Rosenhaim, Patrícia Scalco, Ramiro Goulart, Renata Beck, Aline Tigre, Aline Bona, Eleonora Spinato, Ana Springer, Roberto Springer e Andrea Cury Marques.

À canina Carlota, que me acompanhou nas madrugadas de estudo e de processamento de imagens. Uma pena que não foi possível comemorar o final dessa etapa juntos, mas foi incrível a parceria para passeios e estudos.

RESUMO

A urbanização modifica a superfície, promovendo a troca da cobertura natural por materiais de construção. As áreas urbanas, além do solo impermeável, têm a presença de edifícios, que alteram a rugosidade da superfície, a velocidade e a direção dos ventos e provocam o sombreamento da superfície, bloqueando a incidência da energia solar. Assim, analisar a geometria de ocupação da cidade é importante para o entendimento do clima urbano e para o planejamento da cidade. O sensoriamento remoto é uma importante forma de obtenção de informações das áreas urbanas, contudo é preciso considerar a heterogeneidade deste ambiente e a mistura espectral existente nos dados satelitais. Dessa forma, o modelo linear de mistura espectral apresenta-se como importante método de extração de informações dos ambientes urbanos. O objetivo deste trabalho é identificar áreas com padrão horizontal e com padrão vertical de ocupação urbana, em Porto Alegre, e relacionar essa característica geométrica com valores de temperatura de superfície. Para tanto, imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, adquiridas entre 1984 e 2009 foram utilizadas, bem como dados censitários, dados meteorológicos e modelos gerados por varredura laser. A partir das imagens TM foram geradas três imagens fração: solo, sombra e vegetação. A fração solo foi utilizada na identificação de áreas de ocupação horizontal e de expansão urbana, e a fração sombra foi utilizada na identificação de áreas verticalizadas. Utilizando as mesmas imagens, obtiveram-se os valores de temperatura de superfície. As áreas com ocupação horizontal, caracterizadas por moradias em casas, apresentaram baixos valores de sombra e altos valores de solo. As áreas verticalizadas apresentaram altos valores de sombra e baixos valores de solo. Os resultados extraídos das imagens fração têm similaridade com dados de artigos científicos e com os dados da varredura laser. A temperatura de superfície, em Porto Alegre, mostrou forte correlação com dados meteorológicos, e se caracteriza por valores mais altos nas áreas urbanizadas e mais baixos onde a ocupação é rarefeita. Nas áreas urbanizadas, maiores valores de temperatura de superfície são encontrados nas regiões com padrão de ocupação horizontal, enquanto os menores valores são encontrados nas regiões verticalizadas. A metodologia escolhida gerou resultados compatíveis com outros dados de uso e ocupação do solo, provenientes de diferentes fontes, e contribui com características da área urbana e do clima urbano da cidade de Porto Alegre, informações essas escassas nos principais bancos de dados acadêmicos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto urbano, modelo linear de mistura espectral, Porto Alegre, clima urbano, expansão urbana.

ABSTRACT

The urbanization modifies the landscape, promoting changes from natural to man-made environment. Besides the impermeable soil, the urban areas have a lot of buildings, that changes the surface roughness, the wind speed and direction and also are responsible for shading the surface, blocking the incidence of solar energy. Analysing the city occupation geometry is important to understanding of the urban climate behaviour, and naturally the city planning. Remote sensing is a very important tool to get information about the urban areas, but is necessary to consider the heterogeneity of this environment and the existing spectral mixing in satellite data. Based on this, the linear model of spectral mixing can be classified as an important method of information extraction from urban environments. The goal of this research is to identify areas with horizontal and vertical patterns of urban occupation in the city of Porto Alegre – Brazil and relate this geometric characteristic with values of surface temperature. Therefore, images of the TM sensor of the Landsat 5 satellite were used (during the 1984-2009 period) and also the census data, meteorological data and models generated by laser scanning. Three fraction images were generated based on TM images: soil, shade and vegetation. The soil fraction was used for the identification of the areas with horizontal occupation and urban expansion, and the shadow fraction was used to identify verticalized areas. Based on the same images the surface temperature was obtained. Areas with horizontal occupation, mostly represented by houses, presented low shading values and high soil values. On the other hand, verticalized areas presented high shading values and low soil values. These results, obtained from the images fraction, are similar with the results from scientific papers and data from laser scanning. In Porto Alegre, the surface temperature indicated strong correlation with meteorological data, and was characterized by higher values in urbanized areas and lower values where the occupation is least intense. In urban areas, higher values of temperature are found in areas with horizontal occupation pattern, while the lowest values are found in verticalized regions. Furthermore, it is possible to suggest that the chosen methodology lead to conclusions that are consistent with other data of land use and occupation from different sources. Contributing with some information about characteristics of the urban area and urban climate of the city of Porto Alegre, which are usually not well documented in academic databases.

Keywords: urban remote sensing, spectral mixture analysis, Porto Alegre, urban climate, urban growth.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 HIPÓTESE.....	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 JUSTIFICATIVA	16
2 ÁREA DE ESTUDO.....	18
3 REVISÃO TEÓRICA.....	24
3.1 CLIMA URBANO.....	24
3.1.1 BALANÇO DE ENERGIA EM AMBIENTES URBANOS	25
3.1.2 ILHA DE CALOR	28
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO URBANO	30
3.2.1 IMAGENS LANDSAT.....	30
3.2.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS	32
3.3 LASER SCANNER	39
4 ANÁLISE DO CRESCIMENTO HORIZONTAL NA ÁREA URBANA DE PORTO ALEGRE.....	41
5 ANÁLISE DO CRESCIMENTO VERTICAL DA CIDADE DE PORTO ALEGRE.....	68
6 ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ENTRE 1984 E 2009 .	84
7 CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	109

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Localização do Rio Grande do Sul e do município de Porto Alegre	19
Figura 2.2. Cidade de Porto Alegre e municípios vizinhos.....	20
Figura 2.3. Ilustração contendo as macrozonas da cidade de Porto Alegre, definidas no PPDUA.....	21
Figura 2.4. Distribuição espacial da renda familiar mensal média por bairros, em Porto Alegre/RS.....	23
Figura 3.1. Dossel urbano e balanço de energia associado ao dossel e aos cânions urbanos.....	27
Figura 3.2. Representação de um transecto de uma típica ilha de calor urbano.....	29
Figura 3.3. Representação da geometria de aquisição dos dados da superfície, indicando IFOV e GIFOV.....	34
Figura 4.1. Gráfico apresentando os valores de reflectância aparente dos <i>endmembers</i> para cada banda espectral do sensor TM do Landsat 5. Valores referentes à imagem de 21/10/1991.....	44
Figura 4.2. Imagens-fração solo para as datas (a) 21/10/1991, (b) 27/10/1999 e (c) 03/10/2008.....	45
Figura 4.3. Imagem razão entre as frações solo de 2008 e de 1991.....	47
Figura 4.4. Aumento da fração solo na região do Aeroporto Internacional Salgado Filho.....	48
Figura 4.5. Crescimento da fração solo nos bairros Sarandi e Rubem Berta	49
Figura 4.6. Fração solo nos bairros Mário Quintana e Passo das Pedras	51
Figura 4.7. Expansão em vazios urbanos na região dos bairros Passo da Areia, Boa Vista e Três Figueiras.....	53
Figura 4.8. Bairros Bom Jesus, Jardim Carvalho e parte do Partenon	55
Figura 4.9. Expansão urbana no bairro Lomba do Pinheiro.....	56
Figura 4.10. Fração solo no bairro Restinga.....	58
Figura 4.11. Fração solo no bairro Hípica.....	59
Figura 4.12. Bairros Espírito Santo, Guarujá e Serraria.....	60
Figura 4.13. Porção oeste do bairro Belém Novo e o surgimento de condomínio de classe alta na região extremo sul de Porto Alegre.....	61
Figura 4.14. Mapa de localização dos bairros selecionados para análise quantitativa da fração solo.....	62
Figura 4.15. Valores de média da fração solo para os bairros selecionados	64
Figura 5.1. Imagens-fração sombra para os anos de (a) 1991 e (b) 2008.....	69
Figura 5.2. Detalhe das sombras dos morros da Tapera e das Abertas.....	69
Figura 5.3. Detalhe da região do Centro Histórico de Porto Alegre.....	70

Figura 5.4. Bairros Petrópolis, Bela Vista e Rio Branco e as frações sombra para 1991 e para 2008	71
Figura 5.5. Imagens fração sombra de 1991 e de 2008 para o bairro Menino Deus	72
Figura 5.6. Fração sombra para a macrozona Cidade Xadrez. São destacados os Corredores de Centralidade do Eixo Assis Brasil – Sertório e do Eixo Bento Gonçalves – Ipiranga.....	73
Figura 5.7. Imagem razão entre as frações sombra de 2008 e 1991.....	75
Figura 5.8. Comparativo entre os dados do Laser Scanner (2010) e da fração fração sombra (2008).....	79
Figura 5.9. Comparativo entre os dados do Laser Scanner (2010) e da fração sombra (2008)	80
Figura 5.10. Intersecção (c) entre os dados do Laser Scanner (a), obtidos em 2010, e da fração sombra (b), de 2008	82
Figura 6.1. Gráfico dispersão entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco para todas as estações do ano.	88
Figura 6.2. Gráfico dispersão entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco para outono, inverno e primavera.	88
Figura 6.3. Localização dos dez bairros com maior crescimento no número de domicílios entre 2000 e 2010, selecionados para as análises deste trabalho.	90
Figura 6.4. Médias calculadas para a Anomalia de Temperatura.....	92
Figura 6.5. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região central.	94
Figura 6.6. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região sul	96
Figura 6.7. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região nordeste ...	98
Figura 6.8. Comparativo entre as médias da AT para o bairro e a AT medida em um pixel da área urbana do mesmo bairro.....	101
Figura 6.9. Distribuição da fração sombra no município de Porto Alegre. Imagem-fração gerada a partir da cena da data 03/10/2008.	103
Figura 6.10. Distribuição da fração solo no município de Porto Alegre. Imagem-fração gerada a partir da cena da data 03/10/2008	104
Figura 6.11. Distribuição da AT em (a) 03/02/2007, (b) 13/04/2009, (c) 18/08/1997 e (d) 01/10/1984.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Comprimentos de onda das bandas, resolução espacial e intervalo de funcionamento dos sensores TM e ETM+.....	31
Tabela 4.1. Imagens selecionadas para a análise do crescimento horizontal da área urbana de Porto Alegre. Os valores de elevação solar, de erro médio quadrático (RMS) do registro da imagem e o número de pontos utilizados no registro estão dispostos na tabela.....	42
Tabela 4.2. Parâmetros para transformação dos valores de DN para reflectância aparente	42
Tabela 4.3. Bairros de Porto Alegre com o maior crescimento no número de domicílios entre os censos de 2000 e 2010	50
Tabela 4.4. Valores de média, desvio padrão e mediana, de fração solo, para os bairros selecionados.....	63
Tabela 4.5. Teste de normalidade para a fração solo – análise por Bairro e por ano.	65
Tabela 4.6. Testes de comparação de Mann Whitney – análises por Bairro.	65
Tabela 5.1. Valores de média, desvio padrão e mediana, da fração sombra, para os bairros selecionados.....	76
Tabela 5.2. Teste de normalidade para a fração sombra – análise por Bairro e por ano.	77
Tabela 5.3. Valores de média, mediana e desvio padrão da fração sombra para os bairros analisados e o p-valor resultante da comparação entre as medianas de 1991 e 2008.....	77
Tabela 6.1. Imagens utilizadas na análise da temperatura de superfície do município de Porto Alegre.....	84
Tabela 6.2. Valores de temperatura do ar em termômetro de bulbo seco (INMET) e temperatura de brilho no pixel correspondente à estação do INMET no terreno. Valores em graus Celsius (°C)	86
Tabela 6.3. Valores das médias das diferenças entre a temperatura de brilho do pixel e a temperatura de brilho referente ao INMET. Valores em °C.	91
Tabela 6.4. Valores da média da AT para o bairro e o valor da AT em um pixel da área urbana do bairro. Valores em °C.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ΔQ_A – Energia de advecção

ΔQ_S – Armazenamento de energia

λ – Comprimento de onda

ρ – Reflectância

θ – ângulo zenital solar

AT – Anomalia de temperatura

BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

d – Distância Terra-Sol

DN – Número Digital (*Digital Number*)

E – Irradiância

ESUN – Irradiância solar no topo da atmosfera

GIFOV – Campo de visada projetado no terreno (*Ground-projected Instantaneous Field of View*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFOV – Campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field of View*)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

FRB – Reflectância Bidirecional

L – Radiância

L_p – Adição da atmosfera

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MLME – Modelo Linear de Mistura Espectral

PDDU – Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano

PDDUA – Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental

Q^* - Energia incidente

Q_E – Fluxo de calor latente

Q_F – Energia antropogênica

Q_H – Fluxo de calor sensível

SMF – Secretaria Municipal da Fazenda

SMURB – Secretaria Municipal de Urbanismo

T_{kin} – Temperatura cinética

T_{rad} – Temperatura radiante

TM – *Thematic Mapper*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTC - *Universal Time Coordinated*

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da população mundial reside hoje em áreas urbanas (THEEUWES et al., 2014) e a ocupação do solo para uso urbano está continuamente expandindo, visto que as cidades precisam abrigar os migrantes de áreas rurais e o próprio crescimento natural da população urbana (OKE, 1987). Estima-se que 50% da população mundial atual seja urbana, e acredita-se que essa razão aumentará para 70% em 20 anos, gerando mudanças irreversíveis no uso do solo, da água, da energia e de outros recursos (ONU, 2013).

A expansão da área urbana tem importantes implicações climáticas em todas as escalas, promovendo a troca da cobertura natural por materiais urbanos (OWEN et al., 1998). Isso ocorre porque a alteração no uso do solo gera mudanças na cobertura do solo (OWEN et al., 1998) durante o desenvolvimento urbano, e a nova mistura de materiais, a aerodinâmica, a topografia natural e a rede de drenagem, afetam o clima local e regional (CLEUGH, 1995). Alguns elementos meteorológicos são modificados após a urbanização (ZHANG et al., 2010), como temperatura, distribuição de ventos e precipitação (OKE, 1987). Assim, as modificações causadas pelo homem, no ambiente, afetam o balanço de energia, gerando as ilhas de calor, a qualidade do ar, impactada pela emissão de efluentes atmosféricos (CLEUGH, 1995; PENG e LI, 2009), a saúde humana (PENG e LI, 2009) e o funcionamento dos ecossistemas (ZHANG et al., 2010). No entanto, é importante ressaltar que o aumento da população, ou área urbana, e a diferença de temperatura medida no ambiente urbano e no ambiente rural não são diretamente proporcionais (OKE, 1973).

A urbanização crescente e os impactos ambientais causados chamaram a atenção dos pesquisadores em sensoriamento remoto (WENG et al., 2012). Por ter a característica de realizar o imageamento de áreas urbanas com periodicidade, o sensoriamento remoto constitui-se numa eficiente forma de monitorar e classificar os ambientes urbanos (MICHISHITA et al., 2012) em escala regional (OWEN et al., 1998). Além disso, com dados orbitais é possível, simultaneamente, obter dados para

toda a cidade, superando a distribuição espacial das estações meteorológicas (SOBRINO et al., 2012).

1.1 HIPÓTESE

A hipótese deste trabalho é a que os padrões espaciais de temperatura de superfície na cidade de Porto Alegre estão associados às características da estrutura da ocupação urbana – vertical e horizontal –, bem como ao seu crescimento, e podem ser identificados e monitorados por sensoriamento remoto. Entende-se, como estrutura da ocupação urbana, a geometria da superfície, *i.e.* áreas com predominância de construções verticais ou com predominância de construções mais baixas.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta tese é avaliar áreas com padrão de ocupação horizontal e vertical na área urbana de Porto Alegre e a relação desses padrões com a temperatura de superfície. Para compreender a dinâmica das alterações, buscar-se-á:

- Utilizar Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para estimar a fração solo exposto, visando a identificação de padrão horizontal de ocupação urbana;
- Utilizar MLME para estimar a fração sombra, visando a identificação do padrão vertical de ocupação urbana;
- Analisar a expansão urbana, tanto no padrão de ocupação horizontal quanto no vertical, entre 1991 e 2008;
- Verificar a similaridade dos resultados do MLME com dados censitários e com artigos científicos

- Calcular a temperatura de superfície, a partir de banda termal, para as imagens disponíveis e sem cobertura de nuvens adquiridas entre 1984 e 2009;
- Verificar a similaridade dos dados de temperatura de superfície com dados de estação meteorológica;
- Relacionar padrões de temperatura de superfície com padrões de ocupação urbana.

1.3 JUSTIFICATIVA

O homem, assim como os demais seres vivos, possui necessidades climáticas para que consiga desempenhar suas atividades sem prejuízos à saúde. Dentre essas necessidades, destaca-se a temperatura, a umidade, a velocidade do vento e a radiação solar incidente. Alguns estudos apresentam uma queda na produtividade dos indivíduos quando expostos a temperaturas acima de 20°C, assim como a ocorrência de doenças causadas pela exposição da população a climas inadequados ao seu conforto térmico (FROTA e SCHIFFER, 2006).

A população urbana brasileira tem crescido ininterruptamente nos últimos 60 anos (IBGE a, 2011). Assim, o uso do solo para a formação de espaços urbanos também cresce, causando a supressão da vegetação da superfície e o emprego de materiais de construção economicamente viáveis na criação e na ampliação da infraestrutura das cidades. O Rio Grande do Sul, assim como os demais estados brasileiros, viveu um grande crescimento da população urbana. Em 1980, a população urbana brasileira era de 82.013.375 habitantes, crescendo para 160.925.792 habitantes em 2010 (IBGE, 2011). No estado do Rio Grande do Sul, a população urbana passou de 5.250.024, em 1980, para 8.317.984 habitantes, em 2000 (IBGE, 2011). Além disso, as cidades com população por volta de 500 mil habitantes e de 100 mil habitantes apresentaram os maiores crescimentos populacionais (IBGE a, 2011), sendo as últimas bastante recorrentes no Rio Grande do Sul.

O sensoriamento remoto dispõe de tecnologias que oportunizam a quantificação e o monitoramento dos ambientes urbanos (WU, 2004), sendo forma consistente de monitorar alterações na cobertura do solo associada à urbanização em escala regional (OWEN et al., 1998). Ainda, o sensoriamento remoto por satélites é uma das mais relevantes formas de detectar alterações no uso e na cobertura do solo urbano com baixo custo (YANG e LO, 2002; SONG, 2005).

No Brasil, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos na obtenção de temperaturas de superfície a partir de dados orbitais e na avaliação de sua relação com a ocupação urbana. Com apenas uma observação de temperaturas (*i.e.*, utilização de apenas uma cena em uma única data) tem-se os trabalhos de Sousa et al. (2005), Macedo Neto et al. (2011), Lemos (2011), Nascimento (2009) e Mashiki e Campos (2013) relatando as temperaturas obtidas para as cidades São Paulo, Petrolina, Curitiba, Goiânia e Botucatu, respectivamente. Há, também, trabalhos com o acompanhamento das temperaturas de superfície, em duas ou mais datas, para as cidades de Fortaleza (SILVA et al., 2011), Goiânia (SOUSA e FERREIRA, 2012) Piracicaba (POLIZEL, 2009; COLTRI, 2006), Recife (SANTOS, 2011), Rio de Janeiro (FUCKNER et al., 2011; KAZAY et al., 2011) e São Paulo (FUCKNER et al., 2011).

Para Porto Alegre, poucos estudos a respeito da distribuição de temperaturas e da dinâmica da ocupação urbana foram desenvolvidos, gerando a necessidade de um maior conhecimento a respeito desses temas. Há o estudo de Danni (1980), que utiliza medições de temperatura em várias estações distribuídas pelo município nas estações de outono e inverno. Hasenack (1989) aborda a influência de variáveis ambientais na temperatura de superfície na área urbana de Porto Alegre a partir de dados meteorológicos, de morfologia urbana e de cobertura vegetal. Utilizando sensoriamento remoto tem-se os trabalhos de Collischonn (2012), que observou a influência de áreas verdes na temperatura de superfície na região metropolitana de Porto Alegre, detectada por sensor orbital em uma única data, e de Grondona et al. (2013), que avaliaram a alteração na distribuição espacial da temperatura de superfície, em Porto Alegre, para duas datas, a partir de imagens orbitais.

2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Porto Alegre localiza-se na porção leste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2.1). Com terreno pouco acidentado, e altitudes que variam entre 4 e 300 metros, o município se desenvolve para leste, a partir da margem esquerda do Lago Guaíba (DANNI, 1980).

Segundo a classificação de Koppen, Porto Alegre possui clima subtropical úmido (Cfa) devido a suas temperaturas médias mensais e a distribuição anual de chuvas (LIVI, 1998). As temperaturas mais baixas concentram-se nos meses de junho e julho, as maiores temperaturas de dezembro a março, e as maiores chuvas ocorrem nos meses de junho a setembro (LIVI, 2002). Para a definição desses dois períodos de maior/menor temperatura e pluviosidade, Livi (2002) utilizou os dados meteorológicos obtidos entre 1910 e 2000.

A estação meteorológica de Porto Alegre teve quatro localizações diferentes. Entre 1909 e 1911, os equipamentos foram instalados no Campus Centro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Ainda em 1911, a estação foi transferida para outro ponto do Campus Centro da UFRGS, distante 100 metros do anterior e mantendo a mesma altitude. A partir de 1959, as observações foram realizadas em prédio localizado no Parque Farroupilha, com altitude igual às anteriores e distante 200 metros da última instalação. Desde 1974, a estação meteorológica de Porto Alegre localiza-se junto ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME), distante 5 quilômetros da estação anterior e com 40 metros de altitude. As alterações na localização da estação meteorológica de Porto Alegre se deram pela necessidade de manter as observações sem a influência de edificações altas e com urbanização reduzida no entorno (LIVI, 2002).

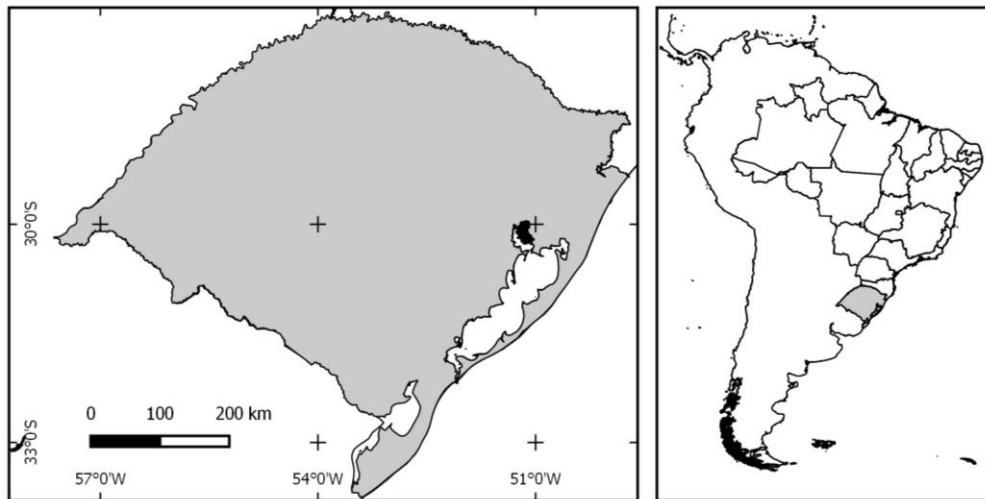


Figura 2.1. Localização do Rio Grande do Sul (em cinza, no quadro da direita) e do município de Porto Alegre (em preto, no quadro da esquerda). Mapa em coordenadas geográficas. Sistema Geodésico de Referência: WGS84.

Da vegetação original, apenas 21,4% ainda resiste às ações antrópicas. Deste remanescente, 10,2% são campestres e 13,9% florestais (HASENACK et al., 2008). Inserido no limite dos biomas pampa e mata atlântica (HASENACK et al., 2008), a vegetação de Porto Alegre tem a influência de quatro rotas migratórias: (i) da costa atlântica brasileira, com elementos tropicais da Floresta Atlântica; (ii) do Brasil Central, com elementos da periferia da Floresta Amazônica, (iii) de oeste, com elementos do Chaco e do Pampa, e (iv) meridional, com aspecto austral-antártico (PORTO e MENEGAT, 1998). Em Porto Alegre, encontra-se basicamente vegetação herbácea e matas/florestas, sendo essa última é a vegetação dominante no município (MÜLLER et al., 2011). As matas nativas ocorrem ao longo dos morros e nas áreas inundáveis das margens do Lago Guaíba e, por causa da expansão urbana, estão mais vulneráveis, identificando-se rápida redução/fragmentação dessas matas (HASENACK et al., 2008). A vegetação herbácea está presente nos banhados, localizados nas zonas norte e sudoeste de Porto Alegre, em solos mal drenados; nos campos nativos, distribuídos em áreas mal drenadas, e nos topos de morro; e nos campos rupestres, localizados nos topos de morro (HASENACK et al., 2008). Müller et al. (2011) simplificam a distribuição de campos e matas, separando os topos e encostas dos morros como áreas de manchas isoladas de campo e as encostas, vales e várzeas como áreas de florestas/mata. Hasenack et al. (2008) registram que a distribuição do remanescente de vegetação original, em Porto Alegre, não é homogênea, concentrando-se na metade sul do município e no Delta do Jacuí. Assim, pode-se perceber que a distribuição e a composição da vegetação de Porto Alegre são heterogêneas.

A cidade de Porto Alegre desenvolveu-se por sua posição geográfica, ou seja, por estar na confluência de grandes rios do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2.2), figurando como porto natural que, com o passar dos anos (final do século XIX e início do século XX), recebeu infraestrutura de transporte, em especial, estradas e ferrovias, promovendo a instalação de indústrias e de serviços, atraindo habitantes (SOUZA, 1998). O crescimento da cidade iniciou na Ponta do Gasômetro, local de ocupação pelos imigrantes açorianos, que passou por uma evolução em sua configuração superficial e de edificações (SOUZA, 1998), desenvolvendo-se, o sítio urbano, de forma radial (HICKEL et al., 1998).

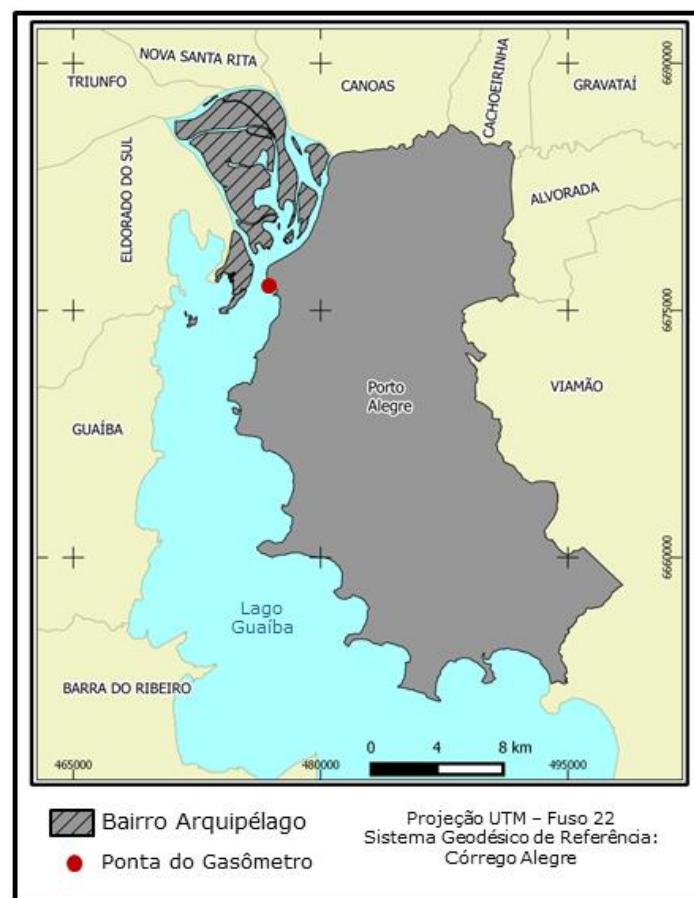


Figura 2.2. Cidade de Porto Alegre e municípios vizinhos.

O desenvolvimento da cidade é planejado pelo poder público desde a década de 1910. Com características predominantemente viárias, o “Plano Geral de Melhoramentos”, de 1914, e o “Plano Gladosch”, de 1938, concentraram esforços e propostas para as regiões do Centro Histórico e do 4º Distrito (PORTO ALEGRE, 2014), este último correspondendo à porção norte do Corredor de Urbanidade do atual

Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental (PDDUA) do município de Porto Alegre (Figura 2.3). Em 1959, o “Expediente Urbano de Porto Alegre” foi elaborado e tratava de outras funções urbanas, além da circulação, como habitação, trabalho e lazer (PORTO ALEGRE, 2014). O plano de 1959 regrava, apenas, a área de uso urbano do município, o que foi corrigido pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU), de 1979, que amplia o regramento do desenvolvimento urbano para todo o município. Após vinte anos sem atualizações, o PDDU foi revisto e inovado, gerando o PDDUA, que se tornou lei complementar em 1999 e que atualmente dá as diretrizes para o desenvolvimento urbano e ambiental para a cidade, em conjunto com outras leis complementares que já o atualizaram (PORTO ALEGRE, 2014).

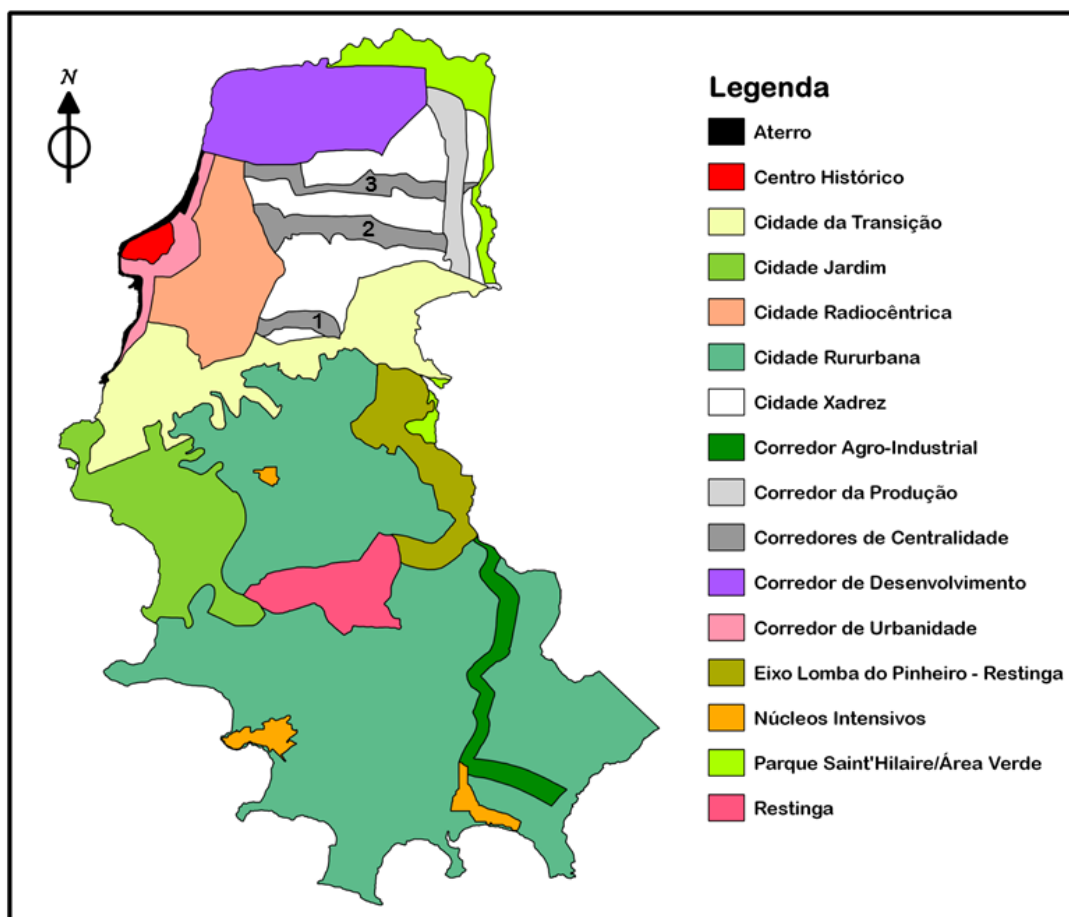


Figura 2.3. Ilustração contendo as macrozonas da cidade de Porto Alegre, definidas no PDDUA. Os números (1), (2) e (3) indicam, respectivamente, os Corredores de Centralidade dos Eixos Bento Gonçalves-Ipiranga, Nilo Peçanha-Anita Garibaldi e Assis Brasil-Sertório.
Adaptado de PORTO ALEGRE (1997).

A porção sul da cidade tem ocupação rarefeita, enquanto a porção norte tem intensivo uso urbano. A Figura 2.3 apresenta uma ilustração com as áreas definidas pelo PDDUA, sendo excluído o bairro Arquipélago desta ilustração, visto que esta região do

município não será abordada neste trabalho. Na Cidade Xadrez, há três Corredores de Centralidade, que equivalem aos Eixos (1) Bento Gonçalves-Ipiranga, (2) Nilo Peçanha-Anita Garibaldi e (3) Assis Brasil-Sertório (PORTO ALEGRE, 1997).

Há, na Cidade Rururbana, alguns Núcleos Intensivos, caracterizados pela concentração de residências e serviços de alguns bairros tradicionais e afastados do Centro Histórico, como Belém Velho, Belém Novo e Lami (PORTO ALEGRE, 1999). As áreas com vocação rural e/ou de ocupação rarefeita estão ao sul da Cidade da Transição, com exceção da Restinga, bairro com grande concentração populacional.

Quanto aos aspectos socioeconômicos de Porto Alegre, as áreas mais próximas ao Centro Histórico, contidas nas macrozonas Corredor de Urbanidade, Cidade Radiocêntrica e a metade oeste da Cidade Xadrez, possuem menor vulnerabilidade socioeconômica, assim como os bairros localizados às margens do Lago Guaíba e pertencentes à macrozona Cidade Jardim (MACEDO e BASSANI, 2010). Os bairros da macrozona Cidade Rururbana e da região nordeste são as mais vulneráveis, considerando-se 29 variáveis socioeconômicas, como renda média, escolaridade, população economicamente ativa ocupada e mortalidade infantil (MACEDO e BASSANI, 2010).

Analisando a renda familiar média mensal divulgada no censo 2010 (IBGE, 2011), nota-se uma concentração de camadas de maior poder aquisitivo nas áreas próximas ao Centro Histórico e nos bairros costeiros da zona sul e a população com menor renda está localizada na região sul e nordeste (Figura 2.4). A população com renda mais alta ocupa as regiões centrais, onde a infraestrutura urbana possui boa qualidade, enquanto a população pobre reside nos bairros periféricos, com equipamentos urbanos precários ou inexistentes (CABETTE e STROHAECKER, 2014). É possível observar, na Figura 2.4, uma concentração de bairros com renda familiar média mensal mais alta a leste do Centro Histórico. Conforme Koch (2004), a construção do Shopping Iguatemi consolidou o crescimento da cidade na direção leste, atraindo a população de alta renda para um eixo já caracterizado por moradias para a classe alta, constituído por bairros como Independência, Moinhos de Vento e Bela Vista.

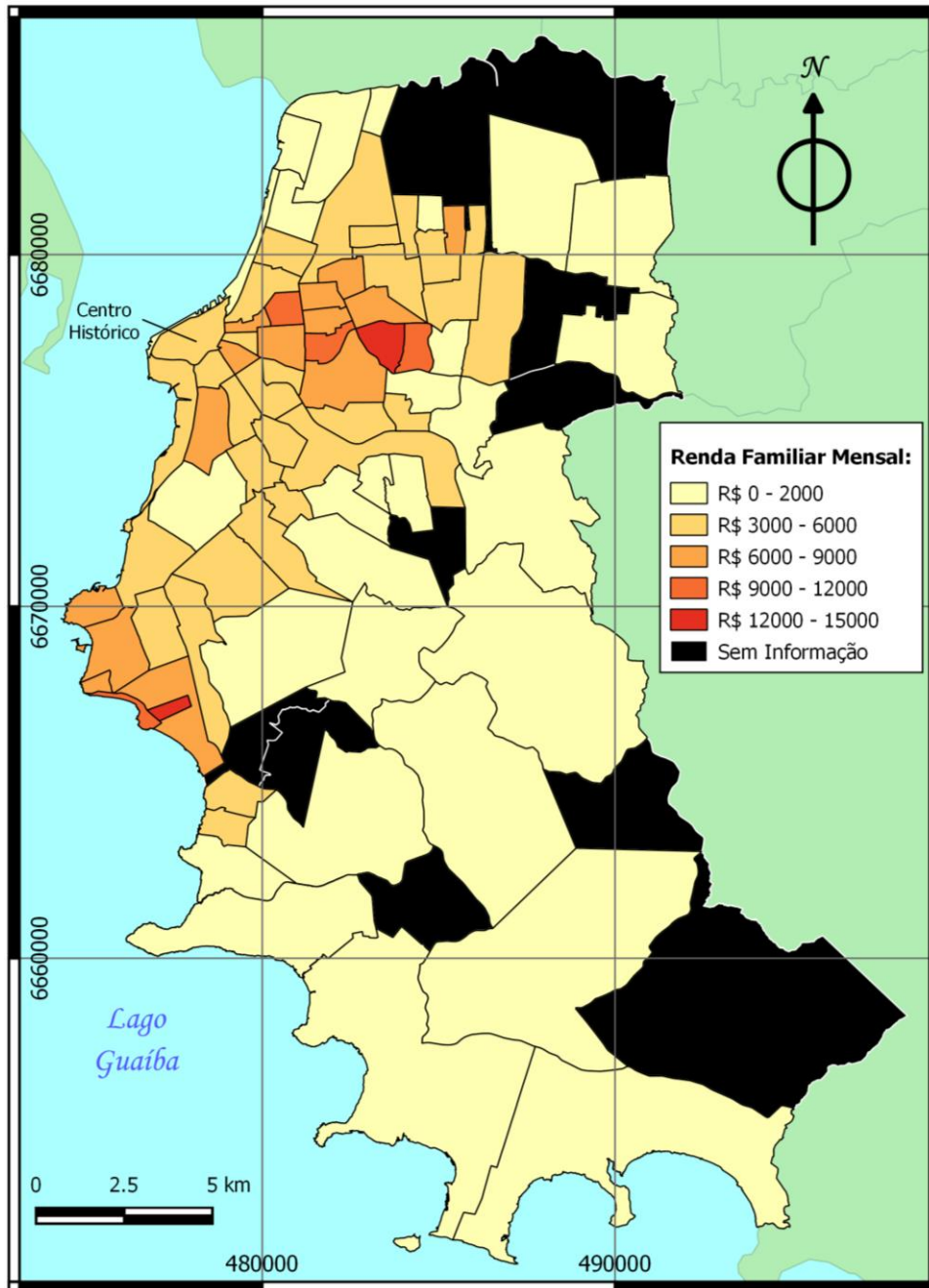


Figura 2.4. Distribuição espacial da renda familiar mensal média por bairros, em Porto Alegre/RS. Alguns bairros (em preto) não possuem informação de renda familiar no SIDRA/IBGE. Projeção cartográfica UTM e datum horizontal Córrego Alegre.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 CLIMA URBANO

Clima é a síntese das condições meteorológicas em uma determinada região. Para determinar um clima, é necessário definir os elementos climáticos, como temperatura média, precipitação, vento, pressão atmosférica, cobertura de nuvens, entre outros (HARTMANN, 1994). Os elementos climáticos são definidos através das médias estatísticas de séries de observações de um período mínimo de 30 anos, para assim considerar um comportamento médio da atmosfera em um determinado local (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Os seres humanos influenciam o clima local (HARTMANN, 1994). Uma dessas influências é causada pela urbanização. Esse processo provoca mudanças radicais na superfície natural e nas propriedades atmosféricas da região (OKE, 1987). Isso ocorre porque essas áreas passam a ter o solo cada vez mais impermeabilizado, ou seja, áreas antes cobertas por vegetação passam a ter vias pavimentadas (TANG, 2008) e construções para diferentes fins urbanos (*e.g.*, comerciais, residenciais e industriais) (DENG e WU, 2013). Os edifícios alteram a rugosidade da superfície e causam uma diminuição na quantidade de energia que chega à superfície, nas áreas em que há sombreamento provocado pela projeção da edificação, e um aumento na absorção da radiação incidente pelas paredes iluminadas (OKE, 1987). Essas mudanças na cobertura da superfície causam alteração na absorção, no armazenamento de calor e na evaporação nos ambientes urbanos, resultando em mudanças nas condições meteorológicas (TANG, 2008) e, por conseguinte, nos elementos climáticos.

Assim, os materiais de construção fazem com que o sistema urbano armazene mais calor (*i.e.*, alteração no balanço de energia) e que a superfície se torne impermeável (OKE, 1987). Além disso, a diminuição de áreas verdes, a geometria das

construções, que aumenta o aprisionamento da radiação, e a poluição atmosférica, fazem com que as ilhas de calor sejam o fenômeno mais significativo do clima urbano (BRANDÃO, 2003).

3.1.1 BALANÇO DE ENERGIA EM AMBIENTES URBANOS

A transferência, a conversão e o armazenamento de massa e energia, na superfície e na atmosfera, formam a base da Climatologia Física. De forma clássica, esses fluxos de energia e massa eram estimados através de parâmetros climáticos, *e.g.* temperatura e umidade. Esses parâmetros são medidas da energia térmica e da água disponível na atmosfera e estão intimamente relacionados aos ciclos de energia e de água no sistema terra-atmosfera (OKE, 1987). Assim sendo, o balanço de energia da superfície determina o fluxo de energia disponível para evaporar a água da superfície e para aumentar ou diminuir a temperatura da superfície (HARTMANN, 1994). As interações da superfície com a atmosfera, regidas pelo fluxo de energia da superfície, sofrem drástica alteração em ambientes urbanos (DOUSSET e GOURMELON, 2003). Isso ocorre porque as características da superfície, como umidade, cobertura vegetal e albedo são modificadas, além das características da atmosfera sobrejacente (HARTMANN, 1994), pois são as características da superfície que irão determinar as formas de interação da energia com a superfície.

Conforme a primeira lei da termodinâmica (lei da conservação da energia), a energia não pode ser criada, nem destruída, mas pode ser transformada de uma forma para outra (OKE, 1987). Para áreas com edificações, Oke (1987) apresenta uma equação para o balanço de energia (Equação1). Nesta equação, Q^* representa a energia incidente, Q_F a energia antropogênica (*i.e.*, a energia gerada pelas atividades humanas e pelo seu metabolismo), Q_H é o fluxo de calor sensível da camada de turbulência, Q_E o fluxo de calor latente na camada de turbulência, ΔQ_S representa o armazenamento da energia e ΔQ_A é a energia de advecção (*i.e.*, o transporte horizontal de calor, tanto sensível quanto latente).

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

Equação1

Os fluxos de energia na superfície variam ao longo do dia. Durante o dia, as ondas curtas (provenientes do sol) são recebidas, cessando esse aporte de energia após o pôr-do-sol. A atmosfera emite radiação de ondas longas que, assim como as ondas curtas, também chegam à superfície (WALLACE e HOBBS, 2006).

A diferença entre o balanço de energia de áreas rurais e de áreas urbanas está baseada nos percentuais de calor latente, calor sensível e de energia armazenada. Oke (1987) ignora a energia de advecção das análises, mostrando que seu valor é baixo, não afetando as comparações. Comparando áreas rurais e urbanas, nota-se um aumento no calor sensível e no armazenamento de calor em áreas urbanas. No entanto, o calor latente diminui, evidenciando a ausência de água na superfície, provocada pela impermeabilização do solo, e pela diminuição na vegetação (OKE, 1987). Com a impermeabilização do solo, há pouca disponibilidade de água na superfície para auxiliar na troca de calor, pois grande quantidade de água é drenada. Assim, tanto a umidade proveniente da vegetação quanto a proveniente do solo são produzidas em pouca quantidade, evitando o escape de energia pela evaporação (calor latente), causando um armazenamento de calor durante o dia (OKE, 1987; GARTLAND, 2010).

A utilização de materiais de construção na superfície altera o albedo, a condutividade térmica e a capacidade térmica da superfície (DOUSSET e GOURMELON, 2003; GARTLAND, 2010). Assim, a superfície urbana sofre uma diminuição da reflexão da energia solar incidente (albedo), um aumento da capacidade de absorção da energia incidente (capacidade térmica) e o armazenamento dessa energia acumulada por mais tempo (condutividade térmica) (GARTLAND, 2010). Oke (1987) comenta que a razão para uma capacidade maior de armazenamento de calor no sistema urbano pode ser a maior área de absorção de energia, como consequência da geometria urbana, ou a redução do calor latente, devido aos materiais urbanos secos.

Enfim, para compreender as alterações na temperatura da superfície em um ambiente, é importante avaliar o crescimento e a geometria das construções. O crescimento da área urbana fará com que uma maior porção da superfície seja impermeabilizada ou tenha materiais naturais substituídos por materiais com maior capacidade térmica. A geometria das construções causa o sombreamento da superfície, diminuindo a quantidade de energia incidente na superfície, e o tunelamento dos ventos, alterando a transferência de energia térmica entre a atmosfera e a superfície (GARTLAND, 2010).

As ondas curtas têm grande importância no aquecimento da superfície. Considera-se radiação de onda curta, ou radiação solar, os comprimentos de onda entre 0,15 e 3 μm , e radiação de onda longa os comprimentos de onda entre 3 e 100 μm (OKE, 1987). Enquanto há radiação proveniente do sol chegando à superfície urbana, os materiais com baixo albedo absorvem bastante radiação, liberando ondas longas por aquecimento da atmosfera sobrejacente (calor sensível) (OLIVEIRA et al., 2001). Oliveira et al. (2001) ressalta que as ondas com comprimento entre 0,3 e 0,7 μm são muito importantes para o aquecimento da Terra, dado que a atmosfera é bastante transparente para esses λ , facilitando a chegada da radiação à superfície e sua posterior absorção.

As alterações provocadas na superfície natural pela urbanização não são homogêneas. Porções da cidade terão edifícios mais altos, outras serão caracterizadas por praças e casas. Assim, o dossel urbano (Figura 3.1) é considerado complexo, pois o clima urbano é o conjunto de microclimas existentes no dossel. Um desses microclimas é causado pelo cânion urbano. Esses cânions são formados pelas paredes de edifícios adjacentes e a superfície (*e.g.*, ruas ou avenidas) (OKE, 1987).

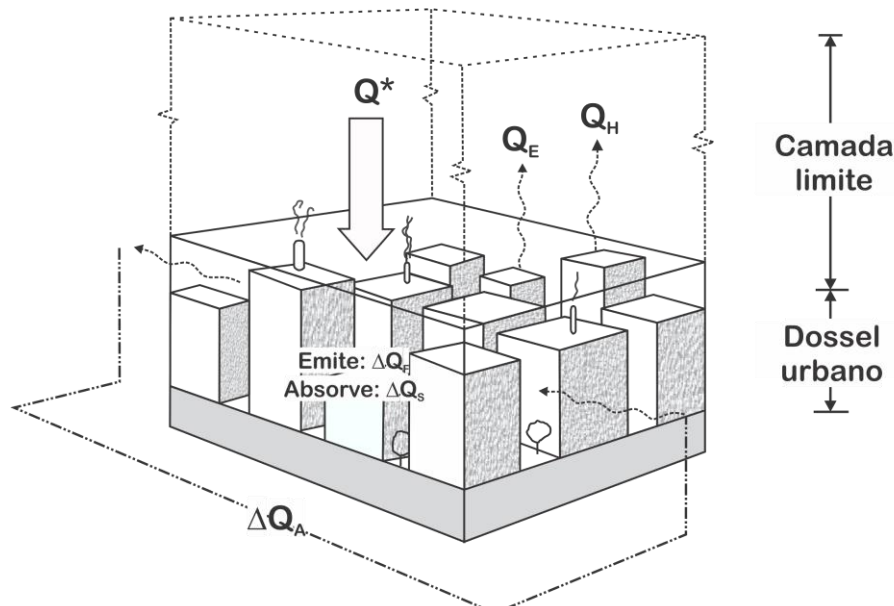


Figura 3.1. Dossel urbano e balanço de energia associado ao dossel e aos cânions urbanos. Adaptado de Oke (1987).

Cada cânion tem uma geometria, configurando um ângulo para incidência solar e um ângulo de entrada para os ventos. Por isso, cada cânion tem um microclima diferente. Por serem formados por paredes e por ruas, geralmente pavimentadas, os

cânions urbanos constituem-se de material seco, com pouca disponibilidade de água na superfície. Assim, a Equação 1, para os cânions, terá apenas a transformação da energia incidente em Q_H e ΔQ_S , nas paredes, e Q_E , Q_H e ΔQ_S , na superfície (OKE, 1987).

Theeuwes et al. (2014) aborda a influência da altura dos prédios no sombreamento dos cânions urbanos. Conforme os autores, quanto maior o sombreamento do cânion, menor a quantidade de energia incidente e, assim, menor será a temperatura dessa área durante o dia. Com pouca energia armazenada, a liberação de energia após o poente será menor, fazendo com que esses ambientes tenham temperaturas baixas durante a noite. Nesse caso, seria esperado o menor valor da diferença entre a temperatura da área urbana e a temperatura da área rural.

Contudo, mesmo que haja um aumento na altura dos prédios, a geometria da insolação (*sky view factor*) no cânion será preponderante no balanço de energia da superfície urbana. Essa geometria determinará a quantidade de energia incidente e o possível armazenamento dessa energia pelos materiais urbanos (OKE, 1987; MARCIOTTO et al., 2010).

3.1.2 ILHA DE CALOR

A ilha de calor é um fenômeno estudado desde o século XIX, quando as regiões mais urbanizadas da Terra (*e.g.*, Europa e costa leste dos Estados Unidos) passaram a mostrar um comportamento climático diferente do natural (DAN et al., 2010). Howard (1843) já relatava diferenças entre as temperaturas observadas, desde 1811, na cidade de Londres e nas zonas rurais do entorno. Com o passar dos anos, as atividades urbanas e industriais começaram a transformar o clima das cidades de forma rápida e intensa, levando outros pesquisadores a investigar as ilhas de calor, aproximando as análises qualitativas (*e.g.*, brisas leves, visibilidade das estrelas, mudança de temperatura no período da noite), percebidas pelos habitantes, das análises quantitativas (*e.g.*, temperatura, pluviosidade, direção e velocidade dos ventos), realizadas em áreas urbanas e rurais (CLEUGH, 1995).

O termo ilha de calor refere-se ao fenômeno que ocorre quando a temperatura urbana, alterada pelas atividades humanas, é maior que a temperatura de ambientes

naturais do entorno das cidades (DAN et al., 2010). Alguns autores definem como a diferença entre a temperatura no ambiente urbano e a temperatura em zonas rurais (OKE, 1987; THEEUWES et al., 2014). Essas ilhas podem ocorrer em áreas urbanas e suburbanas, visto que muitos materiais de construção absorvem e retêm grande parte da energia incidente (GARTLAND, 2010), resultando em alterações no balanço de energia, em especial na redução da perda, pela superfície, de radiação de ondas longas (BRANDÃO, 2003). O tamanho e a intensidade da ilha de calor variam no tempo e no espaço (Figura 3.2), como resultado das características locais, da área urbana e meteorológicas (OKE, 1987). Essa intensidade é caracterizada pela diferença de temperatura entre o ambiente urbano e o rural (ΔT_{u-r}).

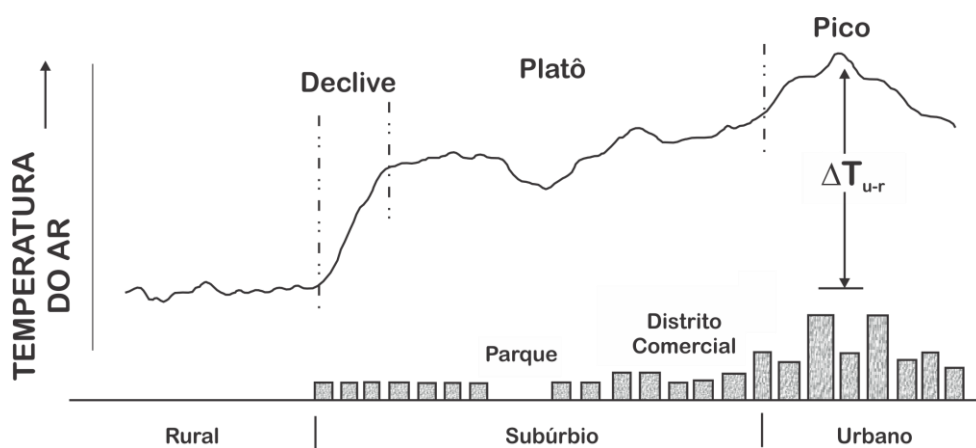


Figura 3.2. Representação de um transecto de uma típica ilha de calor urbano. Fonte: Oke (1987).

A uniformidade da temperatura do ar, na ilha de calor, depende do uso e da cobertura do solo. Especialmente na região do platô (Figura 3.2), parques e lagos arrefecem o ar da camada urbana, enquanto os usos comercial, industrial e residencial aquecem o ar sobrejacente (OKE, 1987).

A intensidade da ilha de calor varia durante o dia, sendo a maior diferença entre a temperatura urbana e a temperatura rural registrada após o pôr-do-sol (OKE, 1987). Essa liberação de energia após o pôr-do-sol, entre 3 e 5 horas após o poente, faz com que a temperatura atmosférica se mantenha alta no período da noite (OKE, 1987; GARTLAND, 2010). Mesmo cessando a incidência de radiação solar, a superfície urbana libera grande quantidade de energia para a atmosfera (calor sensível) mantendo a temperatura elevada por algumas horas após o poente. É importante ressaltar que a alteração na superfície e, por conseguinte, na troca de energia superfície-atmosfera,

altera o conforto térmico não só pelo aumento na temperatura, mas pela manutenção de temperaturas altas em um longo período do dia (GARTLAND, 2010).

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO URBANO

A rápida urbanização, registrada nas últimas décadas, e os problemas por ela causados, podem ser analisados com uma articulação entre novas tecnologias e dados de campo. Assim, o sensoriamento remoto, como forma de observar a superfície da Terra, e os sistemas de informação geográficas auxiliam na geração de informação espacial para solucionar e/ou monitorar as áreas urbanas (MAKTAV et al., 2005). O sensoriamento remoto em áreas urbanas é definido como a medição da radiância de superfície e de suas propriedades associadas ao uso e cobertura do solo nas cidades (NETZBAND e JÜRGENS, 2010).

Fotografias aéreas foram inicialmente utilizadas para monitorar as áreas urbanas, contudo, a partir de 1972, com o lançamento do primeiro satélite da série Landsat, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando imagens orbitais no monitoramento dessas áreas (MAKTAV et al., 2005). Atualmente, as imagens orbitais mostram-se essenciais na coleta de informação dos ambientes urbanos em diferentes escalas espaciais, temporais e espectrais, sendo pré-requisito para verificar as alterações na paisagem causadas pelas formas urbanas (NETZBAND e JÜRGENS, 2010).

3.2.1 IMAGENS LANDSAT

O programa Landsat é composto por uma série de satélites de observação da Terra desenvolvidos pela NASA e pelo USGS (NASA, 2011). Iniciado em julho de 1972, com o lançamento do Landsat 1, o programa seguiu até novembro de 2011 com os satélites Landsat 2 a 7, sendo que o Landsat 6 não adquiriu dados, visto que foi

perdido durante o lançamento. Em 2013, o programa teve sua continuidade garantida após o lançamento do Landsat 8 (NASA, 2014).

Os satélites desse programa que possuem bom acervo de imagens durante os últimos 30 anos são o Landsat 5 e o 7. A plataforma Landsat 5 levou a bordo o sensor Thematic Mapper (TM) e a Landsat 7 o sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+). A diferença entre os sensores é que o ETM+ possui melhor resolução espacial na banda 6 (termal) e tem uma banda pancromática, com 15 metros de resolução espacial. Por serem sensores multiespectrais, é possível obter informações sobre a cobertura do solo no mesmo instante em que é medida a radiância no infravermelho termal (VOOGT e OKE, 2003). Essa característica é importante, pois é possível relacionar o comportamento térmico e as características da superfície (VOOGT e OKE, 2003).

Os sensores (TM e ETM+) são e foram amplamente utilizados por todas as áreas acadêmicas devido à distribuição de suas bandas ao longo do espectro eletromagnético, ideal para as mais diversas análises. As imagens desses sensores são fundamentais para as ciências naturais e sociais, dada a possibilidade de quantificar padrões da paisagem urbana e analisar a relação desses padrões com os processos biofísicos e ecológicos (ALBERTI et al., 2004). A Tabela 3.1 apresenta os comprimentos de onda das bandas, a resolução espacial e o tempo de funcionamento dos sensores TM e ETM+ a bordo das plataformas Landsat 5 e 7, respectivamente.

Tabela 3.1. Comprimentos de onda das bandas, resolução espacial e intervalo de funcionamento dos sensores TM e ETM+. Fonte: NASA (2011).

Satélite	Funcionamento	Banda	Comprimentos de Onda (μm)	Resolução Espacial
Landsat 5 (TM)	De março de 1984 até novembro de 2011	1	0,45 – 0,52	30 m
		2	0,52 – 0,60	30 m
		3	0,63 – 0,69	30 m
		4	0,76 – 0,90	30 m
		5	1,55 – 1,75	30 m
		6	10,4 – 12,5	120 m
		7	2,08 – 2,35	30 m
Landsat 7 (ETM+)	De abril de 1999 até maio de 2003	1	0,45 – 0,52	30 m
		2	0,52 – 0,60	30 m
		3	0,63 – 0,69	30 m
		4	0,76 – 0,90	30 m
		5	1,55 – 1,75	30 m
		6	10,4 – 12,5	60 m
		7	2,08 – 2,35	30 m
		8	0,52 – 0,90	15 m

As bandas 1, 2 e 3 correspondem às faixas do azul, do verde e do vermelho, a banda 4 ao infravermelho próximo e as bandas 5 e 7 ao infravermelho médio. O termal é observado na banda 6.

3.2.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

3.2.2.1 CONVERSÃO DOS VALORES DE NÚMERO DIGITAL EM REFLECTÂNCIA APARENTE

Cada pixel, em uma imagem, possui um valor de brilho, denominado Número Digital (*DN – Digital Number*). Esse valor de brilho é a quantização da energia recebida, pelo sensor, em uma escala que depende da resolução radiométrica desse sensor (JENSEN, 2009). Além das escalas de quantização dos sensores, cada banda possui valores máximos e mínimos para a transformação dos valores físicos da energia recebida em valores de DN, impossibilitando a caracterização espectral dos alvos através dos valores de DN. Assim, para que imagens de diferentes sensores e/ou de diferentes datas sejam quantitativamente comparadas, a transformação dos DNs para valores físicos deve ser realizada (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; LILLESAND et al., 2008).

Os valores de radiância (L_λ) recebida pelo sensor, em um dado comprimento de onda λ , dependem da irradiância no alvo (E), da reflectância do alvo (ρ), da transmissão atmosférica (T) e da adição da atmosfera (L_p). Portanto, a radiância, no sensor, está associada à quantidade de energia incidente, que no caso das bandas do visível e do infravermelho próximo e médio dependem diretamente da irradiância solar, da reflectância do alvo e da influência da atmosfera (LILLESAND et al., 2008) (Equação 2).

$$L_\lambda = \frac{\rho * E * T}{\pi} + L_p$$

Equação 2

Em estudos que utilizam imagens de diferentes datas, é necessário aplicar a correção para a elevação solar e a correção para a distância Terra-Sol. A correção para elevação solar baseia-se nas posições do Sol em relação à Terra, transformando cenas com diferentes iluminações em imagens com valores de brilho referentes ao zênite. Como a irradiância solar é inversamente proporcional ao quadrado da distância Terra-Sol, a correção para essa distância se faz necessária para que se considere a energia incidente no topo da atmosfera (LILLESAND et al., 2008).

Considerando que a correção da influência da atmosfera é necessária apenas em determinadas aplicações (SONG et al., 2001; LILLESAND et al., 2008), pode-se ignorar a atmosfera e considerar, apenas, a irradiância solar no topo da atmosfera e a reflectância do alvo como contribuintes da radiância no sensor. Isolando a reflectância que, neste caso, é calculada a partir de parâmetros do topo da atmosfera, tornando-se reflectância no topo da atmosfera (ρ_a), e incluindo as correções para a distância Terra-Sol e para a elevação solar, tem-se a Equação 3. $ESUN_\lambda$ é a irradiância do sol no topo da atmosfera, em um determinado comprimento de onda λ , θ é o ângulo solar zenital e d é a distância Terra-Sol, em unidades astronômicas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007)

$$\rho_a = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos\theta} \quad \text{Equação 3}$$

Para calcular ρ_a é necessário converter os valores de DN para L_λ . Essa conversão (Equação 4) utiliza parâmetros de transformação de cada sensor. No caso das imagens TM do satélite Landsat 5, revisões nesses parâmetros são apresentados em Chander e Markham (2003), Chander et al. (2007) e Chander et al. (2009). Parâmetros atualizados devem ser inseridos na Equação 4, visando minimizar erros provenientes da determinação dos parâmetros e do desgaste do sensor (CHANDER et al., 2010)

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{QCALmax} \right) * QCAL + LMIN_\lambda \quad \text{Equação 4}$$

3.2.2.2 MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL

Dada a complexidade do ambiente urbano, não é válida, para muitos dados de sensoriamento remoto, a premissa de que um pixel pertença a somente uma classe (SONG, 2005). O modelo linear de mistura espectral baseia-se na premissa de que toda a radiância registrada pelo sensor é a soma das radiâncias de todos os alvos contidos no IFOV do sensor (SHIMABUKURO e SMITH, 1991) e da contribuição da atmosfera (HAERTEL et al., 2004).

O IFOV é o ângulo oposto, no eixo do sistema ótico, a um único elemento detector (SCHOWENGERDT, 2007). Schowengerdt (2007) apresenta a definição de GIFOV para descrever a mistura espectral, sendo o GIFOV o ângulo IFOV projetado no terreno (SCHOWENGERDT, 2007), *i.e.* a parcela do terreno que estará contida no ângulo de imageamento (Figura 3.3). Essa consideração feita por Schowengerdt (2007) é de grande relevância para a mistura espectral, visto que o valor do pixel será a combinação das radiâncias dos alvos do terreno que estiverem contidos no IFOV, ou seja, são os alvos contidos no GIFOV (SMALL, 2002).

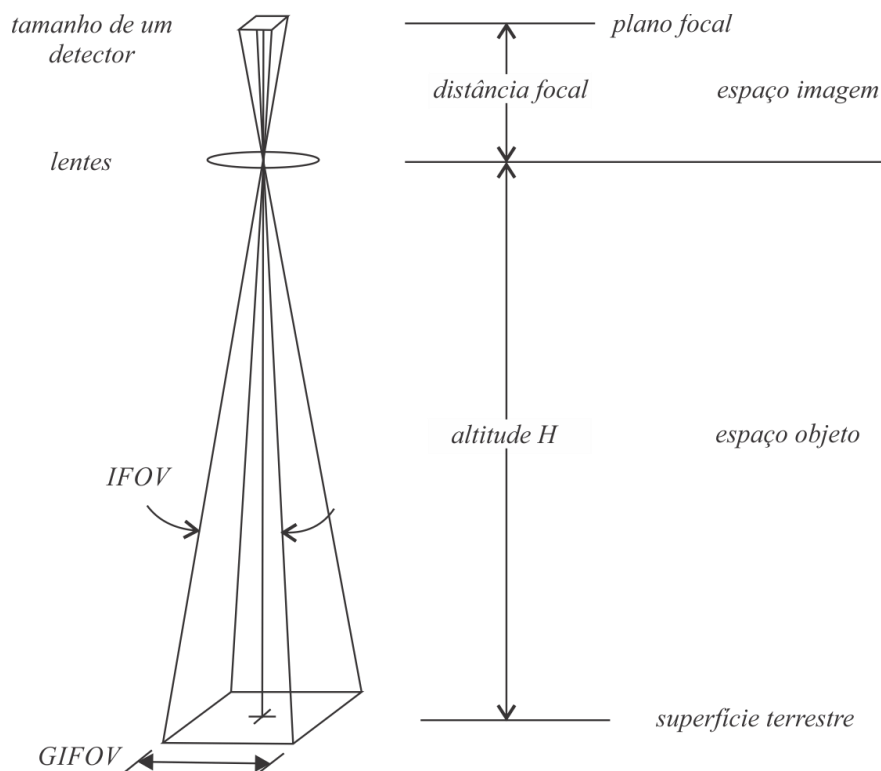


Figura 3.3. Representação da geometria de aquisição dos dados da superfície, indicando IFOV e GIFOV.
Fonte: Schowengerdt (2007).

Um pixel poderá assumir qualquer valor, sendo que este valor conterá a informação da proporção da resposta de cada alvo que gerou a mistura espectral (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). A exceção é o *endmember*, que é um pixel com assinatura espectral pura para uma determinada fração (SCHOWENGERDT, 2007). A seleção de *endmembers* apropriados é a garantia de sucesso nos resultados do Modelo Linear de Mistura Espectral (SONG, 2005). Contudo, devido ao ruído do sensor e à variabilidade dentro da classe, *endmembers* somente existem no universo conceitual e nas idealizações a respeito das imagens reais (SCHOWENGERDT, 2007).

Utilizando o MLME, a proporção das misturas para cada pixel será estimada, resultando na fração de cada classe espectral contida no pixel (HAERTEL et al., 2004). Como resultado, imagens fração serão geradas (*i.e.* imagens para cada componente), onde os pixels assumirão o valor da proporção desse componente no pixel original (HAERTEL et al., 2004).

Sabendo-se que os alvos possuem um comportamento característico em um determinado comprimento de onda, para cada banda espectral uma combinação linear da resposta destes alvos poderá ser construída (Equação 5) (SHIMABUKURO e SMITH, 1991).

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij}x_{ij}) + e_i \quad \text{Equação 5}$$

Na Equação 5, tem-se o valor do pixel (r_i), a resposta espectral do componente (a_{ij}), o percentual do componente na mistura (x_{ij}) e o erro (e_i) (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Este sistema deverá ser resolvido sob duas restrições (HARTEL et al., 2004):

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1 \quad (\text{i}) \quad 0 \leq x_j \leq 1 \quad (\text{ii})$$

assim, o somatório dos percentuais de cada componente deve ser igual a 1 e cada percentual deve ter valor entre 0 e 1. Essas restrições citadas caracterizam o MLME utilizado como Método CLS (*Constrained Linear System*) (SHIMABUKURO e SMITH, 1988; SHIMABUKURO e SMITH, 1991; HAERTEL et al., 2004).

3.2.2.2.1 APLICAÇÃO DO MLME EM ÁREAS URBANAS

A descrição dos padrões da superfície urbana é fundamental para a compreensão de diversos fenômenos urbanos (RASHED et al., 2001). Assim, técnicas de classificação pixel-a-pixel foram amplamente utilizadas para a detecção das mudanças do padrão de cobertura do solo urbano. Contudo, quando se trata de ambiente urbano, um pixel pode representar a combinação de vários tipos de uso do solo, principalmente para sensores de baixa e média resolução (e.g., Landsat TM) (RASHED et al., 2001; SMALL, 2002; WU, 2004). Como a mistura espectral é inerente à aquisição de dados por sensores de baixa e média resolução espacial, a análise das imagens desses sensores por técnicas pixel-a-pixel especificará qualitativamente as mudanças ocorridas (i.e., o tipo de mudança) (JI e JENSEN, 1999), enquanto análises subpixel são capazes de determinar mudanças de forma quantitativa (JI e JENSEN, 1999; SMALL, 2002), apresentando o grau de mudança ocorrida (JI e JENSEN, 1999).

Inúmeros trabalhos utilizaram o MLME para quantificar as proporções de alvos urbanos a partir de imagens orbitais (JI e JENSEN, 1999; RASHED et al., 2001; SMALL, 2001; SMALL, 2002; LU e WENG, 2004; WU, 2004, SMALL, 2006; SMALL e LU, 2006, LU et al., 2011). Ridd (1995) desenvolveu uma metodologia para avaliar o uso do solo urbano através das frações solo, solo impermeável e vegetação. Assim, todos os alvos urbanos seriam combinação desses três alvos. Small (2001) e Small e Lu (2006) utilizaram MLME para estimar a vegetação nas cidades. A quantificação e alterações no solo impermeabilizado em áreas urbanas também foi tema central de alguns trabalhos (JI e JENSEN, 1999; WU e MURRAY, 2003; LU e WENG, 2004, LU et al., 2011).

O MLME, para ter bons resultados, necessita *endmembers* que representem o espaço de mistura espectral daquele ambiente urbano. No entanto, os materiais urbanos, como solo e materiais de construção, possuem grande variabilidade em suas reflectâncias (HEROLD et al., 2004). Assim, encontrar um pixel, com valor apropriado para definir o comportamento de uma fração é tarefa bastante complexa. Wu e Murray (2003), para identificar áreas como solo impermeabilizado, utilizaram uma combinação das frações baixo albedo e alto albedo. Contudo, houve confusão nas estimativas da fração baixo albedo, visto que o alvo sombra foi incluído nessa fração. Entretanto, Rashed et al. (2001) e Lu e Weng (2004) mostram a importância da utilização da fração

sombra na identificação de padrões de ocupação do solo. Portanto, os resultados do MLME aplicado a ambientes urbanos dependem da mistura existente na superfície, das frações a serem geradas e da disponibilidade de pixels capazes de caracterizar quantitativamente as frações.

3.2.2.3 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE POR DADOS ORBITAIS

Todos os corpos que estão acima do zero absoluto (0 Kelvin; -273,16 °C) têm suas moléculas em movimentos aleatórios que, ao colidirem, emitem radiação eletromagnética ao mudar seu estado de energia (JENSEN, 2009). Essa energia, proveniente da movimentação das moléculas, também chamado de calor cinético, pode ser medido com um termômetro de contato físico (direto) com o objeto. Nesse caso, será obtida a temperatura cinética (T_{kin}) do corpo analisado (LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009).

Métodos indiretos de medição da temperatura utilizam a quantidade de fluxo radiante emitido por um corpo, determinando a temperatura radiante (T_{rad}) que, posteriormente, pode ser usada na estimativa da temperatura cinética deste corpo. Essa quantidade de energia que deixa um corpo é descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a quantidade de energia radiante total emitida (exitância radiante espectral total - M_b) por um corpo negro e a temperatura desse mesmo corpo (Equação 6) (LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009).

$$M_b = \sigma T^4 \quad \text{Equação 6}$$

Conforme a Equação 6 (Lei de Stefan-Boltzmann), a exitância radiante espectral total (M_b) é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura (T). A constante de Stefan-Boltzmann (σ) relaciona a exitância e a temperatura, e seu valor é de $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ (JENSEN, 2009).

O corpo negro é um radiador ideal e caracteriza-se por absorver toda radiação incidente e, posteriormente, emite toda a energia incidente em igual proporção nos comprimentos de onda (LILLESAND et al., 2008). O pico de emissão de um corpo

negro ocorre em um determinado comprimento de onda (λ_m). Esse comprimento de onda (λ_m) está associado à temperatura (T) do corpo negro, conforme mostra a Lei de Wien (Equação 12) (LILLESAND et al., 2008).

$$\lambda_m = \frac{2892 \mu m K}{T} \quad \text{Equação 7}$$

Os objetos da superfície da Terra encontram-se em temperatura ambiente, *i.e.* aproximadamente 300 K. Assim, pela Lei de Wien, o pico de emissão desses objetos será nos comprimentos de onda próximos de 10 μ m (DASH et al., 2002; LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009). Esses valores de comprimento de onda estão na janela atmosférica posicionada entre 8 e 14 μ m, sendo possível observar a radiação emitida pelos alvos da superfície (LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009). É importante ressaltar que a transparência da atmosfera, para esses comprimentos de onda, não elimina os efeitos atmosféricos nos dados adquiridos pelo sensor, provenientes da superfície (KERR et al., 2000).

Como os corpos, na natureza, não são corpos negros ideais, a emissão desses alvos não é igual em todos os comprimentos de onda. Isso ocorre porque os corpos reais são radiadores seletivos, emitindo maiores ou menores quantidades de energia nos diferentes comprimentos de onda. Assim, para caracterizar um alvo de acordo com a quantidade de energia que ele emite, usa-se a emissividade (ϵ), que é a razão entre a exitância do corpo real (M_r) e a exitância do corpo negro (M_b) (Equação 8). Como as leis de Wien e de Stefan-Boltzmann baseiam-se no corpo negro, os valores de temperatura obtidos pelas leis, *i.e.* para corpos ideais, podem ser convertidos para os objetos reais quando são conhecidos os valores de emissividade dos objetos (Equação 9) (LILLESAND et al., 2008; JENSEN, 2009).

$$\epsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad \text{Equação 8}$$

$$T_{rad} = \epsilon^{1/4} T_{kin} \quad \text{Equação 9}$$

O sensor de infravermelho termal mede a radiância no topo da atmosfera (KERR et al., 2000). A intensidade, ou brilho, dessa radiância pode ser convertida para

temperatura de brilho através da Lei de Planck (Equação 10) (KERR et al., 2000; DASH et al., 2002; WENG et al., 2004).

$$L(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{[(hc/\lambda\kappa T)-1]}} \quad \text{Equação 10}$$

Na Equação 10, h é constante de Planck, c é a velocidade da luz e κ é a constante de Boltzmann. Considerando que, exceto pelo termo exponencial, todos os demais valores são constantes, Singh (1988) mostra que a relação entre a radiância e a temperatura é descrita pela Equação 11, onde a e b são constantes, que podem ser determinadas por mínimos quadrados.

$$\ln(L) = a + b/T \quad \text{Equação 11}$$

Lansing e Barker (1983) desenvolveram a Equação 12 considerando a relação descrita por Singh (1988), e determinaram as constantes K_1 e K_2 . A equação foi determinada para o sensor TM do Landsat-4. Contudo, a mesma equação é utilizada para os dados do satélite Landsat-5 (CHANDER et al., 2009).

$$L = \frac{K_1}{e^{(K_2/T)} - 1} \quad \text{Equação 12}$$

Isolando, na Equação 12, a temperatura, tem-se a Equação 13 (LANSING e BARKER, 1983). Através dessa última é possível obter a temperatura de brilho da superfície.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad \text{Equação 13}$$

3.3 LASER SCANNER

O laser scanner é um laser altímetro (VOSSELMAN et al., 2005) e mede a distância entre os pontos iluminados e o sensor, usando o tempo de deslocamento de um pulso de luz emitido pelo sensor (WEHR e LOHR, 1999). Assim, a varredura laser gera

uma nuvem de pontos com valores de distância entre o sensor e a superfície, que posteriormente são convertidos em altitude ou altura. Interpolando os pontos medidos pelo laser scanner é possível construir um Modelo Digital do Terreno (MDT) ou um Modelo Digital de Superfície (MDS) (BALTSAVIAS, 1999; WEHR e LOHR, 1999) graças à alta densidade de pontos medidos (VOSSSELMAN et al., 1999). O MDT é gerado pelos pontos do terreno e o MDS é gerado pelos pontos dos objetos que estão na superfície, como edifícios e árvores (BALTSAVIAS, 1999). Assim, o MDS pode ser aplicado em análises de alturas de objetos em ambientes urbanos (HAALA e BRENNER, 1999). Os dados provenientes de laser scanner podem ser aplicados ao mapeamento da superfície, à geração de mapas tridimensionais, à detecção de mudanças na superfície (VOSSSELMAN et al., 2005) e à reconstrução de objetos urbanos (HAALA e BRENNER, 1999).

4 ANÁLISE DO CRESCIMENTO HORIZONTAL NA ÁREA URBANA DE PORTO ALEGRE

Foram selecionadas cenas do sensor TM do satélite Landsat 5 com aquisição em dia de céu claro (*i.e.*, sem cobertura de nuvens no município de Porto Alegre), com alto ângulo de elevação (HAERTEL et al., 2004) (e que estes ângulos tivessem valor semelhante em mais de uma data), com precipitação acumulada (SOUSA e FERREIRA, 2012; SCOTTÁ e FONSECA, 2013) e com insolação semelhantes (nos dias que antecederam a aquisição das cenas). Essas condições foram estabelecidas para minimizar erros na análise multitemporal.

Uma imagem com cobertura de nuvens contém pixels com altos valores de DN, representando as nuvens, e com baixos valores de DN, representando a sombra gerada pelas nuvens. Small (2002) mostra que as nuvens alteram o espaço de mistura espectral, em especial na definição dos valores de alto albedo. De acordo com os autores, a presença de nuvens provoca uma mistura espectral que contém uma fração atmosférica e não uma mistura de alvos somente de superfície. Por isso, as frações geradas com a presença de nuvens podem conter dados errôneos.

Quanto ao ângulo de elevação, Haertel et al. (2004) considera altos valores de elevação solar os ângulos entre 42 e 55 graus. Conforme os autores, altos valores de elevação solar minimizam o efeito das sombras. Com isso, espera-se uma geração de frações adequada, sem causar estimativas equivocadas para nenhum alvo.

Por último, é importante que os alvos estejam em condições físicas e químicas semelhantes. Sousa e Ferreira (2012) advertem para a ocorrência de alteração na resposta espectral dos alvos caso seja registrada chuva nos dias que antecedem a aquisição da imagem. Scottá e Fonseca (2013) mostram correlações entre parâmetros meteorológicos e índice de vegetação, indicando que variações nesses parâmetros provocam diferenças na resposta espectral da vegetação.

As imagens que satisfizeram as condições anteriormente citadas, para comparação multitemporal, são apresentadas na Tabela 4.1. Nessa tabela também são

apresentados os valores de precipitação pluvial e insolação acumulada nos 7 (sete) dias que antecederam a aquisição das imagens utilizadas na análise. As cenas selecionadas foram registradas utilizando uma imagem do ano de 2000, georreferenciada a partir de uma composição 345 do Landsat 5 TM, de 22/11/2000. Essa imagem base foi georreferenciada utilizando-se 290 pontos de controle extraídos de cartas topográficas, resultando em um erro médio quadrático de 2,184.

Tabela 4.1. Imagens selecionadas para a análise do crescimento horizontal da área urbana de Porto Alegre. Os valores de elevação solar, de erro médio quadrático (RMS) do registro da imagem e o número de pontos utilizados no registro estão dispostos na tabela. * valores em grau decimal. ** valores em pixel. *** valores em milímetros da precipitação pluvial acumulada nos 7 dias que antecederam a aquisição da imagem.

Data	Elevação Solar*	RMS Registro**	Pontos de Controle	Insolação (horas)	Precipitação Pluvial Acumulada***
21/10/1991	50,9494	0,602605	53	49	0,2
27/10/1999	54,8211	0,504576	55	44,6	0,5
03/10/2008	49,9385	0,467925	41	50,1	3,1

Após selecionadas e registradas, as imagens passaram por transformação radiométrica, convertendo-se os valores de DN para valores de reflectância no topo da atmosfera. Para tanto, foram utilizadas as Equação 3 e Equação 4 e os parâmetros de transformação apresentados na Tabela 4.2. Aplicou-se, aos recortes, o MLME (método CLS), utilizando-se o programa SPRING 5.2.5 para tal procedimento.

Tabela 4.2. Parâmetros para transformação dos valores de DN para reflectância aparente. (*) Valores para as bandas 1 e 2 para imagens adquiridas entre 1984 e 1991. (**) Unidade de $L_{MIN\lambda}$ e $L_{MAX\lambda}$ é $W/(m^2 sr m)$. (***) Unidade de $ESUN\lambda$ é $W/(m^2 m)$. Fonte: Chander et al. (2009).

Banda (TM)	$L_{MIN\lambda}$ **	$L_{MAX\lambda}$ **	$ESUN\lambda$ ***
1	-1,52	169	1983
1*	-1,52	193	1983
2	-2,84	333	1796
2*	-2,84	365	1796
3	-1,17	264	1536
4	-1,51	221	1031
5	-0,37	30,2	220,0
7	-0,15	16,5	83,44

Não foram realizadas correções atmosféricas nos dados. Song et al. (2001) mostram que é desnecessário aplicar correção atmosférica nas imagens que serão classificadas em uma mesma data ou que sejam utilizadas em classificação multidata,

i.e. gerar uma classificação a partir de bandas e/ou imagens de diferentes datas. Como as bandas possuem o mesmo efeito atmosférico em todos os pixels, retirar esse efeito é apenas diminuir um valor constante dos pixels. Trabalhos utilizando análise de mistura espectral, em ambientes naturais e urbanos, não realizam correção atmosférica nas imagens utilizadas (SMALL e LU, 2006; VAN DE VOORDE et al., 2008; DAWELBAIT e MORARI, 2012; DENG e WU, 2013). Wu (2004) considera desnecessária a correção atmosférica, pois os efeitos contidos na imagem não afetam os resultados obtidos.

O MLME foi aplicado a um conjunto de dados obtidos em uma mesma data. Assim, mesmo que a imagem contenha efeito aditivo, já que para os dados do Landsat TM o efeito atmosférico dominante é o espalhamento, que causa uma adição no sinal, enquanto o efeito multiplicativo da absorção pode ser desprezado, visto que as bandas do sensor TM foram selecionadas para evitar os efeitos da absorção (SONG et al., 2001), esse efeito afeta igualmente todos os pixels das bandas. Dessa forma, ao calcular os mínimos quadrados, o modelo contém valores igualmente afetados pela atmosfera, tornando a correção atmosférica desnecessária.

Os alvos escolhidos para a geração de imagens-fração foram solo, sombra e vegetação, selecionando-se *endmembers* a partir de uma composição colorida 543. Após a análise dos gráficos da resposta espectral dos *endmembers* nas bandas do visível e do infravermelho próximo e médio, optou-se pela utilização das bandas 4, 5 e 7 para o cálculo de estimativas de fração através do MLME. A escolha dessas bandas deve-se à maior separabilidade espectral entre os alvos (*i.e.*, maior diferença entre os valores de reflectância aparente dos *endmembers* em uma mesma banda), como pode ser visto na Figura 4.1. Analisando a Figura 4.1, é possível notar o comportamento espectral similar de sombra e vegetação nas bandas 1, 2 e 3 (visível). A partir da banda 4, os valores de cada *endmember* mostram maior diferença.

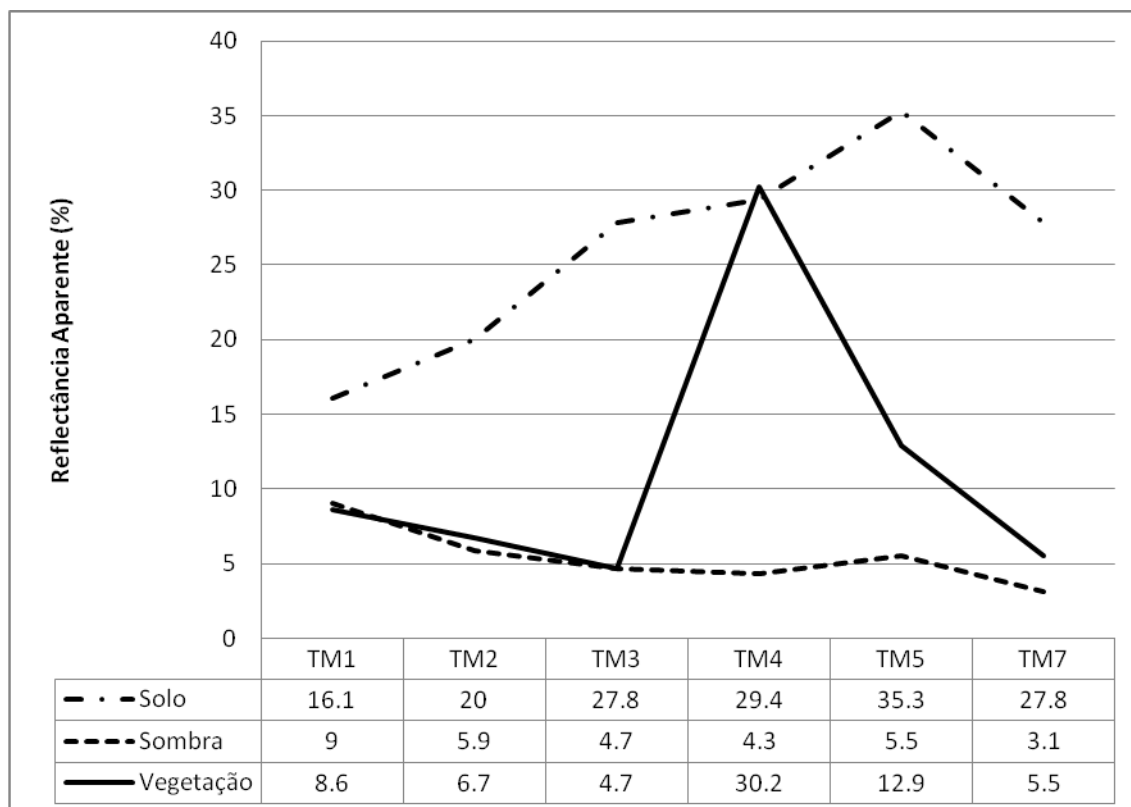


Figura 4.1. Gráfico apresentando os valores de reflectância aparente dos *endmembers* para cada banda espectral do sensor TM do Landsat 5. Valores referentes à imagem de 21/10/1991.

Após o processamento, as frações solo das três datas (1991, 1999 e 2008) foram analisadas (Figura 4.2). Observando a Figura 4.2 é possível perceber uma alteração nos percentuais da fração solo ao longo dos anos. Em 1991, os valores da fração solo são maiores, contrastando com os valores mais estáveis entre 1999 e 2008. Essa mudança ao longo dos anos pode estar associada à degradação do sensor, causando diferenças nos valores das frações calculadas (SMALL, 2002) para duas ou mais datas. A metade norte do município conta com altos percentuais de fração solo, representando a parte mais urbanizada de Porto Alegre. Os bairros próximos ao Centro Histórico, contidos no Corredor de Urbanidade e na Cidade Radiocêntrica (retângulo vermelho na figura 4.2), apresentam um percentual de solo mais baixo, quando comparados aos demais bairros com densa ocupação urbana. Esses valores mais baixos podem estar associados ao envelhecimento dos materiais urbanos, causado pelo tempo de vida do alvo (*e.g.*, asfalto novo e asfalto antigo, calçadas de concreto novas e calçadas antigas) (HEROLD et al., 2004), ao sombreamento da superfície pelas construções verticais (RASHED et al., 2001), ou à troca dos materiais com maior albedo (*e.g.*, solo exposto, concreto, telhados metálicos) por materiais com menor albedo (*e.g.*, asfalto e telhas escuras) (HEROLD et al., 2004).

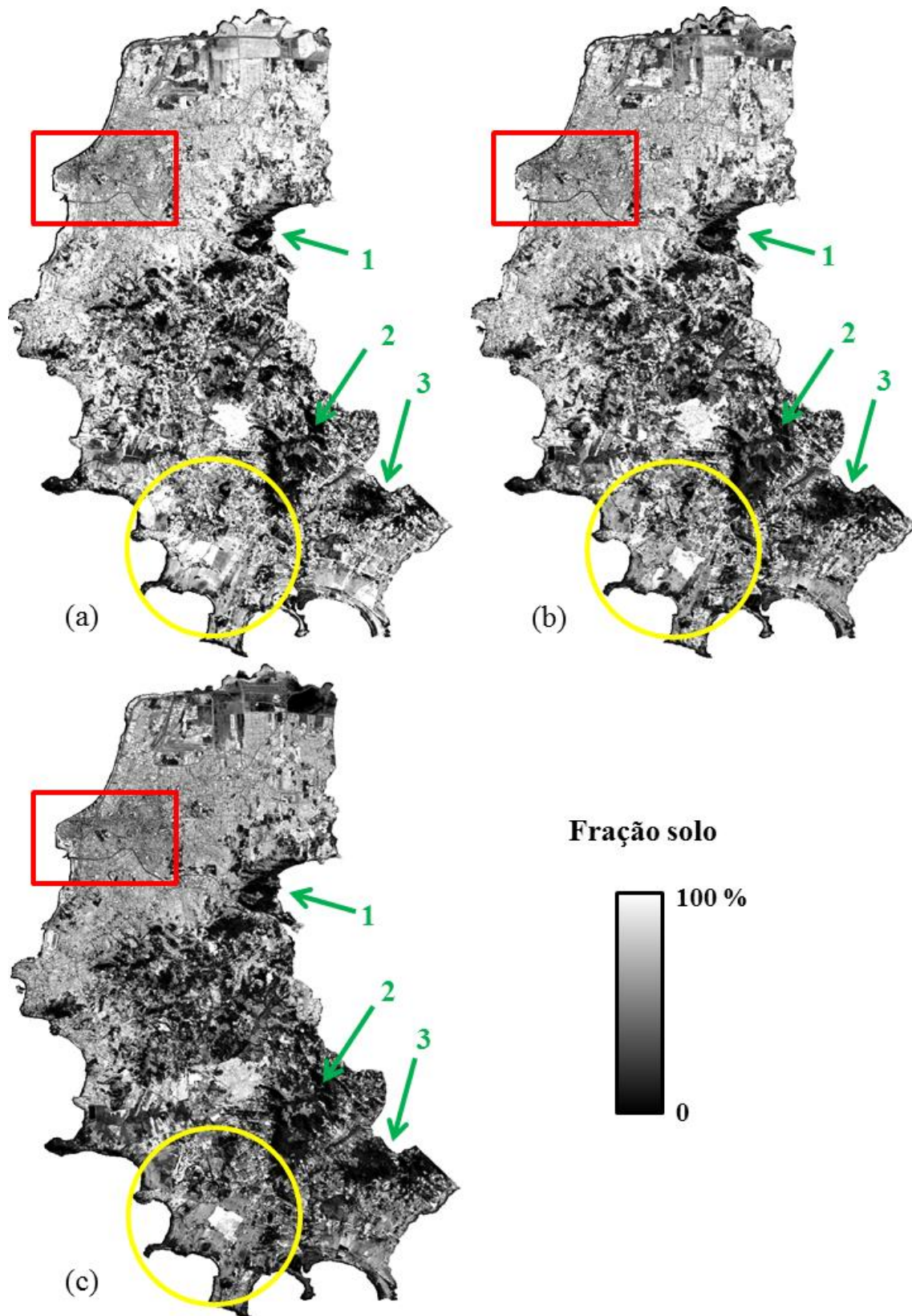


Figura 4.2. Imagens-fração solo para as datas (a) 21/10/1991, (b) 27/10/1999 e (c) 03/10/2008. O retângulo vermelho indica a região do Centro Histórico, do Corredor de Urbanidade e da Cidade Radiocêntrica. O círculo amarelo mostra a porção sudoeste de Porto Alegre. As setas verdes indicam as encostas dos morros (1) Santana, (2) São Pedro e (3) da Extrema.

Na parte sul de Porto Alegre é possível perceber a diminuição dos percentuais de solo exposto ao longo dos anos, em especial, na porção sudoeste (círculo amarelo na figura 4.2). Essa alteração nas estimativas de solo exposto pode estar relacionada ao desenvolvimento da vegetação do local. Grondona et al. (2013) indicam atividades de reflorestamento na mesma região, o que também provocaria a baixa interação do substrato na mistura espectral. As manchas escuras nas imagens (setas verdes na figura 4.2), concentradas do centro para o sul do município, correspondem às encostas dos morros de Porto Alegre. A vegetação de matas/florestas ocorre nas encostas dos morros (HASENACK et al., 2008; MÜLLER et al., 2011) e, por ser tratar de árvores de grande porte, suas copas geram sombra e impedem a interação da radiação com o solo (SHIMABUKURO e SMITH, 1988). De forma geral, é possível considerar estável a vegetação das encostas entre 1991 e 2008, exceto pelo Morro da Extrema, no extremo sudeste do município, onde há uma diminuição nos valores de fração solo, indicando um aumento da vegetação no local.

Para identificar as áreas que sofreram expansão interna, *i.e.* preenchimento de vazios urbanos, ou expansão externa, foi analisada uma imagem gerada a partir da razão das imagens-fração de 2008 e 1991. A partir desta imagem razão, aglomerados de aumento na fração solo foram analisados, buscando identificar as áreas onde ocorreu expansão horizontal da área urbana (Figura 4.3). Para melhor avaliar os resultados obtidos na identificação dos locais de crescimento urbano, o número de domicílios por bairro, proveniente dos dados dos censos de 2000 e de 2010, foram utilizados com o intuito de comparar os resultados com dados de uso e ocupação do solo. Verificando os dados da imagem razão gerada e os dados do censo, foram selecionadas 10 regiões para comparação entre crescimento da fração solo e aumento no número de domicílios. As áreas selecionadas são: (1) Aeroporto Internacional Salgado Filho; (2) Sarandi e Rubem Berta; (3) Mário Quintana e Passo das Pedras; (4) Boa Vista, Passo da Areia e Três Figueiras; (5) Bom Jesus, Jardim Carvalho e Partenon; (6) Lomba do Pinheiro; (7) Restinga; (8) Hípica; (9) Espírito Santo, Guarujá e Serraria; e (10) Belém Novo. Cada uma dessas áreas será apresentada em detalhe, e composições coloridas 543 e as frações solo para 1991, 1999 e 2008.

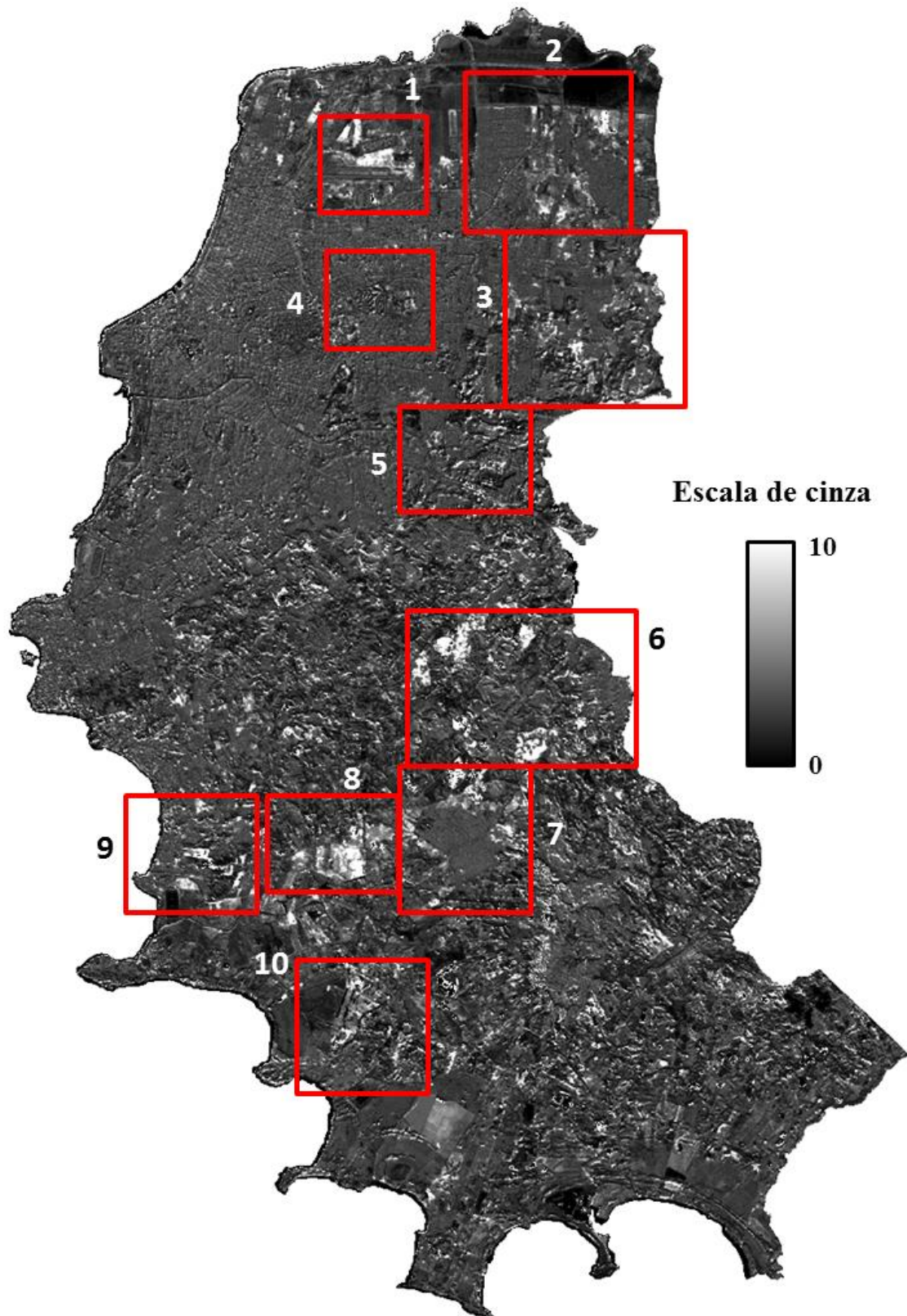


Figura 4.3. Imagem razão entre as frações solo de 2008 e de 1991. Os quadros vermelhos correspondem às regiões selecionadas, quais sejam: (1) Aeroporto Internacional Salgado Filho; (2) Sarandi e Rubem Berta; (3) Mário Quintana e Passo das Pedras; (4) Boa Vista, Passo da Areia e Três Figueiras; (5) Bom Jesus, Jardim Carvalho e Partenon; (6) Lomba do Pinheiro; (7) Restinga; (8) Hípica; (9) Espírito Santo, Guarujá e Serraria; e (10) Belém Novo.

O aumento na fração solo na região do Aeroporto Internacional Salgado Filho (figura 4.4) está associado à construção de novo terminal de passageiros. As obras foram iniciadas em 1997 e inauguração ocorreu em setembro 2001 (INFRAERO, 2014). Assim, pode-se observar a evolução da área do terminal de passageiros: em 1991 havia cobertura vegetal (campo), passando para solo totalmente exposto, em 1999, e transformando-se em área construída e com solo exposto, em 2008.

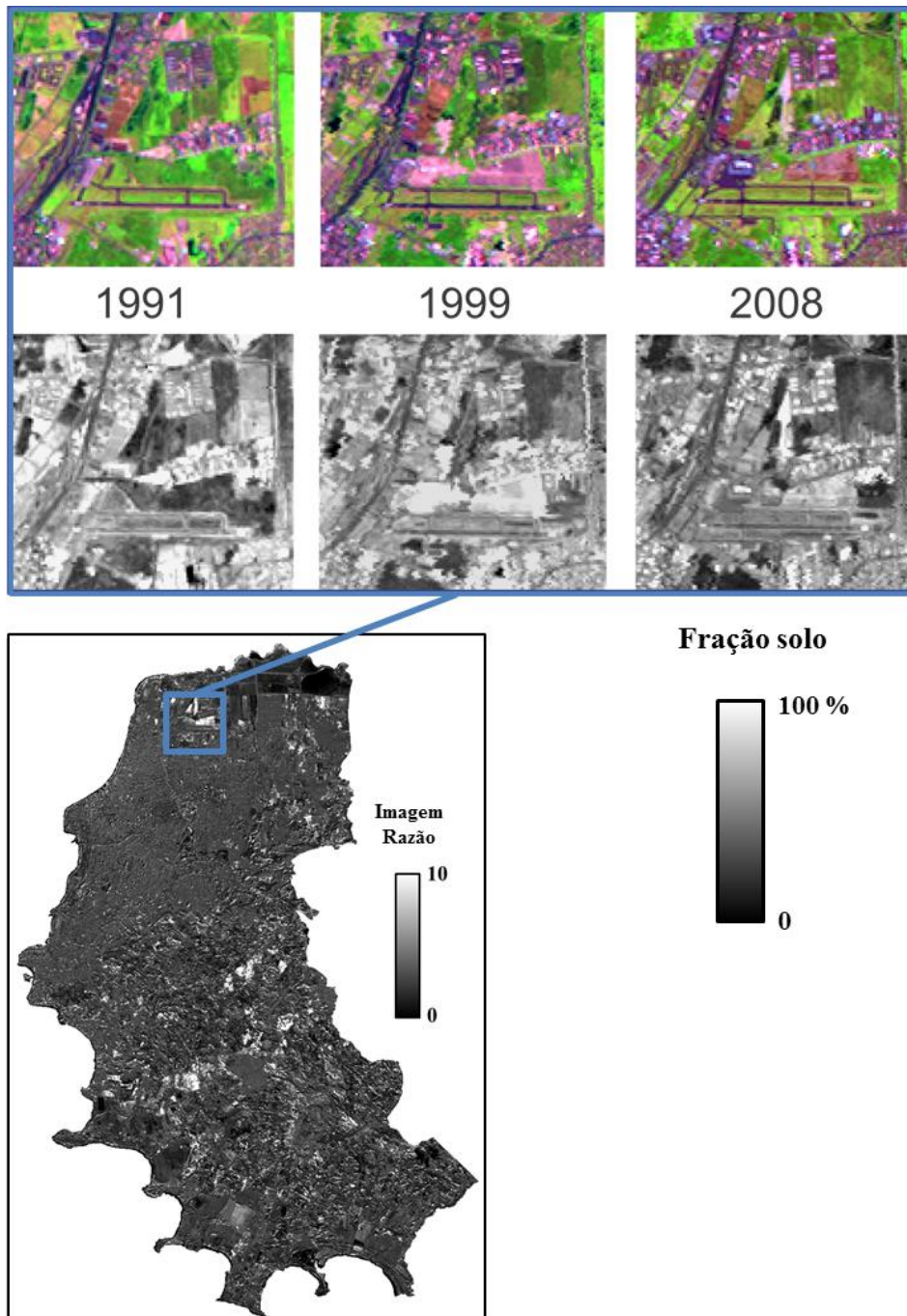


Figura 4.4. Aumento da fração solo na região do Aeroporto Internacional Salgado Filho.

A Figura 4.5, mostra o crescimento da área urbana dos bairros Sarandi e Rubem Berta em direção ao limite entre esses dois bairros. Ainda, é possível acompanhar o crescimento da porção norte do bairro Sarandi na direção oeste. O bairro Rubem Berta apresenta crescimento nas direções oeste, sudoeste e sul, e a região com ocupação urbana desde 1991 mostrou uma diminuição nos valores da fração solo. Essa diminuição pode estar associada à troca de materiais com alto albedo por materiais com menor albedo (*e.g.*, rua não pavimentada e asfalto).

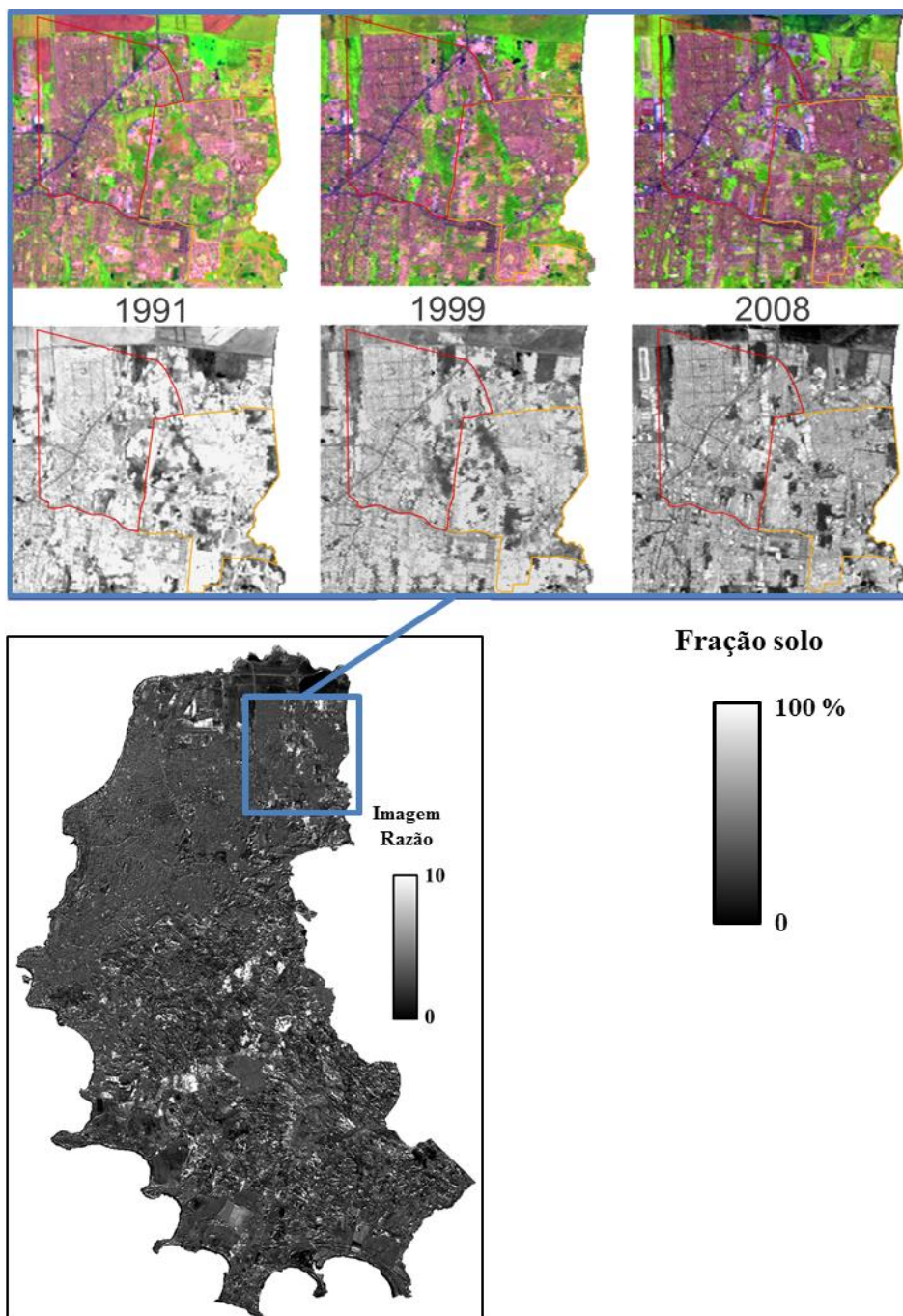


Figura 4.5. Crescimento da fração solo nos bairros Sarandi (vermelho) e Rubem Berta (laranja).

Analisando os dados dos censos de 2000 e de 2010, os bairros Rubem Berta e Sarandi foram, respectivamente, o segundo e o nono colocado, dentre os bairros definidos pelo IBGE, no aumento no número de domicílios (Tabela 4.3). Na Tabela 4.3 são listados, apenas, os 20 bairros com maior crescimento. O IBGE realizou o levantamento em 78 bairros, em 2010.

Tabela 4.3. Bairros de Porto Alegre com o maior crescimento no número de domicílios entre os censos de 2000 e 2010. Fonte: IBGE (2011).

Posição	Bairro	Censo		Diferença
		2000	2010	
1	Lomba do Pinheiro	8434	15811	7377
2	Rubem Berta	23243	28747	5504
3	Petrópolis	13172	16537	3365
4	Centro Histórico	17254	20017	2763
5	Vila Nova	9953	12289	2336
6	Mário Quintana	5987	8247	2260
7	Menino Deus	11495	13458	1963
8	Rio Branco	7319	9191	1872
9	Sarandi	18391	20037	1646
10	Restinga	13421	14944	1523
11	Jardim Itu-Sabará	9745	11201	1456
12	Lageado	1017	2450	1433
13	Farrapos	4814	6151	1337
14	Partenon	14899	16180	1281
15	Tristeza	5009	6212	1203
16	Ponta Grossa	1011	2182	1171
17	Bela Vista	3355	4496	1141
18	Cidade Baixa	7821	8892	1071
19	Teresópolis	3950	5006	1056
20	Higienópolis	3396	4423	1027

Conforme Barcellos (2004), o bairro Sarandi passa por uma transformação de bairro popular e operário para ambiente socialmente diversificado, com aumento do valor de venda dos imóveis. Conforme a mesma autora, o Rubem Berta é caracterizado por famílias de renda mais baixa, sendo estes bairros os que registram um aumento no número de casas. Isso corrobora com o aumento detectado nas frações solo entre 1991 e 2008 para este bairro.

Os bairros Mário Quintana e Passo das Pedras (Figura 4.6.) sofreram grande crescimento horizontal. De acordo com Barcellos (2004), Mário Quintana foi o bairro com maior crescimento populacional na década de 1990.

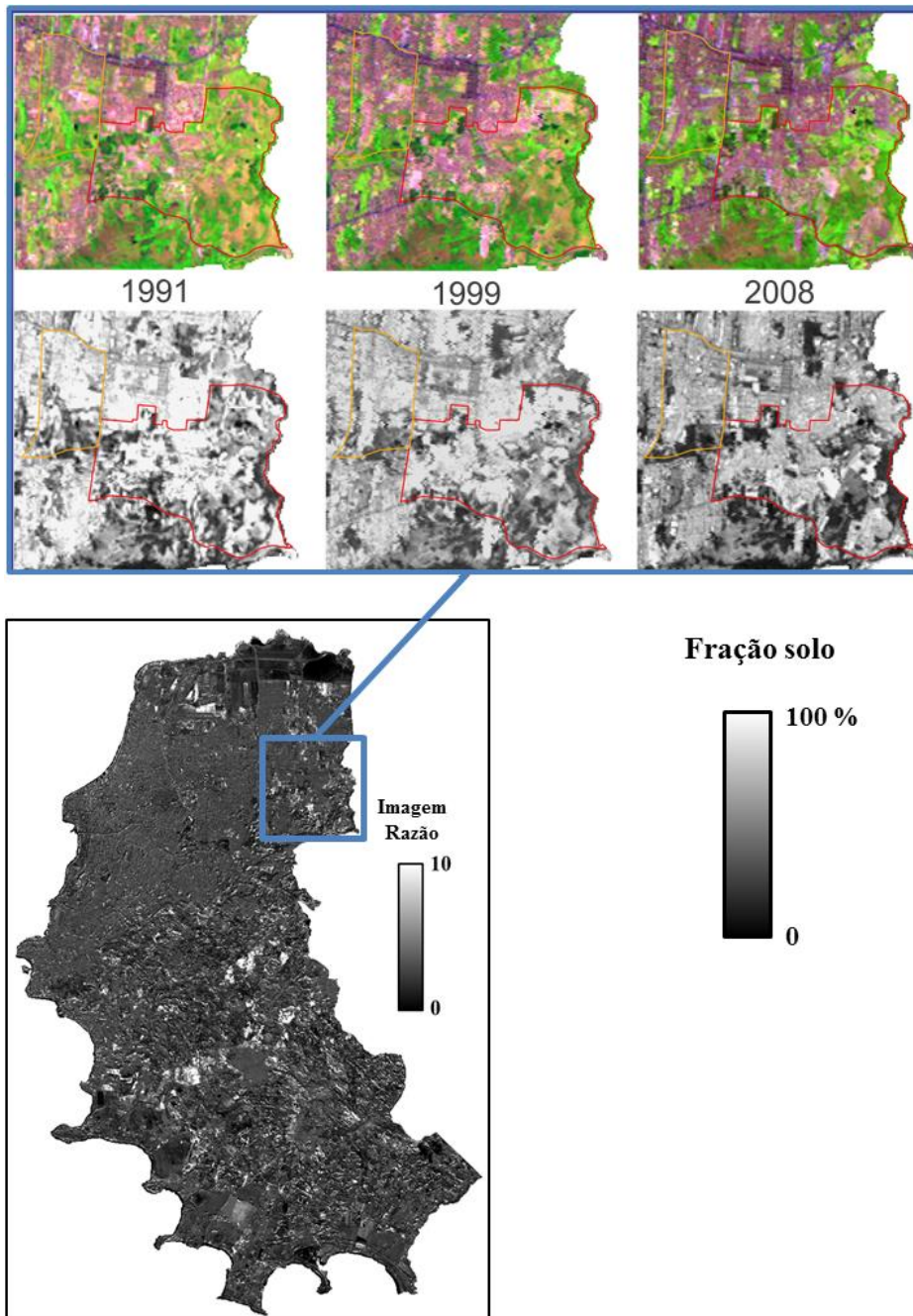


Figura 4.6. Fração solo nos bairros Mário Quintana (vermelho) e Passo das Pedras (laranja).

Na Figura 4.6., é possível acompanhar o crescimento urbano nas direções nordeste e sul/sudoeste, mais intenso entre 1991 e 1999 e, entre 1999 e 2008, continua a ocupação nas mesmas direções, mas com menor intensidade. De acordo com os dados do IBGE, censos de 2000 e 2010, esse bairro ocupa a sexta posição dentre os bairros com maior aumento no número de domicílios. Ainda sobre o Mário Quintana, Barcellos (2004) comenta que o bairro compõe um grupo de bairros periféricos, com pouca infraestrutura urbana e oferta de serviços, sendo a moradia em casas quase exclusiva.

Essa colocação da autora, a respeito da infraestrutura, pode ser interpretada, nas imagens, através dos valores mais altos da fração solo em 1991 e 1999, evidenciando o uso de materiais com maior albedo. Em 2008, nota-se uma diminuição nas frações solo e formas geométricas mais definidas nas áreas com ocupação urbana, mostrando uma organização maior nos novos loteamentos e o uso de materiais com menor albedo.

O bairro Passo das Pedras teve um crescimento na direção sul, mais intenso na década de 1990 e com menor intensidade entre 1999 e 2008 (Figura 4.6.). Conforme Barcellos (2004), o Passo das Pedras registrou, na década de 1990, aumento populacional acima da média da Região Metropolitana de Porto Alegre. Analisando a tabela 4.3, percebe-se que esse bairro não está entre os 20 bairros com maior crescimento no número de domicílios. Assim, avaliando as informações de Barcellos (2004) e dos censos do IBGE e comparando com as frações solo de 1991, 1999 e 2008, observa-se total concordância entre os resultados e as informações de uso e ocupação do solo.

Os bairros Passo da Areia, Boa Vista e Três Figueiras (Figura 4.7) passaram por transformações causadas pela implantação do Shopping Center Iguatemi (KOCH, 2004). O mercado imobiliário tem explorado os bairros no entorno do Shopping Iguatemi (BARCELLOS, 2004), motivado pela oferta de serviços. É possível observar, na Figura 4.7, um avanço da área urbana do bairro Três Figueiras sobre um vazio urbano, localizado do centro para oeste do referido bairro, com ocupação gradual entre 1991 e 2008. Koch (2004) relata explosão imobiliária nos bairros Boa Vista e Três Figueiras na década de 1990, com expansão em vazios urbanos e o surgimento de condomínios residenciais.

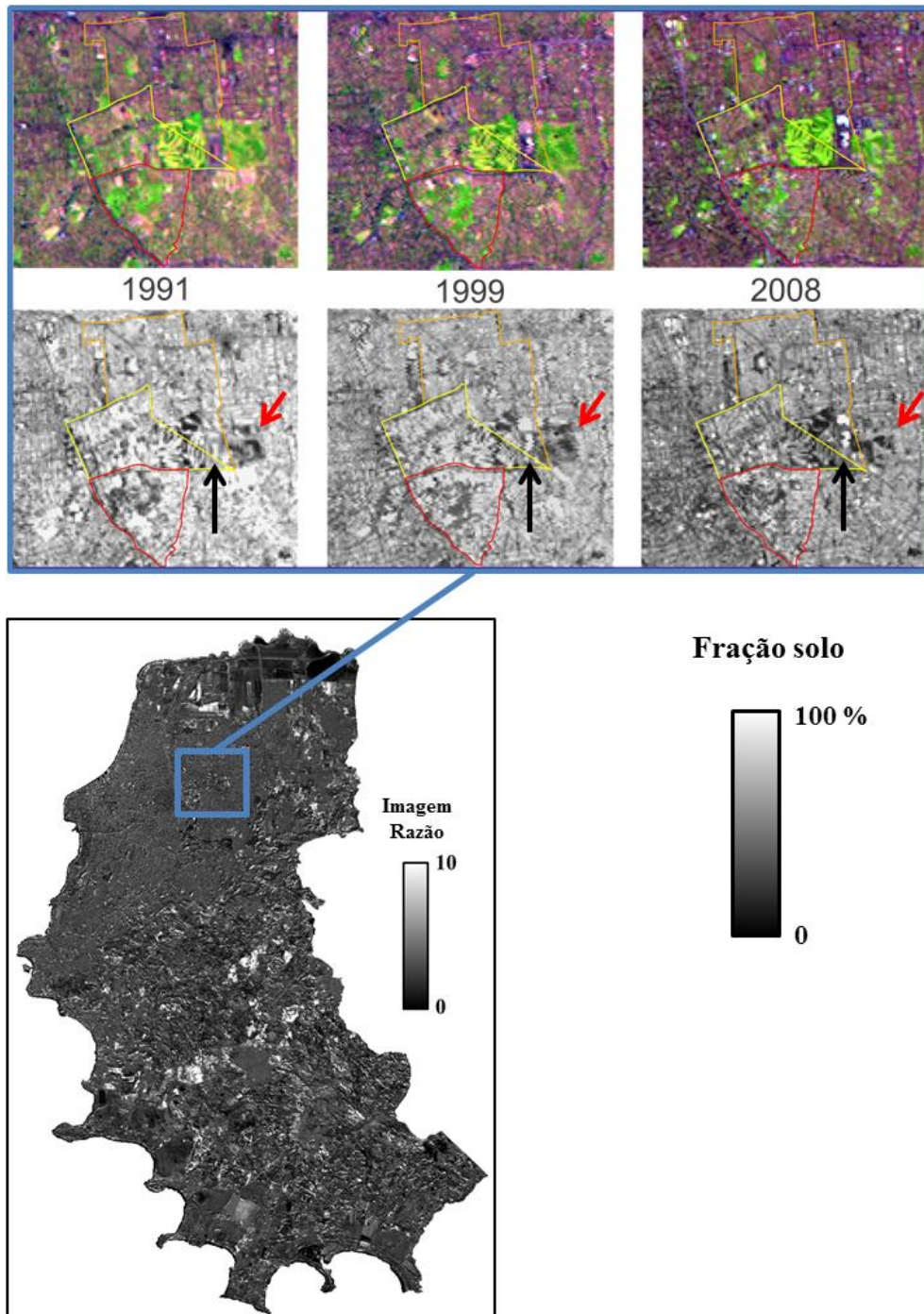


Figura 4.7. Expansão em vazios urbanos na região dos bairros Passo da Areia (laranja), Boa Vista (amarelo) e Três Figueiras (vermelho). A seta vermelha indica o surgimento bairro planejado Jardim Europa. A seta preta indica os Shoppings Iguatemi e Bourbon Country.

No extremo sul do bairro Passo da Areia, nota-se, entre 1991 e 1999 o surgimento de duas áreas mais claras, em formatos retangulares (seta preta na figura 4.7). A área mais ao sul corresponde ao Shopping Iguatemi, que sofreu expansão em 1997 (IGUATEMI, 2014). Acima, está o shopping Bourbon Country, inaugurado em 2001 (ZAFFARI, 2014). Ao lado dos shoppings, na direção leste, percebe-se o avanço

da área urbana sobre um vazio urbano, entre 1999 e 2008 (seta vermelha na figura 4.7). Essa região corresponde ao Jardim Europa, previsto no início dos anos 2000 (Koch, 2004), e hoje é um bairro planejado com um parque integrado (GOLDZSTEIN, 2014).

Na Figura 4.8 são apresentados os bairros Bom Jesus (amarelo), Jardim Carvalho (laranja) e parte do bairro Partenon (vermelho). É possível perceber o preenchimento de um vazio urbano, no bairro Bom Jesus, bem no limite que este bairro faz com o Jardim Carvalho. Entre 1991 e 2008, nota-se o preenchimento de todo o Bom Jesus com ocupação urbana. O Jardim Carvalho apresenta crescimento gradual entre 1991 e 2008, em especial na direção sudeste e no extremo nordeste do bairro. Barcellos (2004) relata que, tanto o Bom Jesus quanto o Jardim Carvalho, apresentaram crescimento populacional superior à média do crescimento da Região Metropolitana de Porto Alegre e que estes bairros são caracterizados por moradia popular, quase exclusiva em casas. Quanto ao aumento no número de domicílios nestes bairros entre 2000 e 2010, os dados do censo mostram que o Jardim Carvalho foi o 33º e o Bom Jesus foi o 45º colocado na lista de bairros com aumento de domicílios nos últimos levantamentos censitários.

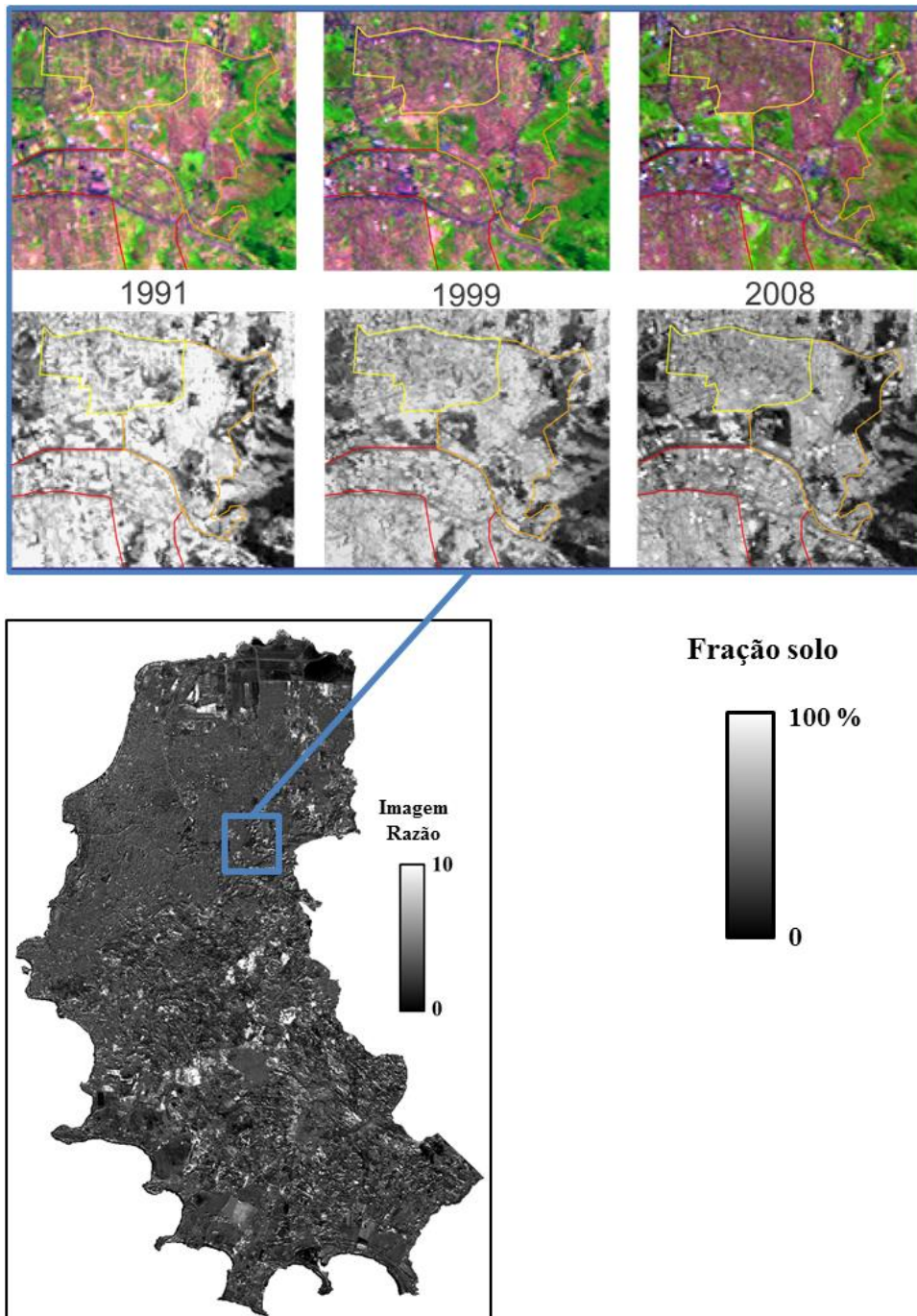


Figura 4.8. Bairros Bom Jesus (amarelo), Jardim Carvalho (laranja) e parte do Partenon (vermelho).

O bairro Lomba do Pinheiro (Figura 4.9), segundo bairro mais populoso de Porto Alegre (CABETTE e STROHAECKER, 2014), apresenta crescimento gradual da área urbana na direção norte (seta vermelha na figura 4.9) e no extremo oeste do bairro. Barcellos (2004) associa o Lomba do Pinheiro ao grupo de bairros que teve crescimento populacional acima da média da Região Metropolitana, na década de 1990, e que grande parte desse crescimento está vinculado às moradias populares.

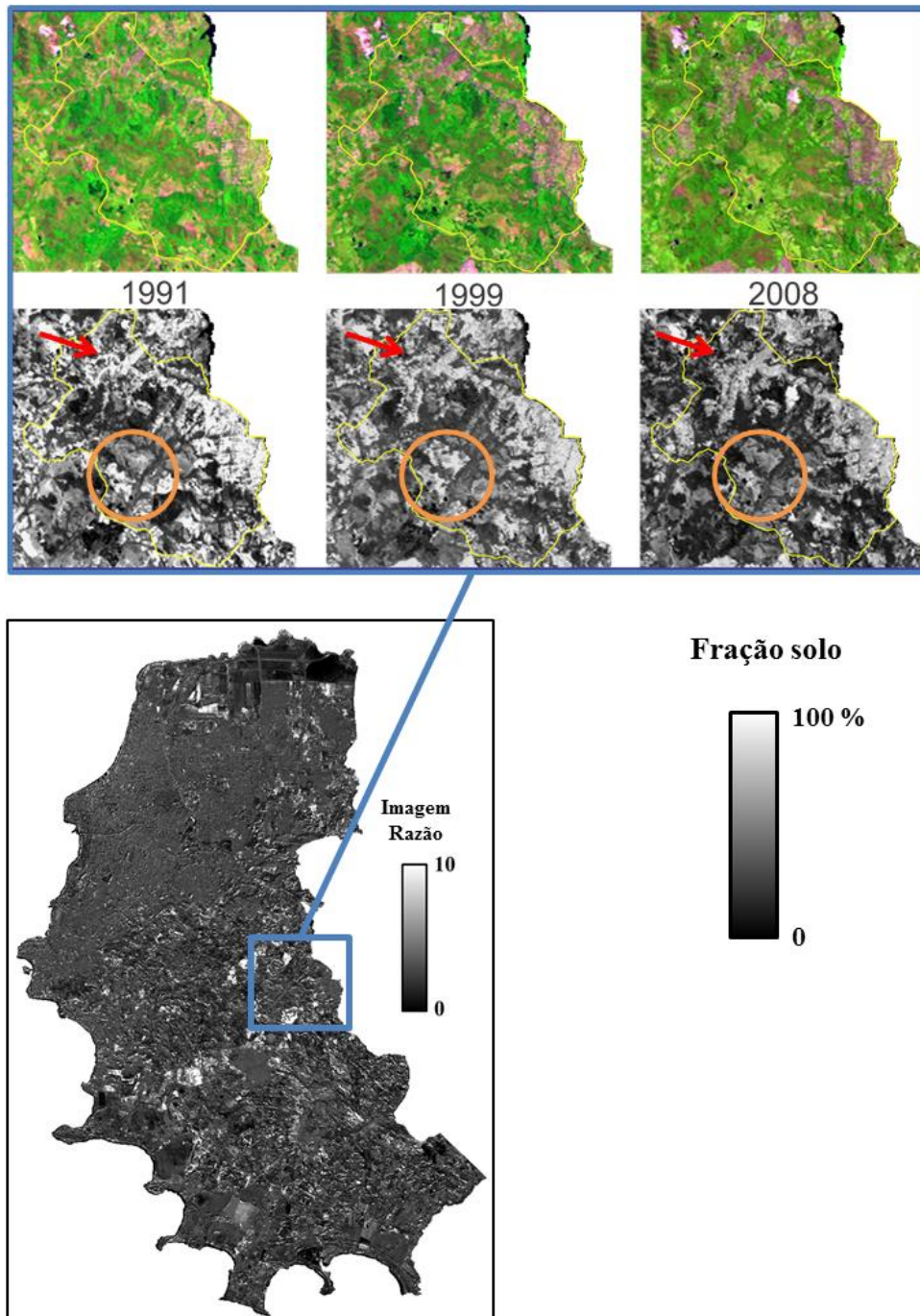


Figura 4.9. Expansão urbana no bairro Lomba do Pinheiro. A seta vermelha indica área de expansão urbana. O círculo laranja mostra possível área de florestamento.

De acordo com os dados dos censos de 2000 e 2010 (Tabela 4.3), do IBGE, o bairro Lomba do Pinheiro foi o que teve o maior aumento no número de domicílios. Viegas et al. (2013) também mostraram crescimento horizontal na área urbana do bairro baseando-se em cenas Landsat-5 dos anos de 1986, 1997 e 2011. Esses dois dados corroboram com o crescimento detectado nas imagens apresentadas na Figura 4.9.

Cabette e Strohaecker (2014) apontam que os bairros Restinga e Lomba do Pinheiro têm a possibilidade de crescimento por possuírem vazios urbanos.

Comparando a sequência de composições coloridas e de fração solo, é possível perceber, na porção sudoeste do bairro Lomba do Pinheiro (círculo laranja na figura 4.9), áreas que mostram valores altos de solo em certas datas e que, em outras datas, possuem valores mais baixo. Esse comportamento pode estar associado à áreas de reflorestamento, citadas por Grondona et al. (2013). Assim, a fração solo oscila durante o crescimento da floresta, conforme as copas das árvores crescem e impedem gradualmente a mistura espectral da vegetação com o substrato (SHIMABUKURO e SMITH, 1988), e torna-se alta após o corte das árvores.

Na Figura 4.10. é apresentada a evolução do crescimento horizontal da área urbana do bairro Restinga. É possível notar o crescimento do núcleo urbano em todas as direções. Restinga é o bairro mais populoso da capital (CABETTE e STROHAECKER, 2014) e, na década de 1990, apresentou crescimento populacional acima da média da Região Metropolitana de Porto Alegre (BARCELLOS, 2004). É registrado um aumento populacional no bairro no final da primeira década dos anos 2000, promovido pelos empreendimentos populares ligados ao Programa Federal Minha Casa Minha Vida e pela realocação de famílias removidas de outras vilas (CABETTE e STROHAECKER, 2014). Esse aumento, citado pelas autoras, é também identificado nos dados censitários do IBGE (Tabela 4.3), que mostram que o bairro Restinga foi o 10º colocado no aumento no número de domicílios na capital. Viegas et al. (2013) também apresentaram crescimento da área urbana no bairro Restinga.

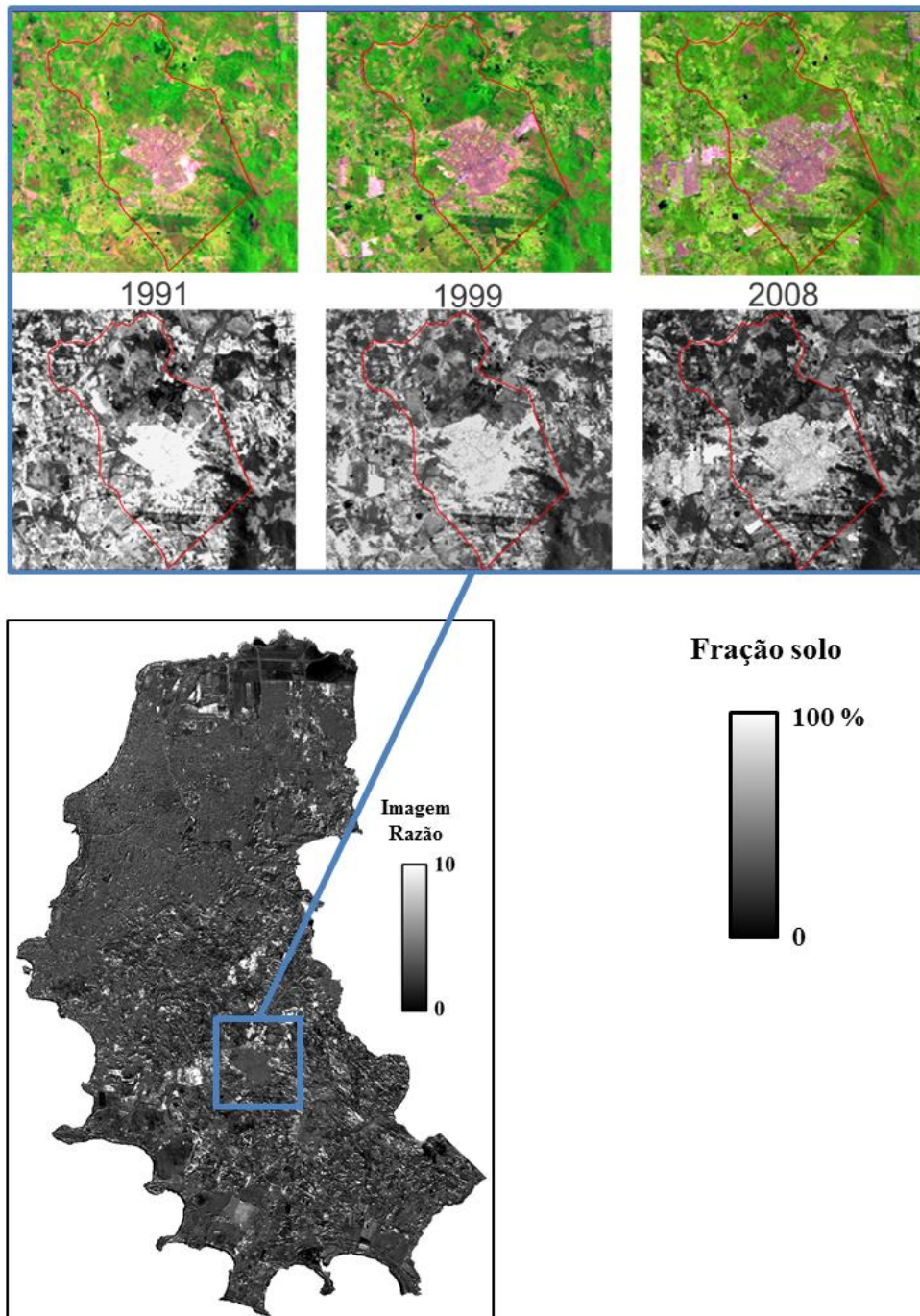


Figura 4.10. Fração solo no bairro Restinga.

Na Figura 4.11, é possível acompanhar a expansão da área urbana no bairro Hípica, vizinho do bairro Restinga. Entre 1991 e 1999 há um pequeno crescimento, que se torna mais intenso entre 1999 e 2008. A área urbanizada ocupa toda a parte central do bairro, se desenvolvendo no eixo leste-oeste (elipse vermelha na figura 4.11). Viegas et al. (2013) também registraram aumento da área urbana no bairro Hípica. Barcellos (2004) classifica os bairros da zona sul e extremo sul de Porto Alegre como áreas de

baixa densidade populacional. Por isso, são regiões de expansão urbana, onde surgem condomínios para a classe média. A porção norte do bairro Hípica apresenta variação nos valores da fração solo nas diferentes datas analisadas (seta laranja na figura 4.11). Ao longo do tempo, os valores de solo vão diminuindo, podendo indicar áreas de florestamento ou de recuperação da vegetação das encostas.

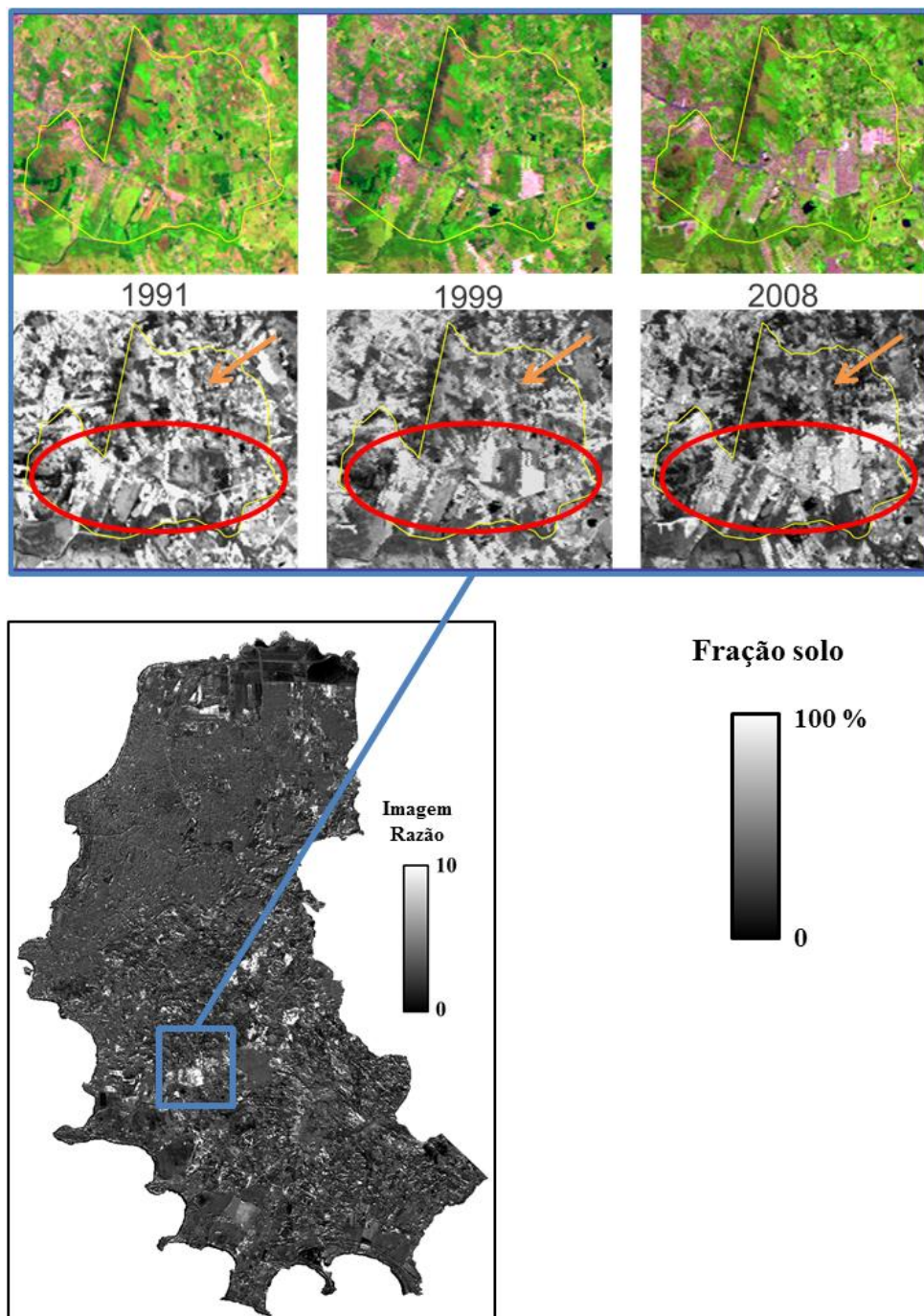


Figura 4.11. Fração solo no bairro Hípica. A elipse vermelha indica área de crescimento da ocupação urbana na porção central do bairro. A seta laranja mostra área de diminuição da fração solo ao longo dos anos.

Na região costeira da cidade, os bairros Espírito Santo, Guarujá e Serraria (Figura 4.12) também registraram aumento na fração solo entre 1991 e 2008. Comparando com outras regiões, esta área não teve grande expansão urbana, visto que esses bairros têm como característica casas e condomínios horizontais para a classe média. Nos círculos pretos, na figura 4.12, são mostradas áreas com expansão urbana. A seta azul indica o surgimento da Estação de Tratamento de Esgoto da Serraria, entre 1991 e 1999.

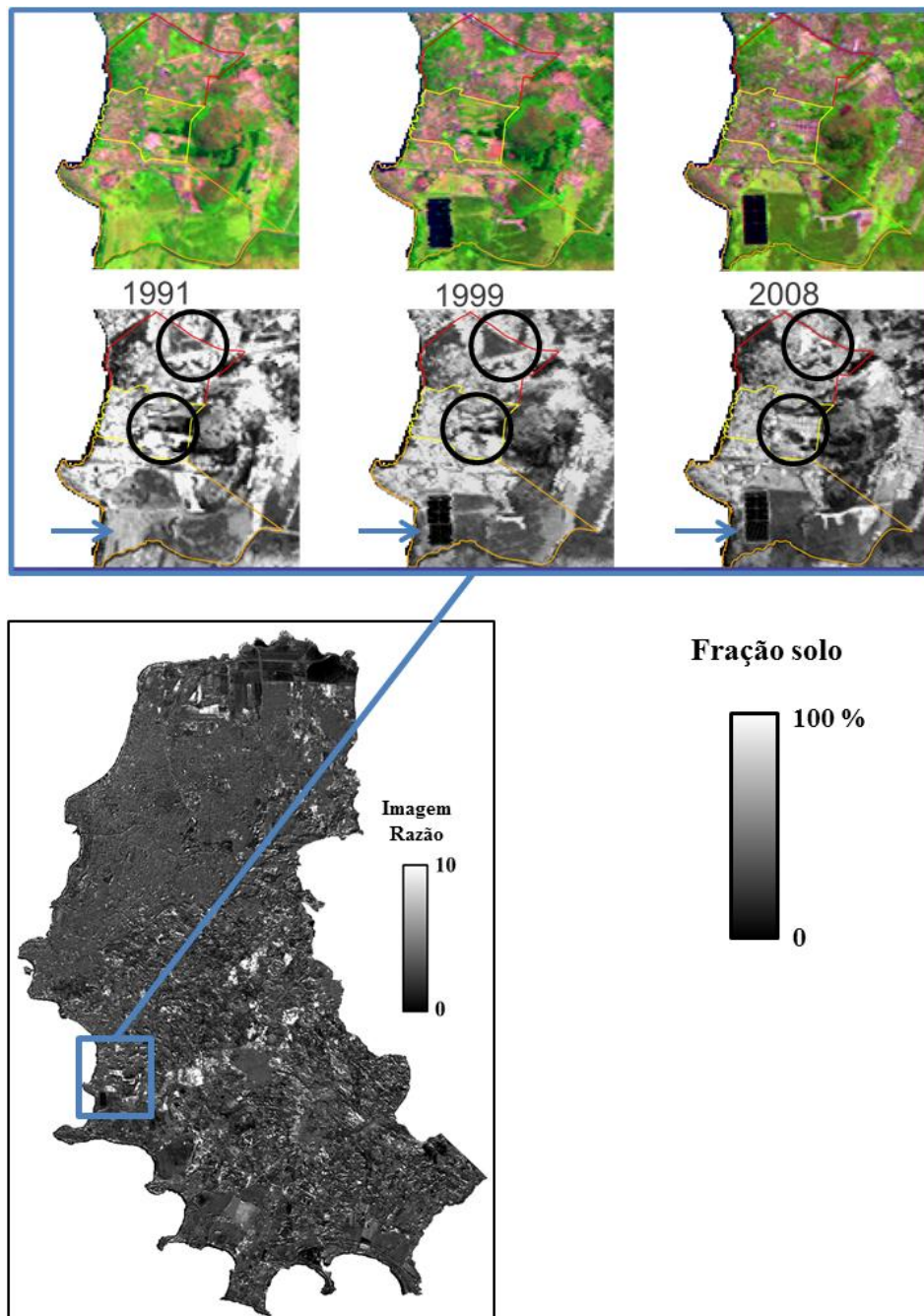


Figura 4.12. Bairros Espírito Santo (vermelho), Guarujá (amarelo) e Serraria (laranja). A seta azul indica a Estação de Tratamento de Esgotos da Serraria e os círculos pretos mostram as áreas com aumento na fração solo.

No extremo sul de Porto Alegre está o bairro Belém Novo (Figura 4.13). De acordo com Barcellos (2004), a região extremo sul foi a que registrou o segundo maior crescimento populacional na cidade, na década de 1990, ficando atrás, apenas, da região do bairro Mário Quintana. Conforme a autora, no Belém Novo encontrava-se imóveis com alto valor e padrão, evidenciando o surgimento de condomínios residenciais direcionados para as classes média e alta.

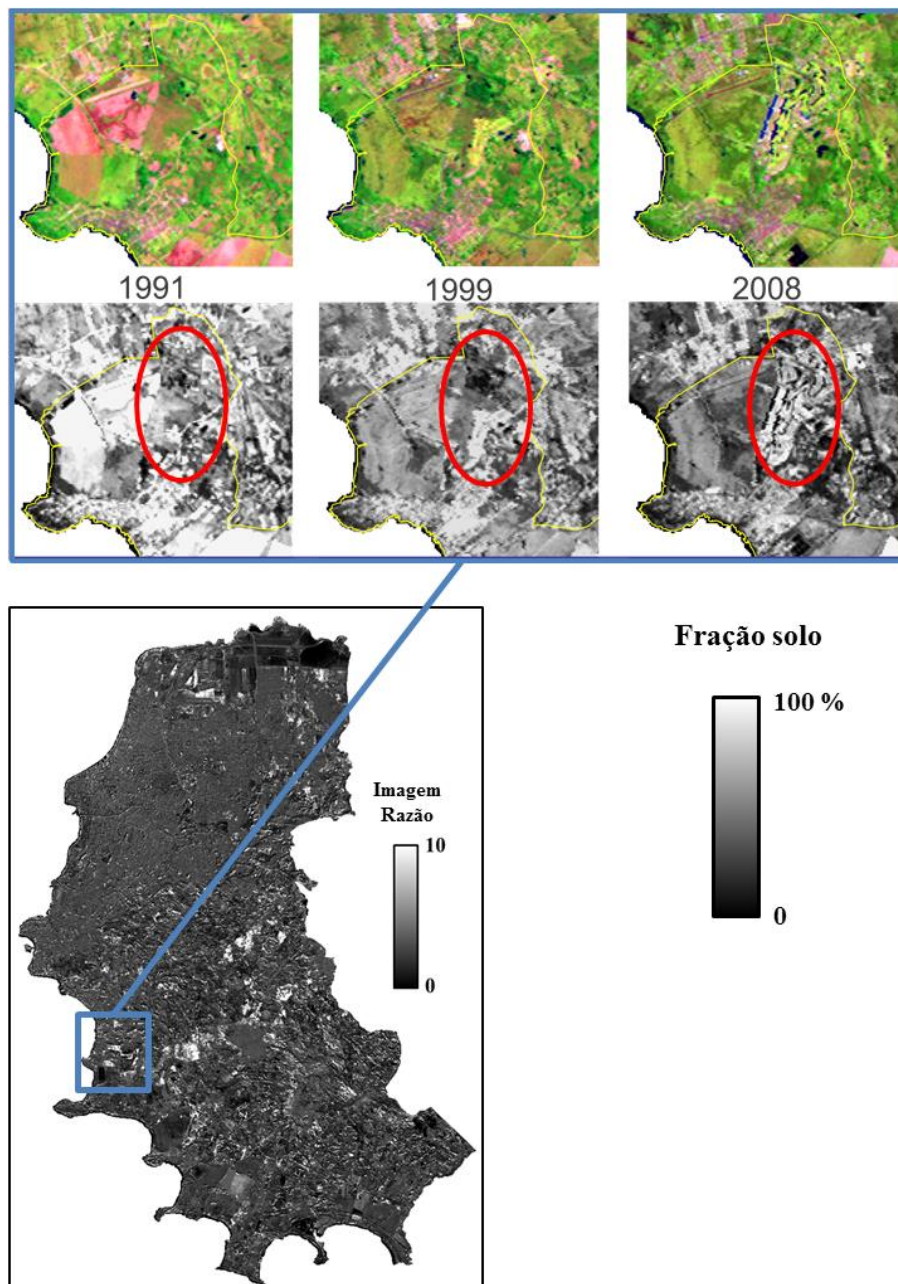


Figura 4.13. Porção oeste do bairro Belém Novo e o surgimento de condomínio de classe alta na região extremo sul de Porto Alegre.

Na Figura 4.13 é apresentada a porção oeste do bairro Belém Novo. Nota-se, na parte norte do bairro, o surgimento de uma área de solo exposto, entre 1999 e 2008. Esta

área corresponde ao Condomínio Terra Ville (elipse vermelha na figura 4.13), composto por residências construídas entre lagos e campo de golfe (TERRA VILLE, 2014).

Para quantificar o aumento no valor da fração solo em Porto Alegre, seis bairros foram selecionados. A seleção buscou bairros centrais e periféricos, de acordo com a divisão de Barcellos (2004), com camadas de mais alta e de mais baixa renda, que caracterizariam uma expansão horizontal ou uma verticalização. Os bairros selecionados foram: Bela Vista, Bom Jesus, Humaitá, Mário Quintana, Petrópolis e Três Figueiras (Figura 4.14).

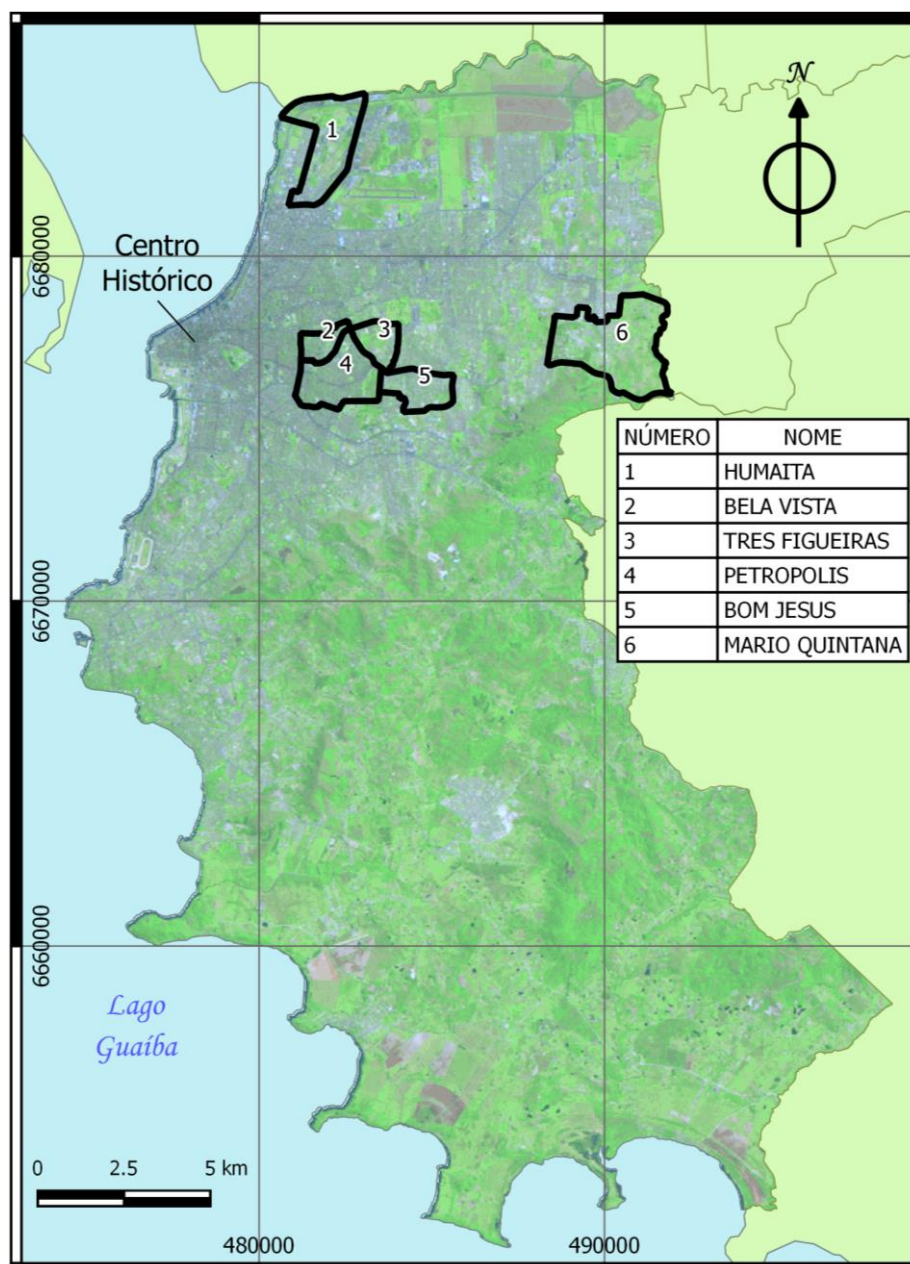


Figura 4.14. Mapa de localização dos bairros selecionados para análise quantitativa da fração solo.

Bela Vista e Petrópolis são bairros próximos do Centro Histórico, com intensa verticalização nos anos 1990 e 2000 e habitados por camadas com renda mais alta. Bom Jesus e Mário Quintana são bairros populares e caracterizam-se por moradias em casas. O bairro Humaitá é composto com moradia popular e crescimento acima da média da Região Metropolitana de Porto Alegre na década de 1990 (BARCELLOS, 2004). Por fim, o bairro Três Figueiras passou por uma transformação após a construção do Shopping Center Iguatemi (KOCH, 2004).

Os valores de média, desvio padrão e mediana, da fração solo, para os bairros selecionados são apresentados na Tabela 4.4 e, o gráfico, na Figura 4.15.

Tabela 4.4. Valores de média, desvio padrão e mediana, de fração solo, para os bairros selecionados

Bairro	Medida	1991	1999	2008
Bela Vista	Média	56,4	33,3	26,1
	Desvio Padrão	13,4	8,3	7,2
	Mediana	57	33	26
Bom Jesus	Média	63,5	40,5	35,3
	Desvio Padrão	13,3	6,8	6,5
	Mediana	66	41	36
Humaitá	Média	53,8	35,5	32,5
	Desvio Padrão	19,1	11,8	11,2
	Mediana	57	36	32
Mário Quintana	Média	56,3	37,9	33,6
	Desvio Padrão	20,0	12,3	14,0
	Mediana	58	40	37
Petrópolis	Média	51,6	32,8	27,7
	Desvio Padrão	12,4	8,1	8,6
	Mediana	52	33	29
Três Figueiras	Média	57,0	38,5	34,1
	Desvio Padrão	16,2	9,8	9,9
	Mediana	58	40	35

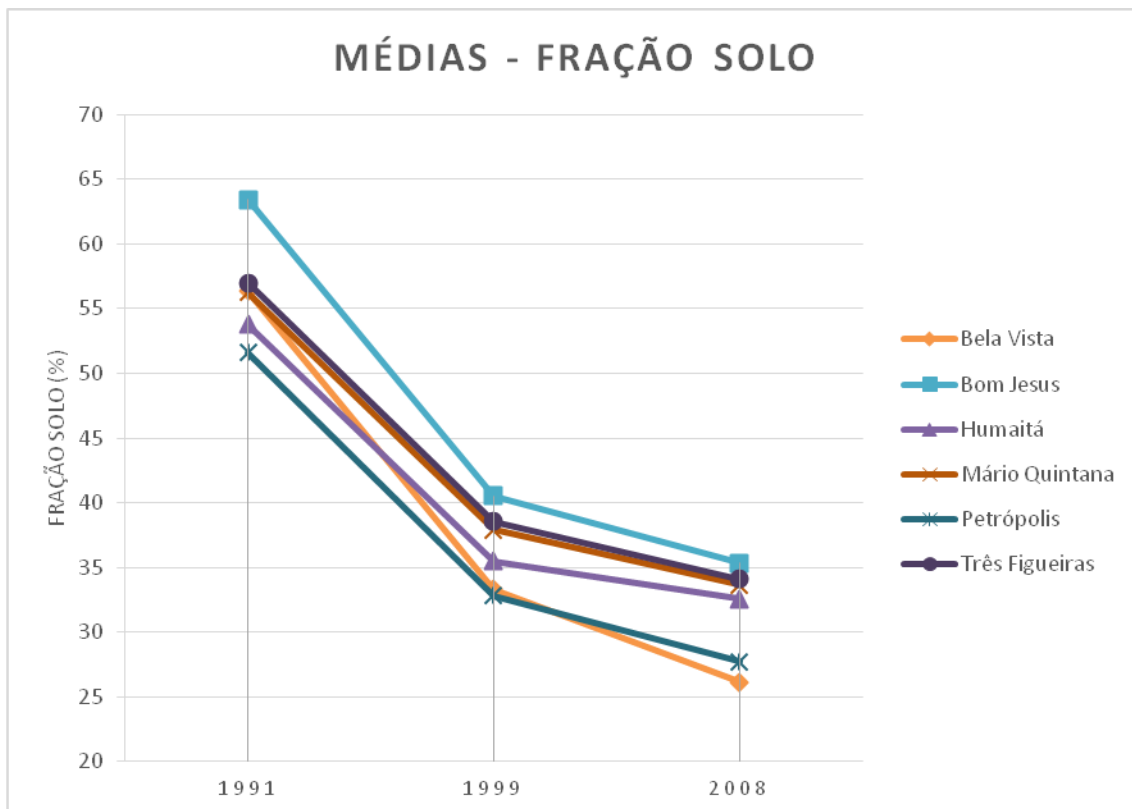


Figura 4.15. Valores de média da fração solo para os bairros selecionados.

Para escolher o teste estatístico para a comparação da distribuição dos dados entre os anos, é necessário testar a normalidade das variáveis observadas. Conforme abordado em seções anteriores, os ambientes urbanos possuem comportamento espectral heterogêneo, podendo as frações não ter distribuição normal. No caso de variáveis que não apresentam uma distribuição gaussiana, o uso de testes paramétricos não é apropriado para efetuar as análises comparativas desejadas.

A verificação da suposição de normalidade foi realizada utilizando-se o teste de Komolgorov-Smirnov. As hipóteses deste teste são dadas por (i) H_0 : a variável tem distribuição normal; e (ii) H_1 : a variável não tem distribuição normal. Os valores das estatísticas de teste e os respectivos p-valores são apresentados na Tabela 4.5. Considerando um nível de significância de 5% (0,05), observa-se que apenas o bairro Bela Vista, no ano de 1999 e o bairro Três Figueiras, no ano de 2008, apresentam distribuição normal para a variável fração solo. O bairro Bela Vista, nos anos de 1991 e 2008, o bairro Três Figueiras, nos anos de 1991 e 1999, e os demais bairros, em todos os anos analisados, não apresentam distribuição normal, visto que o p-valor é inferior ao nível de significância (0,05).

Tabela 4.5. Teste de normalidade para a fração solo – análise por Bairro e por ano.

Bairro	1991		1999		2008	
	Kolmogorov Smirnov Z	p-valor	Kolmogorov Smirnov Z	p-valor	Kolmogorov Smirnov Z	p-valor
Bela Vista	1,432	0,033	0,811	0,527	1,541	0,017
Bom Jesus	5,536	0,000	2,064	0,000	2,438	0,000
Humaitá	6,333	0,000	5,509	0,000	1,626	0,010
Mário Quintana	10,806	0,000	10,592	0,000	8,330	0,000
Petrópolis	1,783	0,003	2,322	0,000	3,637	0,000
Três Figueiras	3,254	0,000	3,193	0,000	0,944	0,335

Diante desses resultados, para comparar as medianas da variável fração solo entre os anos analisados para cada bairro, o teste U, de Mann-Whitney, foi escolhido. Como são analisados os valores de três anos (1991, 1999 e 2008), foram realizadas três comparações: (i) entre 1991 e 1999 (1991 x 1999), (ii) entre 1999 e 2008 (1999 x 2008), e (iii) entre 1991 e 2008 (1991 x 2008). A Tabela 4.6 mostra os valores das estatísticas U e Z para as comparações de cada bairro, bem como os respectivos p-valores. Considerando um nível de significância de 5% (0,05) e observando os dados da Tabela 4.6, nota-se que há diferença significativa entre as medianas da variável fração solo comparando-se os anos, para todos os bairros analisados, dado que o p-valor é inferior a 0,05 em todos os comparativos.

Tabela 4.6. Testes de comparação de Mann Whitney – análises por Bairro.

Bairro	Anos comparados	U de Mann Whitney	Z	p-valor
Bela Vista	1991 x 1999	82314,0	-33,754	0,000
	1999 x 2008	280670,5	-19,477	0,000
	1991 x 2008	29932,5	-37,524	0,000
Bom Jesus	1991 x 1999	381871,5	-47,868	0,000
	1999 x 2008	1349843,5	-24,452	0,000
	1991 x 2008	217185,5	-51,850	0,000
Humaitá	1991 x 1999	4711367,0	-49,018	0,000
	1999 x 2008	9316494,0	-15,164	0,000
	1991 x 2008	3987093,5	-54,855	0,000
Mário Quintana	1991 x 1999	13049409,0	-56,695	0,000
	1999 x 2008	22940031,5	-19,213	0,000
	1991 x 2008	10872371,5	-64,890	0,000
Petrópolis	1991 x 1999	1507296,5	-60,473	0,000
	1999 x 2008	4870090,5	-25,940	0,000
	1991 x 2008	860329,5	-67,117	0,000
Três Figueiras	1991 x 1999	390746,0	-34,243	0,000
	1999 x 2008	816545,5	-11,885	0,000
	1991 x 2008	281226,0	-34,961	0,000

Analisando o gráfico da Figura 4.15, percebe-se uma mudança na posição de alguns bairros, quanto ao valor de fração solo, ao longo do tempo. O bairro Bom Jesus, com característica de moradia em casas e de ocupação por camadas mais populares, é o bairro com maior valor de média para as três datas. Também caracterizado por moradia em casas, mas para camadas com renda mais alta, o bairro Três Figueiras se manteve em segundo lugar nas três datas. Ainda, o bairro Mário Quintana, com terceiro maior valor de média para a fração solo, caracteriza-se por moradia em casas para camadas populares.

Os bairros Bela Vista e Petrópolis que, de acordo com Barcellos (2004), sofreram intensa verticalização, foram os bairros que apresentaram menores valores de média. Nota-se, na Figura 4.15, uma quebra entre os valores das médias dos quatro bairros com maiores valores (Bom Jesus, Três Figueiras, Mário Quintana e Humaitá) e os bairros Bela Vista e Petrópolis. Essa separação entre os grupos evidencia uma diferenciação, na fração solo, de bairros com características de ocupação vertical dos demais bairros.

O uso do MLME para avaliar o crescimento horizontal mostrou grande similaridade com as descrições de crescimento, de uso e de cobertura do solo encontradas em artigos científicos. Os padrões de ocupação horizontal, observados nas composições RGB 543 a partir da resposta espectral e da textura das áreas urbanas, ficaram bem definidos nas imagens fração solo para todas as datas. Isso mostra que a metodologia aplicada nesta análise é capaz de identificar, com baixo custo, áreas de expansão urbana (crescimento externo) e de ocupação de vazios urbanos (crescimento interno).

Contudo, não possível encontrar a mesma similaridade ao analisar as informações quantitativas das frações. Há algumas explicações para que os valores de média da fração solo e de aumento no número de domicílios não apresentem concordância: (i) a heterogeneidade do ambiente urbano; (ii) o solo impermeabilizado possuir alta variabilidade em sua reflectância; e (iii) a troca e/ou o envelhecimento dos materiais urbanos modifica o padrão de reflectância da superfície urbana. Outro detalhe a ser analisado é a diminuição dos valores da fração solo ao longo dos anos em todo o conjunto de dados, que pode indicar a interferência da degradação do sensor nas imagens geradas.

Na área urbana, praças e áreas densamente ocupadas por construções fazem parte da maioria dos bairros. Assim, analisando a fração solo de um bairro, tem-se áreas

com alto valor de solo exposto (*e.g.* alvos com alto albedo) e áreas com baixo valor de solo exposto (*e.g.* áreas verdes, praças e parques). Dessa forma, ao calcular a média dos valores da fração solo para todo o bairro, essa variação nos valores dos pixels afetará a média. Portanto, a heterogeneidade do ambiente urbano compromete o uso de medidas de tendência central em comparações com outros dados. Ainda, deve-se considerar a resolução espacial do sensor TM (30 metros). Quanto menor a resolução espacial, maior será a mistura espectral, pois mais alvos urbanos estão contidos no GIFOV.

O solo impermeável tem grande variação em seu brilho, desde materiais de baixo albedo (*e.g.*, asfalto) até materiais de alto albedo (*e.g.*, vidro e plástico) (HEROLD et al., 2004; WU, 2004). Além disso, os materiais urbanos têm suas reflectâncias modificadas ao longo dos anos. Herold et al. (2004) apresenta diferenças na resposta espectral em estradas e calçadas conforme seus estados de conservação e tempo de vida. Analisando alvos urbanos, em Nova Iorque, Small (2002) afirma que o ambiente urbano pode ser descrito como uma mistura linear de alvos com alto albedo, baixo albedo e vegetação, sendo o solo impermeabilizado uma combinação da fração alto albedo com a fração baixo albedo. Uma possibilidade para a análise quantitativa dos dados das imagens fração para crescimento horizontal com os dados do censo seria a geração de imagens fração para os *endmembers* baixo albedo, alto albedo e vegetação.

5 ANÁLISE DO CRESCIMENTO VERTICAL DA CIDADE DE PORTO ALEGRE

Para analisar o crescimento vertical da área urbana da cidade de Porto Alegre foram utilizadas imagens-fração sombra geradas por MLME. As mesmas imagens utilizadas no capítulo anterior (Capítulo 4 - Tabela 4.1) foram utilizadas nas análises deste capítulo, exceto pela imagem de 1999. Portanto, as imagens do mês de outubro dos anos de 1991 e 2008 geraram, através de MLME, as imagens-fração sombra para cada data (Figura 5.1). Não houve, também, correção atmosférica. Diferentemente do crescimento horizontal, que pode ser detectado a cada nova ocupação, seja ela regular ou irregular, o crescimento vertical depende de um intervalo temporal maior. Em áreas onde não há altas edificações, qualquer novo prédio será detectado nas imagens. No entanto, em áreas já densamente urbanizadas, com conjuntos de prédios, a sombra dos novos edifícios será pouco percebida, a menos que um intervalo temporal maior possibilite a integração da sombra de uma quantidade maior de prédios. Assim, foi definido um intervalo temporal de 18 anos para detectar diferenças na quantidade de sombra promovida por edifícios tanto na área já verticalizada (próxima ao Centro Histórico) quanto em áreas mais afastadas e que sofreram verticalização.

Observa-se, na Figura 5.1, um aumento nos valores de sombra nos bairros no entorno do Centro Histórico, na porção nordeste do município (retângulo 1) e, em direção à zona sul (retângulo 2), na região costeira. Algumas áreas com valores intermediários de sombra, em especial, na metade sul do município, correspondem a encostas de morros, com vegetação do tipo mata/floresta (Figura 5.2).

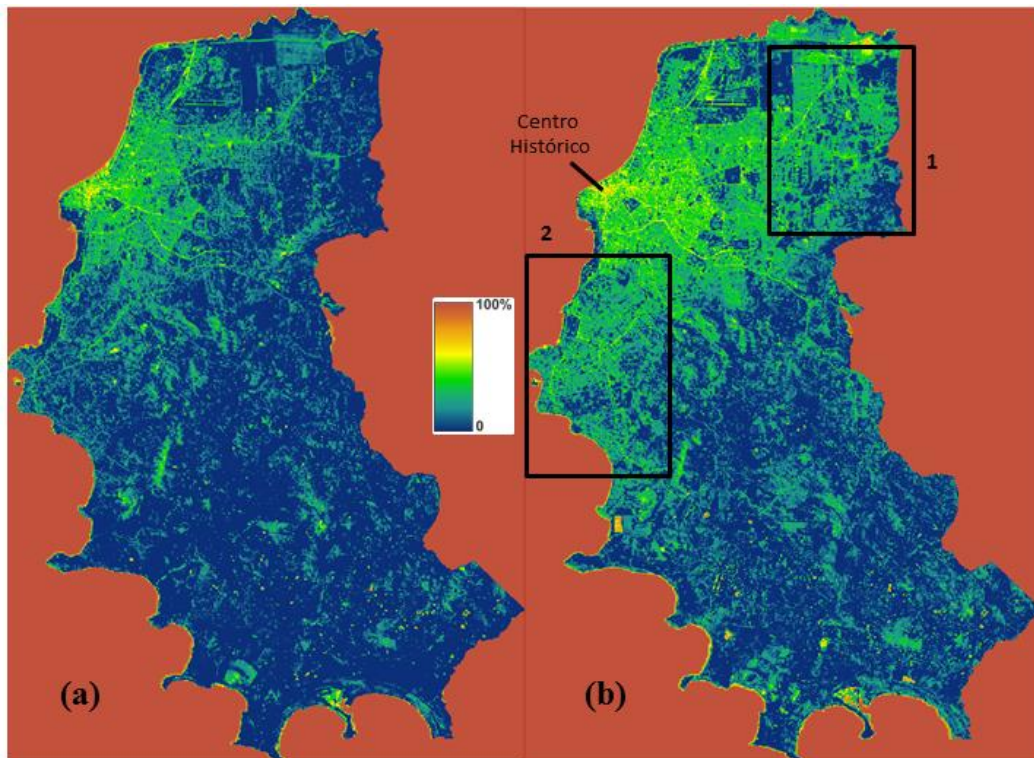


Figura 5.1. Imagens-fração sombra para os anos de (a) 1991 e (b) 2008.

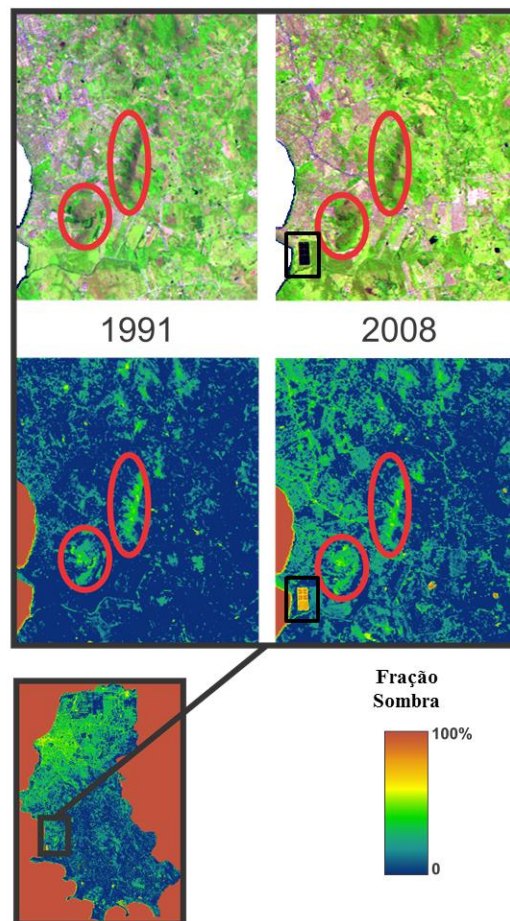


Figura 5.2. Detalhe das sombras dos morros da Tapera (elipse da direita) e das Abertas (elipse da esquerda). A estação de tratamento de esgoto da Serraria é destacada no retângulo preto.

Por se tratar da análise da fração sombra, as encostas sombreadas dos morros (Figura 5.2) e as copas de árvores também são incluídas nas estimativas de sombra. Contudo, esses valores e formas são constantes ao longo dos anos, não afetando a análise multitemporal. O mesmo formato nas sombras pode ser percebido em 1991 e em 2008 (Figura 5.2). À esquerda do Morro das Abertas há, em 2008, um retângulo bem definido, que corresponde à Estação de Tratamento de Esgotos da Serraria (retângulo preto na figura 5.2).

A Figura 5.3 apresenta as regiões do PPDUA que estão no entorno do Centro Histórico, correspondendo ao Aterro, ao Centro Histórico, ao Corredor de Urbanidade e à Cidade Radiocêntrica (Figura 2.3). Nesta porção da cidade estão bairros como o Bela Vista, o Petrópolis, o Moinhos de Vento e o Mont'Serrat, citados por Barcellos (2004) como áreas de verticalização durante a década de 1990 e início dos anos 2000.

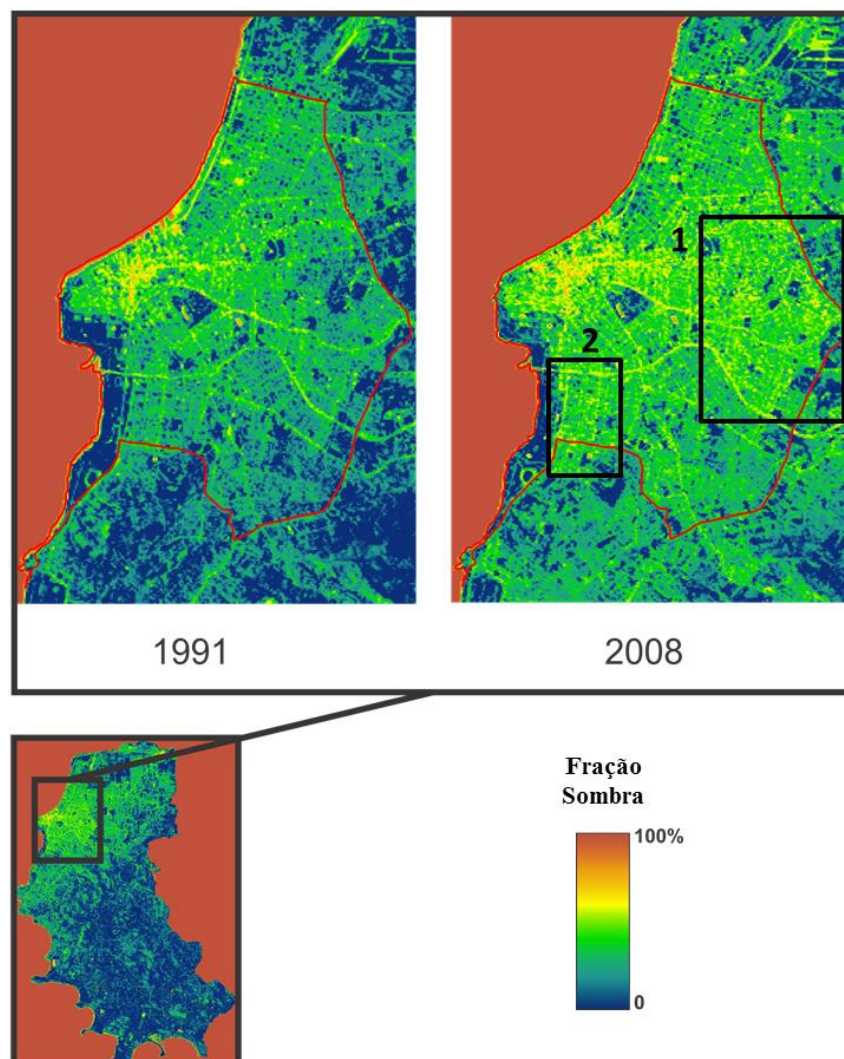


Figura 5.3. Detalhe da região do Centro Histórico de Porto Alegre. Os retângulos pretos indicam as áreas dos bairros (1) Petrópolis, Mont'Serrat, Moinhos de Vento e Bela Vista e (2) Menino Deus

Conforme os censos de 2000 e 2010, os bairros Petrópolis, Centro Histórico, Menino Deus e Rio Branco estão entre os dez bairros com maior aumento no número de domicílios, ocupando, respectivamente, o terceiro, o quarto, o sétimo e o oitavo lugares (Tabela 4.3). Outro ponto a ser observado, na figura 5.3, é o aumento nos valores da fração sombra nos grandes eixos viários, provavelmente provocado pelo uso de materiais de baixo albedo (*e.g.*, asfalto).

O retângulo 1 da Figura 5.3, que corresponde aos bairros Petrópolis, Bela Vista e Rio Branco, é detalhado na figura 5.4. Esse comparativo é importante, pois essa região contém bairros que cresceram em número de domicílios (dados do censo) e há relatos de verticalização, na década de 1990 e início dos anos 2000, nos artigos científicos.

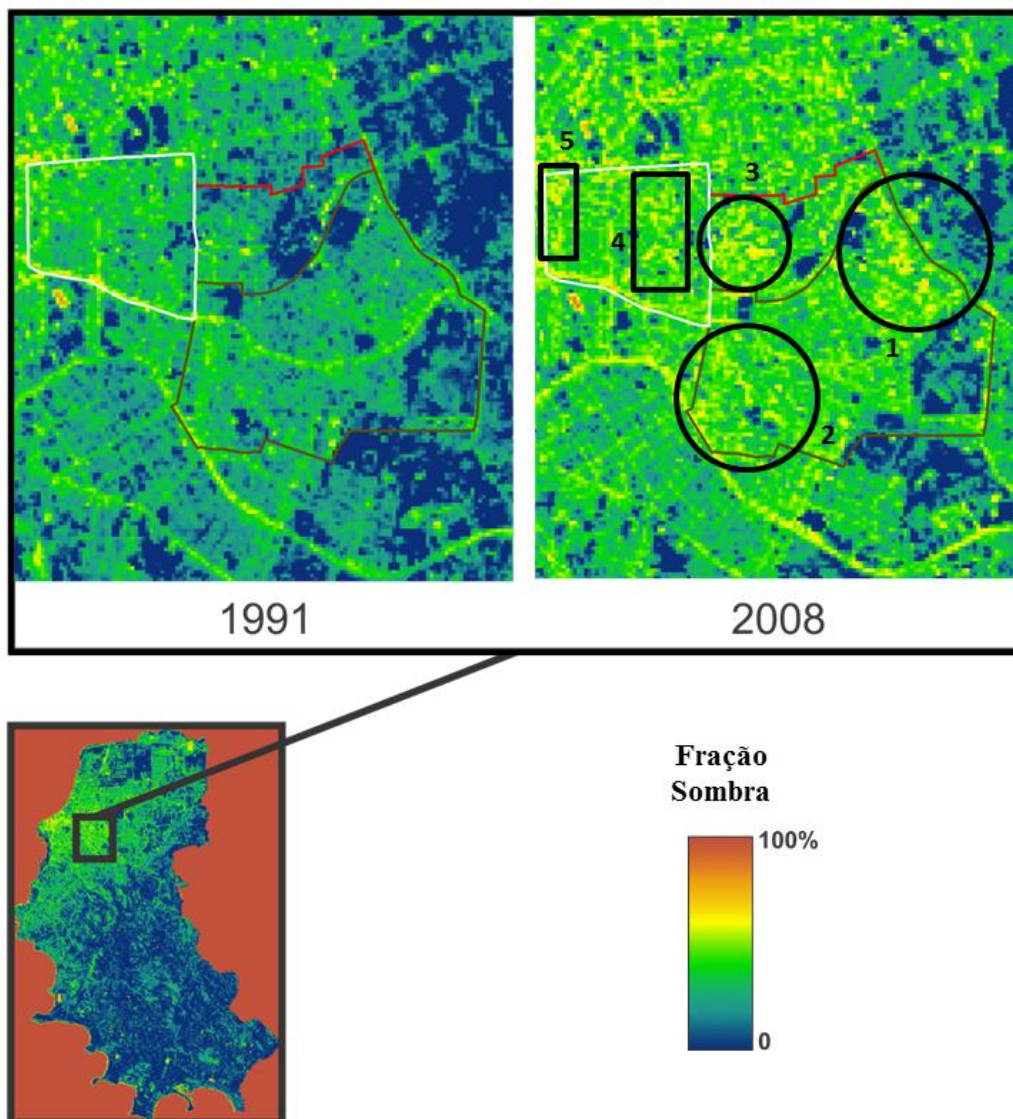


Figura 5.4. Bairros Petrópolis (marrom), Bela Vista (vermelho) e Rio Branco (Branco) e as frações sombra para 1991 e para 2008. Os círculos indicam áreas com crescimento nos valores da fração sombra: (1) nordeste do bairro Petrópolis, (2) sudoeste do bairro Petrópolis, (3) Bela Vista, (4) porção leste do bairro Rio Branco e (5) porção oeste do bairro Rio Branco.

Observando a figura 5.4, é possível observar o aumento significativo na fração sombra nos bairros detalhados. O bairro Petrópolis apresentou valores mais altos na porção nordeste (círculo 1) e sudoeste (círculo 2). No Bela Vista, a parte oeste do bairro (círculo 3) mostra aumento nos valores de sombra e, na porção leste, na divisa com o bairro Petrópolis. O bairro Rio Branco apresenta aumento nos valores de sombra em toda a sua extensão, com destaque para as porções leste (retângulo 4) e oeste (retângulo 5).

A Figura 5.5 é um detalhe da área de crescimento no valor da fração sombra na porção sul da Figura 5.3, que corresponde ao bairro Menino Deus. É possível notar o aumento nos valores de sombra nas elipses 1 e 2, que correspondem aos eixos das avenidas Getúlio Vargas e José de Alencar, respectivamente. Ressalta-se que o Menino Deus foi o sétimo bairro com o maior crescimento no número de domicílios em Porto Alegre.

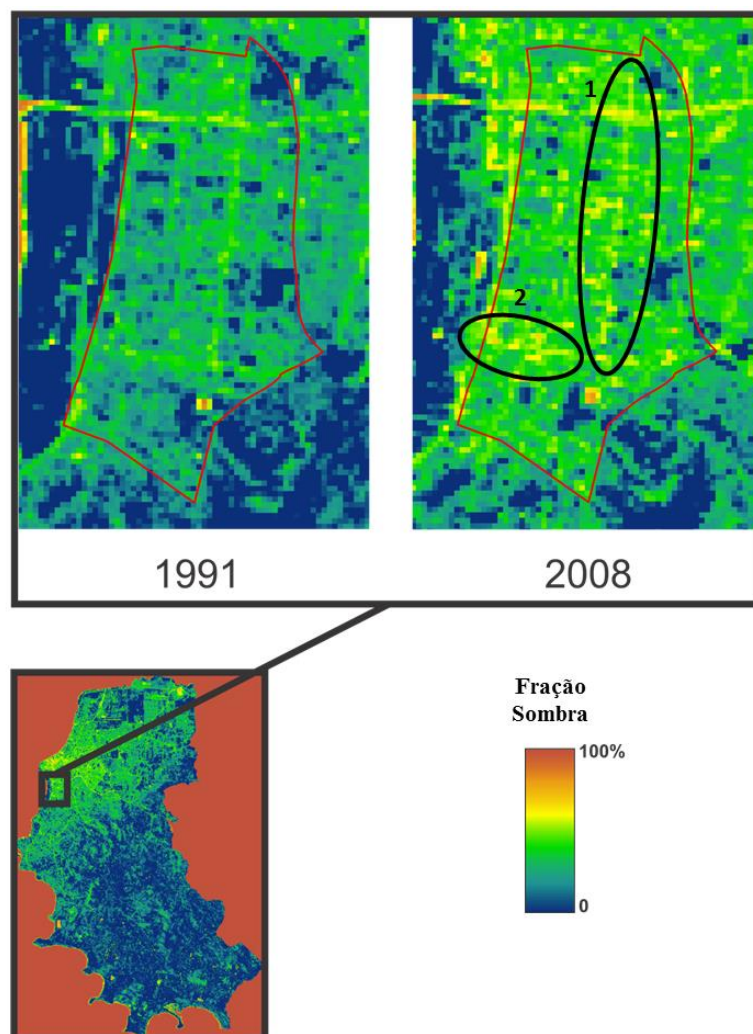


Figura 5.5. Imagens fração sombra de 1991 e de 2008 para o bairro Menino Deus. As elipses (1) e (2) indicam os eixos das avenidas Getúlio Vargas e José de Alencar, respectivamente.

Os Corredores de Centralidade dos Eixos Assis Brasil-Sertório e Bento Gonçalves-Ipiranga, propostos no PPDUA (Figura 2.3), assim como toda a macrozona Cidade Xadrez (apresentada na figura 5.6) também sofreram aumento nos valores de fração sombra entre 1991 e 2008.

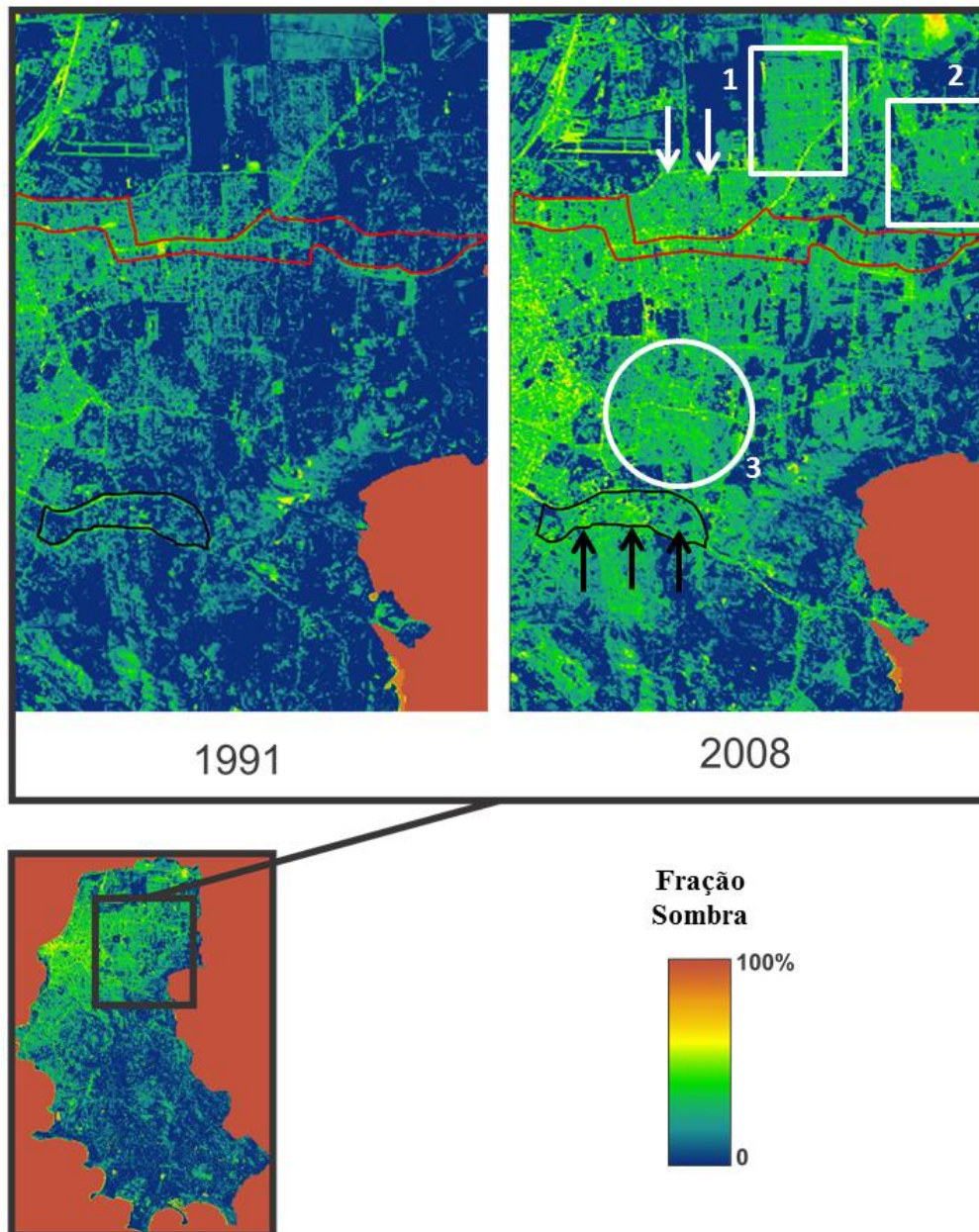


Figura 5.6. Fração sombra para a macrozona Cidade Xadrez. São destacados os Corredores de Centralidade do Eixo Assis Brasil – Sertório (vermelho) e do Eixo Bento Gonçalves – Ipiranga (preto). Os retângulos brancos (1) e (2) indicam crescimento da fração sombra nos bairros Sarandi e Rubem Berta, respectivamente. O círculo branco (3) mostra a região dos bairros Chácara das Pedras, Três Figueiras e Bom Jesus. As setas brancas apontam para as proximidades do Eixo Assis-Sertório e, as setas pretas, para o crescimento dos valores de sombra no Eixo Bento-Ipiranga.

Observando a figura 5.6, destaca-se o aumento da fração sombra em todo o Eixo Assis-Sertório e regiões vizinhas (setas brancas). O Eixo Bento-Ipiranga apresentou aumento da sombra em toda a sua área (setas pretas). O Corredor de Centralidade do Eixo Bento Gonçalves-Ipiranga corresponde a uma porção do bairro Partenon. Este bairro, conforme os censos de 2000 e de 2010, ocupa a 14ª posição entre os bairros que tiveram o maior aumento no número de domicílios. Barcellos (2004) destaca que o Partenon foi um dos bairros com maior número de vistorias na construção civil, realizadas pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre, no final dos anos 1990, indicando ser um bairro com intensa exploração pelo mercado imobiliário.

Os bairros Sarandi e Rubem Berta (retângulos brancos 1 e 2 na figura 5.6) mostraram forte aumento na fração sombra entre 1991 e 2008. Conforme os censos de 2000 e 2010, esses bairros estão entre os dez bairros com maior crescimento no número de domicílios. No capítulo anterior (Capítulo 4), foi possível detectar um aumento na fração solo dessa região no mesmo período, o que se repete com a fração sombra. Assim, evidencia-se que esses bairros sofreram uma expansão urbana e uma verticalização no período analisado.

Três Figueiras e Chácara das Pedras (círculo 3 da figura 5.6), pela proximidade com o Shopping Iguatemi, sofreram intensa exploração pelo mercado imobiliário nos anos 1990 (Barcellos, 2004). Quando avaliada a fração solo, foi possível detectar expansão urbana nos vazios urbanos. Além dessa expansão, analisando os resultados da fração sombra, é possível notar que a expansão urbana foi acompanhada por verticalização.

Uma imagem gerada pela razão das frações sombra de 2008 e de 1991 (*i.e.*, sombra 2008 dividida por sombra 1991) foi utilizada para verificar a correta identificação das áreas de crescimento de sombra realizada nas diferentes regiões da cidade. A figura 5.7 mostra a imagem razão das frações sombra. O retângulo azul, no topo da figura 5.7 mostra uma área inundável de Porto Alegre. Por ser uma área suscetível ao acúmulo de água, quando ocorre este acúmulo, a região é caracterizada como área de sombra. Isso ocorre pela semelhança espectral da água e da sombra. Ainda sobre a figura 5.7, o retângulo branco (1) indica crescimento nos valores de sombra nos bairros Sarandi e Rubem Berta, a elipse (2) mostra os bairros Chácara das Pedras, Bom Jesus e Partenon, a elipse (3) indica aumento na sombra nos bairros Santa Teresa, Cristal, Tristeza, Camaquã e Cavahada. A seta preta aponta para a região dos bairros Bela Vista e Petrópolis.

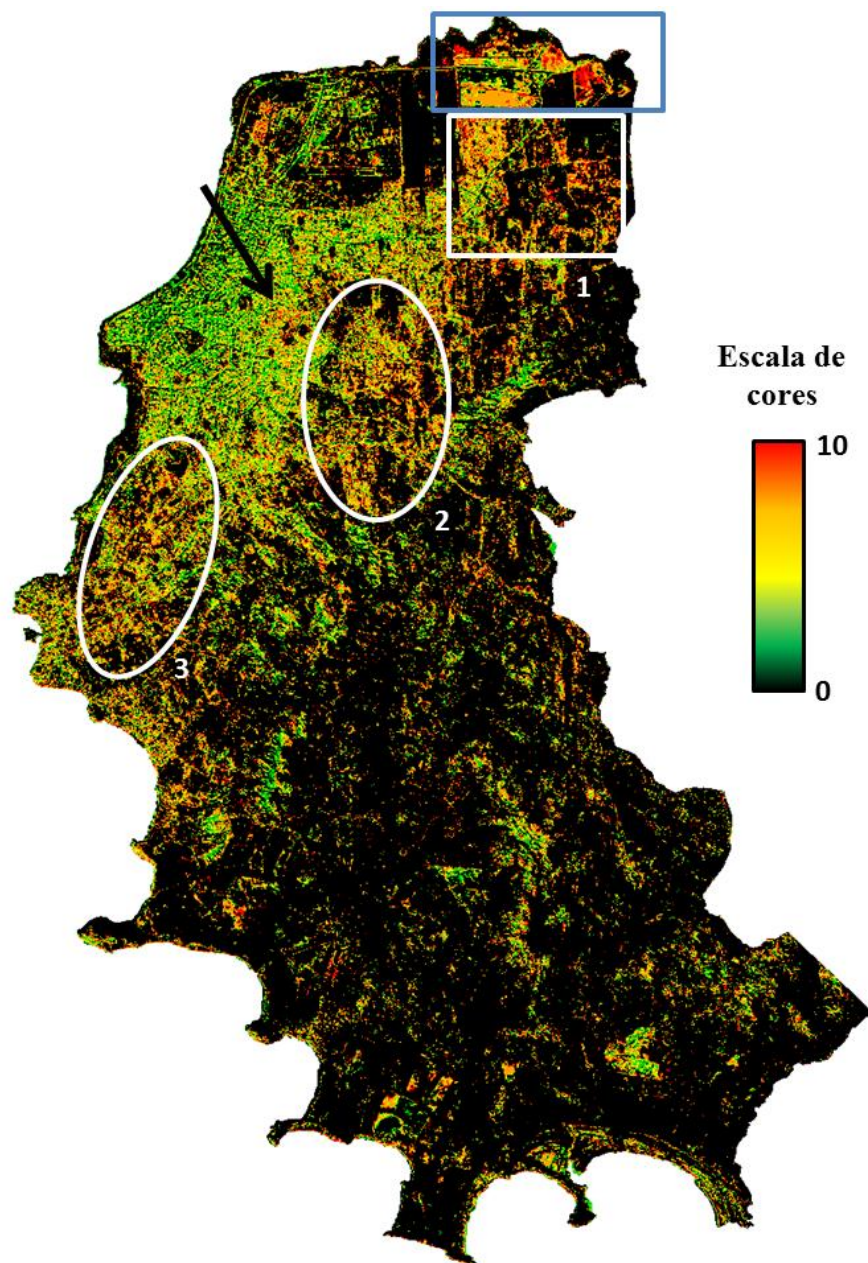


Figura 5.7. Imagem razão entre as frações sombra de 2008 e 1991. No retângulo azul, área inundável de Porto Alegre. No retângulo (1), estão os bairros Rubem Berta e Sarandí, e as elipses (2) e (3) indicam os bairros Chácara das Pedras, Bom Jesus e Partenon (2) e Santa Teresa, Cristal, Tristeza Camaquã e Cavallhada (2). A seta preta mostra a região dos bairros Petrópolis e Bela Vista.

Para quantificar as mudanças na fração sombra, os mesmos bairros utilizados no capítulo anterior tiveram as medidas de tendência central e de variabilidade calculadas. Os bairros são: Bela Vista, Bom Jesus, Humaitá, Mário Quintana, Petrópolis e Três Figueiras (

Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Valores de média, desvio padrão e mediana, da fração sombra, para os bairros selecionados.

Bairro	Medida	1991 (%)	2008 (%)
Bela Vista	Média	15,3	33,8
	Desvio Padrão	11,3	13,9
	Mediana	15	36
Bom Jesus	Média	7,8	26,3
	Desvio Padrão	8,3	8,9
	Mediana	6	28
Humaitá	Média	13,3	17,5
	Desvio Padrão	16,4	15,8
	Mediana	8	17
Mário Quintana	Média	2,3	8,6
	Desvio Padrão	6,1	9,8
	Mediana	0	5,1
Petrópolis	Média	19,3	32,4
	Desvio Padrão	9,1	13,8
	Mediana	20	35
Três Figueiras	Média	7,8	17,8
	Desvio Padrão	10,1	13,0
	Mediana	4	18

Tabela 5.1 mostra que os bairros mais verticalizados (dentre os selecionados), Petrópolis e Bela Vista, são os que possuem os maiores valores de média para a fração sombra, tanto para 1991 quanto para 2008. Os bairros Humaitá, Mário Quintana e Três Figueiras possuem baixos valores de média, o que condiz com a característica de moradia em casas, conforme relata Barcellos (2004). O bairro Bom Jesus apresentou crescimento acentuado da média da fração sombra entre 1991 e 2008. Possivelmente, durante o crescimento horizontal do bairro (evidenciado no capítulo anterior), materiais de baixo albedo foram empregados nas construções e infraestrutura urbana, sendo identificados, pelo modelo de mistura, como sombra.

Para realizar a comparação entre a distribuição dos dados dos dois anos analisados é preciso verificar a normalidade da variável sombra. A verificação de suposição de normalidade da variável fração sombra para os bairros analisados deu-se pelo teste de Komolgorov-Smirnov, teste para verificação da normalidade, indicado para grandes amostras. As hipóteses são dadas por (i) H_0 : a variável tem distribuição normal; e (ii) H_1 : a variável não tem distribuição normal. Os valores das estatísticas de teste e os p-valores são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Teste de normalidade para a fração sombra – análise por Bairro e por ano.

Bairro	1991		2008	
	Kolmogorov Smirnov Z	p-valor	Kolmogorov Smirnov Z	p-valor
Bela Vista	2,852	< 0,05	2,526	< 0,05
Bom Jesus	3,092	< 0,05	3,245	< 0,05
Humaitá	14,371	< 0,05	10,446	< 0,05
Mário Quintana	36,960	< 0,05	17,516	< 0,05
Petrópolis	3,218	< 0,05	5,985	< 0,05
Três Figueiras	8,501	< 0,05	3,329	< 0,05

Considerando um nível de significância de 5% (0,05), observa-se que os dados não apresentam distribuição normal, visto que os p-valores são inferiores a 5%. Assim, deve-se aplicar teste não-paramétrico para verificação de aumento ou diminuição da fração sombra nos bairros.

O teste não-paramétrico escolhido para a análise dos dados da fração sombra é o teste U, de Mann Whitney. Aplica-se o teste U quando não é possível aplicar o teste *t*, nos casos em que a variável não apresenta distribuição normal. A Tabela 5.3 mostra os valores de média, mediana, desvio padrão (DP) e p-valor para cada bairro analisado.

Tabela 5.3. Valores de média, mediana e desvio padrão da fração sombra para os bairros analisados e o p-valor resultante da comparação entre as medianas de 1991 e 2008.

Bairro	Ano						p-valor
	Média	1991 Mediana	DP	Média	2008 Mediana	DP	
Bela Vista	15,3	14,9	11,3	33,8	35,9	13,9	<0,05
Bom Jesus	7,8	5,9	8,3	26,3	27,5	8,9	<0,05
Humaitá	13,3	7,8	16,4	17,6	16,9	15,8	<0,05
Mário Quintana	2,3	0,0	6,1	8,6	5,1	9,8	<0,05
Petrópolis	19,3	19,6	11,0	32,4	34,9	13,8	<0,05
Três Figueiras	7,8	3,5	10,1	17,8	17,7	13,0	<0,05

Considerando um nível de significância de 5% (0,05) e observando os dados da Tabela 5.3, nota-se que há diferença significativa entre as medianas de 1991 e de 2008 para todos os bairros analisados, dado que o p-valor é inferior a 0,05 em todos os casos. Assim, pode-se afirmar que há diferença significativa entre as medianas da variável sombra nos comparativos entre anos para todos os bairros listados na tabela.

Ainda com o intuito de traçar um paralelo entre os resultados da fração sombra com a realidade da superfície de Porto Alegre, as Figura 5.8 e Figura 5.9 foram elaboradas utilizando imagens geradas a partir de dados de Laser Scanner. O Modelo

Digital do Terreno e o Modelo Digital de Superfície, de toda Porto Alegre, foram gerados, no ano de 2010, por varredura laser que posteriormente foi convertida em arquivos raster com resolução espacial de 1 metro. Esse levantamento foi contratado pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre e os arquivos foram cedidos pelas Secretaria Municipal da Fazenda (SMF) e Secretaria Municipal de Urbanismo (SMURB).

Para realizar o comparativo, a imagem proveniente dos dados do Laser Scanner, obtidos em 2010, foi analisada conjuntamente com a imagem-fração de 2008. Ressalta-se a diferença na resolução espacial dos dois produtos: a imagem-fração tem resolução de 30 metros e a varredura laser tem 1 metro.

Na Figura 5.8 observa-se a diferença nos valores da fração sombra conforme muda a macrorregião do PPDUA analisado. O Centro Histórico, com edifícios mais altos (laser) possui altos valores de sombra, enquanto as porções norte e sul do Corredor de Urbanidade, com edificações baixas ou inexistentes, apresentam valores mais baixos de sombra. Conforme a distância, com relação ao Centro Histórico, aumenta, as edificações tornam-se menores (laser) e as frações sombra também diminuem.

Os bairros Bela Vista e Petrópolis são apresentados na Figura 5.9. É possível notar valores mais altos na fração sombra na porção nordeste do bairro, que coincide com uma região de maior incidência de edifícios altos. O mesmo ocorre com a porção oeste do bairro Bela Vista. Diferentemente do Centro Histórico, esses bairros possuem edifícios altos, mas não tão próximos. Assim, a mistura provocada por um GIFOV que possibilita uma resolução espacial de 30 metros diminui a proporção de sombra no pixel.

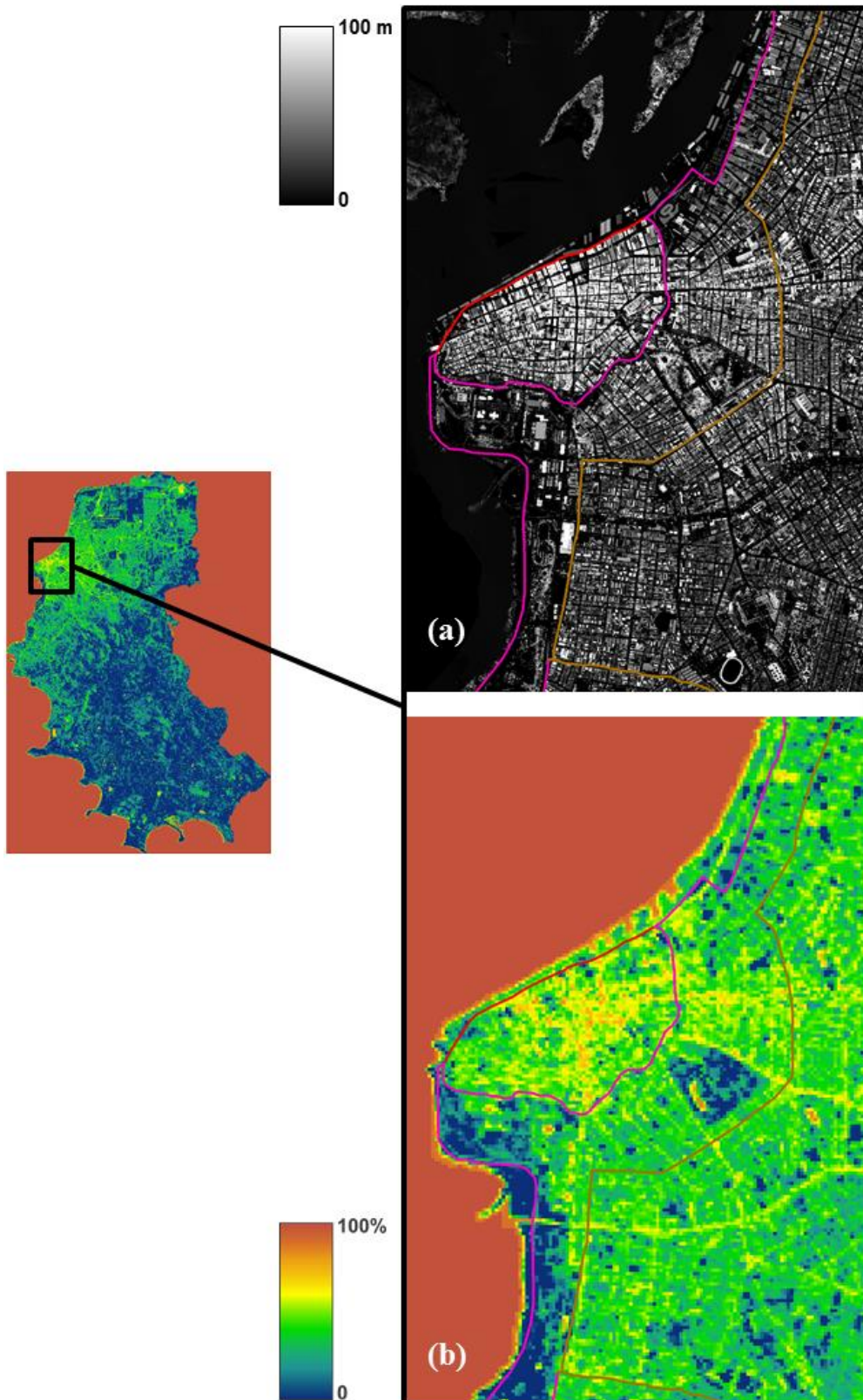


Figura 5.8. Comparativo entre os dados do Laser Scanner (2010) – acima – e da fração fração sombra (2008) – abaixo. As macrorregiões Centro Histórico (vermelho), Corredor de Urbanidade (rosa) e Cidade Radiocêntrica (marrom), do PPDUA, são indicadas na figura.

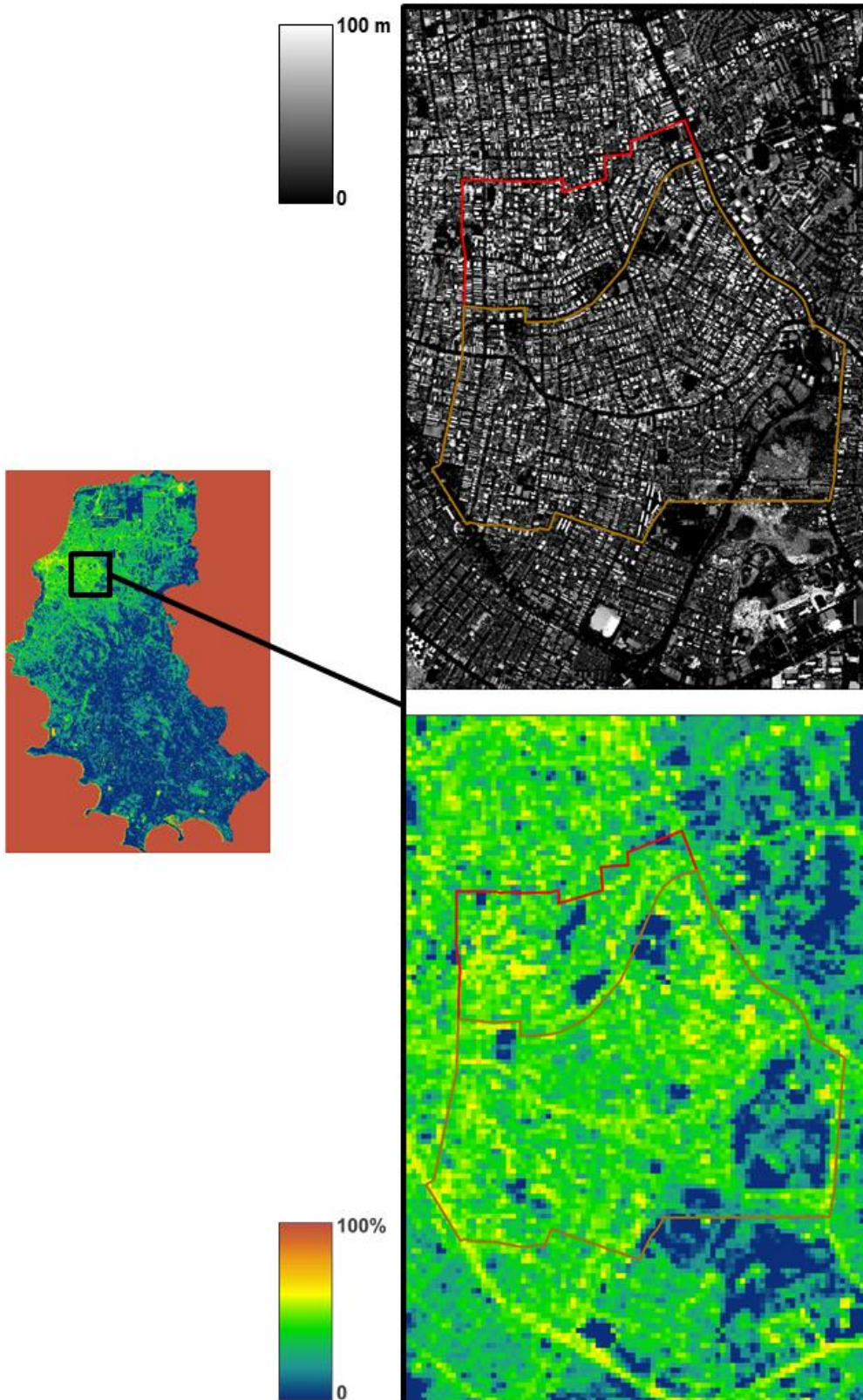


Figura 5.9. Comparativo entre os dados do Laser Scanner (2010) – acima – e da fração sombra (2008) – abaixo. São destacados os bairros Bela Vista (vermelho) e Petrópolis (marrom).

Para verificar quantitativamente a semelhança entre os dados do Laser Scanner e da fração sombra de 2008, a imagem proveniente do Laser teve seus pixels reamostrados para 30 metros, visando uma comparação direta entre os produtos. Posteriormente, foram selecionados, na imagem do Laser Scanner, os pixels com valor de altura superior a 5 metros (o valor máximo do arquivo é 95 metros) e, na fração sombra, os pixels com percentual de sombra superior a 20. Após a seleção, foram escolhidos os pixels contidos na intersecção entre os dois conjuntos, conforme mostra a expressão apresentada na Equação 14. A imagem temática, com o resultado da intersecção, pode ser vista na Figura 5.10.

$$\{5 \leq \textit{Altura} \leq 95\} \cap \{20\% \leq \textit{Sombra} \leq 100\% \} \quad \text{Equação 14}$$

A escolha do percentual de 20% como limite mínimo da análise quantitativa se deve ao fato da heterogeneidade do ambiente urbano, possibilitando a identificação de pequenos valores da fração sombra não apenas nos locais onde há o sombreamento provocado pelas edificações. A definição de 5 metros de altura como limite mínimo para a seleção dos pixels da imagem do Laser Scanner deu-se pela necessidade de separar pixels com sombra das edificações de pixels com valor de sombra mas que possivelmente estivessem associados a materiais de baixo albedo.

A imagem do Laser Scanner (Figura 5.10a) possui conjuntos de pixels com altos valores de altura localizados na porção oeste do município, estendendo-se da metade de Porto Alegre até o extremo sul. Essas áreas correspondem aos morros e às suas encostas. Nas encostas e vales, há ocorrência de matas/florestas, o que gera esses altos valores. Como já observado neste capítulo, a fração sombra (Figura 5.10b) também possui altos valores em áreas onde há mata/floresta (setas verdes), visto que as copas das árvores provocam sombra.

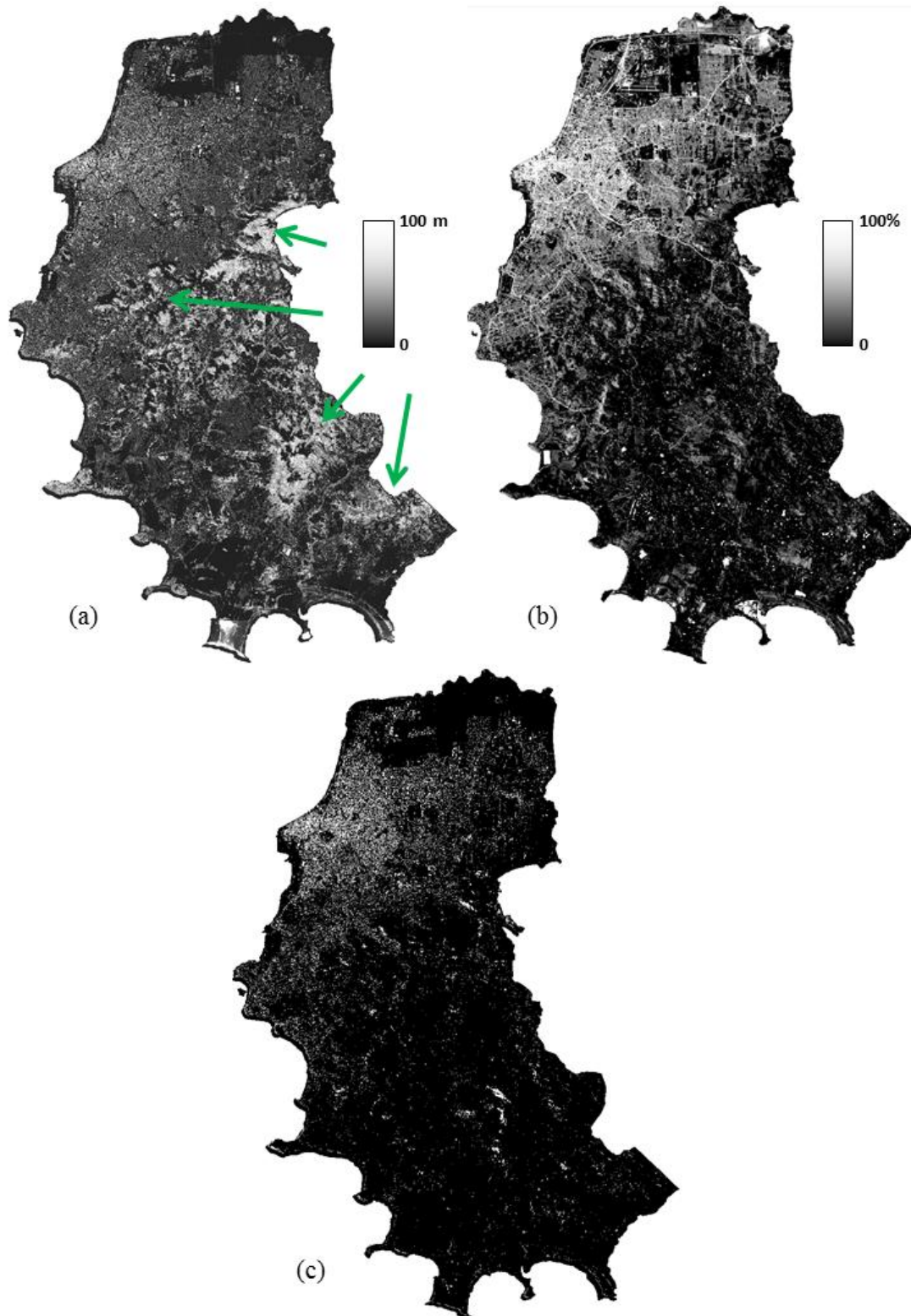


Figura 5.10. Intersecção (c) entre os dados do Laser Scanner (a), obtidos em 2010, e da fração sombra (b), de 2008. As setas verdes indicam área de vegetação.

Ao analisar a imagem temática da intersecção (Figura 5.10c) entre os pixels selecionados conforme a Equação 14, é possível notar que o resultado é similar ao da

fração sombra (Figura 5.10b), com maior concentração de edificações nas áreas próximas ao Centro Histórico (Macrozonas Centro Histórico, Corredor de Urbanidade e Cidade Radiocêntrica, do PPDUA) e no Corredor de Centralidade do Eixo Assis Brasil-Sertório. As demais áreas urbanizadas não contam com edificações altas e, por isso, não há altos valores de fração sombra.

Assim, é possível verificar que os resultados da fração sombra estão diretamente relacionados à ocorrência de edificações. Portanto, é possível identificar áreas verticalizadas no ambiente urbano utilizando a fração sombra. Ainda, com a similaridade entre os aumentos na fração sombra entre 1991 e 2008 e os relatos de Barcellos (2004) e Koch (2004), pode-se verificar o crescimento das áreas verticalizadas usando essa mesma metodologia.

6 ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ENTRE 1984 E 2009

Para analisar a temperatura de superfície do município de Porto Alegre, a banda 6 do sensor TM da plataforma Landsat 5 foi utilizada. Após excluir cenas que não tivessem cobertura de nuvem sobre o município, 44 imagens foram selecionadas, contemplando o intervalo temporal de 1984 a 2009 (Tabela 6.1).

Tabela 6.1. Imagens utilizadas na análise da temperatura de superfície do município de Porto Alegre.

Data	Estação do ano	Data	Estação do ano
01/10/1984	Primavera	04/07/1998	Inverno
06/02/1985	Verão	27/12/1998	Verão
27/04/1985	Outono	27/10/1999	Primavera
05/05/1985	Outono	23/06/2000	Inverno
24/01/1986	Verão	12/07/2001	Inverno
01/06/1986	Outono	11/02/2004	Verão
10/12/1986	Primavera	30/03/2004	Outono
19/11/1990	Primavera	04/07/2004	Inverno
02/08/1991	Inverno	23/05/2006	Outono
21/10/1991	Primavera	14/10/2006	Primavera
08/09/1993	Inverno	15/11/2006	Primavera
23/06/1994	Inverno	01/12/2006	Primavera
30/11/1994	Primavera	03/02/2007	Verão
07/04/1995	Outono	01/10/2007	Primavera
23/04/1995	Outono	06/02/2008	Verão
01/11/1995	Primavera	03/10/2008	Primavera
19/12/1995	Primavera	22/12/2008	Verão
04/01/1996	Verão	07/01/2009	Verão
30/07/1996	Inverno	28/03/2009	Outono
06/01/1997	Verão	13/04/2009	Outono
01/07/1997	Inverno	29/04/2009	Outono
18/08/1997	Inverno	02/07/2009	Inverno

Os valores de DN das imagens foram transformados para radiância espectral no sensor e, posteriormente, realizada a conversão de radiância no sensor para temperatura de brilho. Os valores de temperatura de brilho, estimados em Kelvin, foram

transformados para Celsius. Todos os procedimentos foram realizados no programa SPRING 5.2.5.

Não há valores de emissividade para cada pixel. Por isso, optou-se por não realizar a conversão de temperatura radiante para temperatura cinética. Alguns trabalhos, como Sousa e Ferreira (2012), utilizam um valor constante de emissividade para corrigir todos os pixels. Como esse procedimento equivale a multiplicar todos os valores de temperatura radiante por uma constante muito próxima de 1, nenhuma diferença significativa seria encontrada na temperatura cinética calculada.

Conforme Oke (1987), os valores de emissividade das áreas urbanas estão no intervalo compreendido entre 0,85 e 0,96. Considerando a equação 9, para um pixel com temperatura de brilho de 30°C e emissividade 0,85, tem-se a temperatura cinética da superfície igual a 31,2°C, *i.e.* uma diferença de 1,2°C. Para temperaturas mais altas, a diferença entre a temperatura de brilho e a temperatura cinética será maior. Se um pixel tem temperatura de brilho igual a 40°C, mantendo-se a emissividade 0,85, a diferença entre temperatura cinética e de brilho será de 1,7°C.

Para avaliar a diferença entre a temperatura do ar, medida pela estação Porto Alegre do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e a temperatura de brilho da superfície, obtida através das imagens, foi elaborada a Tabela 6.2, onde são apresentados os valores de temperatura, medidos no termômetro de bulbo seco da estação do INMET, e os valores de temperatura de brilho do pixel, correspondentes à estação do INMET na superfície. As temperaturas do INMET foram obtidas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa¹ (BDMEP), sendo a coleta das informações às 12 horas UTC (*Universal Time Coordinated*). No BDMEP, estão disponíveis os dados meteorológicos da estação Porto Alegre desde 1961. Contudo, há lacunas na série em anos da década de 1980 e no início dos anos 2000.

¹ O acesso ao BDMEP é realizado através do endereço eletrônico <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>

Tabela 6.2. Valores de temperatura do ar em termômetro de bulbo seco (INMET) e temperatura de brilho no pixel correspondente à estação do INMET no terreno. Valores em graus Celsius (°C). Os anos de 1985, 1986 e 2001 possuem lacunas na série de dados meteorológicos disponível no BDMEP.

	Datas	Temperatura de Brilho	INMET Bulbo Seco	Diferença
Verão	06/02/1985	21,5	---	---
	24/01/1986	27,9	---	---
	04/01/1996	21,5	28,0	6,5
	06/01/1997	22,8	26,6	3,8
	27/12/1998	22,8	26,0	3,2
	11/02/2004	19,7	25,2	5,5
	03/02/2007	27,5	24,6	-2,9
	06/02/2008	19,3	25,2	5,9
	22/12/2008	19,7	27,0	7,3
	07/01/2009	17,9	25,1	7,2
Outono	27/04/1985	13,8	---	---
	05/05/1985	23,3	---	---
	01/06/1986	7,5	---	---
	07/04/1995	25,0	26,0	1,0
	23/04/1995	14,2	13,2	-1,0
	30/03/2004	21,9	23,4	1,5
	23/05/2006	8,0	7,2	-0,8
	28/03/2009	21,5	23,3	1,8
	13/04/2009	20,2	21,2	1,0
	29/04/2009	16,6	15,8	-0,8
Inverno	02/08/1991	5,5	3,8	-1,7
	08/09/1993	13,8	13,0	-0,8
	23/06/1994	10,4	10,0	-0,4
	30/07/1996	10,0	7,3	-2,7
	01/07/1997	6,5	5,5	-1,0
	18/08/1997	20,2	23,2	3,0
	04/07/1998	16,6	13,7	-2,9
	23/06/2000	6,5	7,0	0,5
	12/07/2001	4,5	---	---
	04/07/2004	9,0	10,4	1,4
02/07/2009	7,0	7,9	0,9	
Primavera	01/10/1984	19,3	19,1	-0,2
	10/12/1986	28,3	---	---
	19/11/1990	20,6	26,8	6,2
	21/10/1991	28,8	24,4	-4,4
	30/11/1994	20,6	23,0	2,4
	01/11/1995	20,2	22,4	2,2
	19/12/1995	21,5	29,3	7,8
	27/10/1999	19,3	23,2	3,9
	14/10/2006	22,8	24,8	2,0
	15/11/2006	26,6	24,8	-1,8
	01/12/2006	24,5	23,5	-1,0
	01/10/2007	21,1	19,8	-1,3
03/10/2008	14,7	17,2	2,5	

Analisando as diferenças entre a temperatura do termômetro e da temperatura de brilho, é possível observar que, no inverno e no outono, a diferença entre a temperatura do ar no bulbo seco e a temperatura de brilho da superfície diferem em até 3 °C, sendo que, no outono, a diferença máxima é de 1,8 °C. No verão, as diferenças entre as temperaturas ultrapassam os 3 °C, exceto pelo dia 03/02/2007, quando a diferença é de 2,9 °C. Na primavera, de 12 datas comparáveis, 4 têm diferença de temperatura acima de 3 °C (19/11/1990, 21/10/1991, 19/12/1995 e 27/10/1999).

As medidas de temperatura por sensores orbitais podem divergir, aproximadamente, 2 °C do valor real, podendo este valor ser maior, caso as medidas sejam realizadas em altitudes inferiores a 300 m (LILLESAND et al., 2008). Weng et al. (2004), afirmam que a diferença entre a temperatura de brilho e a temperatura da superfície pode diferir entre 1 a 5 °C. Assim, os valores de temperatura de brilho estão dentro da variação esperada para medidas obtidas através de sensores orbitais.

Foi calculado o coeficiente de correlação (r) entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco. O valor de r foi de 0,908286, e o gráfico de dispersão, mostrando a distribuição dos valores, é apresentado na Figura 6.1. Como se pode observar na Tabela 6.2, os valores de temperatura de brilho de verão são os que apresentam, conjuntamente, maior diferença de valores quando comparados às temperaturas de bulbo seco. Assim, calculou-se o coeficiente de correlação entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco para os dados das estações outono, inverno e primavera, excluindo-se os dados de verão. O novo cálculo de correlação teve valor de r igual a 0,93986. Na Figura 6.2 é apresentado o gráfico de dispersão para os dados das estações outono, inverno e primavera. Analisando as Figura 6.1 e Figura 6.2 é possível perceber que, ao aumentar a temperatura, independente de considerar, ou não, os dados de verão, os valores de temperatura de brilho e de bulbo seco apresentam maiores diferenças.

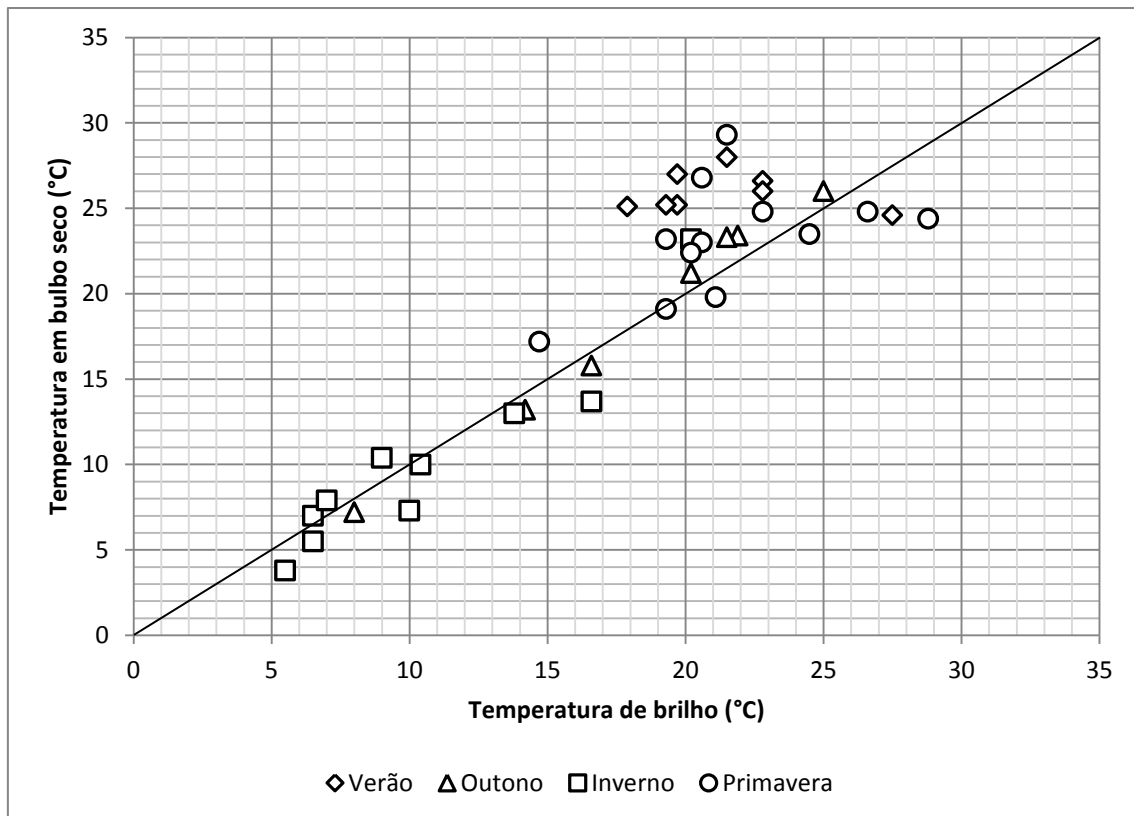


Figura 6.1. Gráfico dispersão entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco para todas as estações do ano.

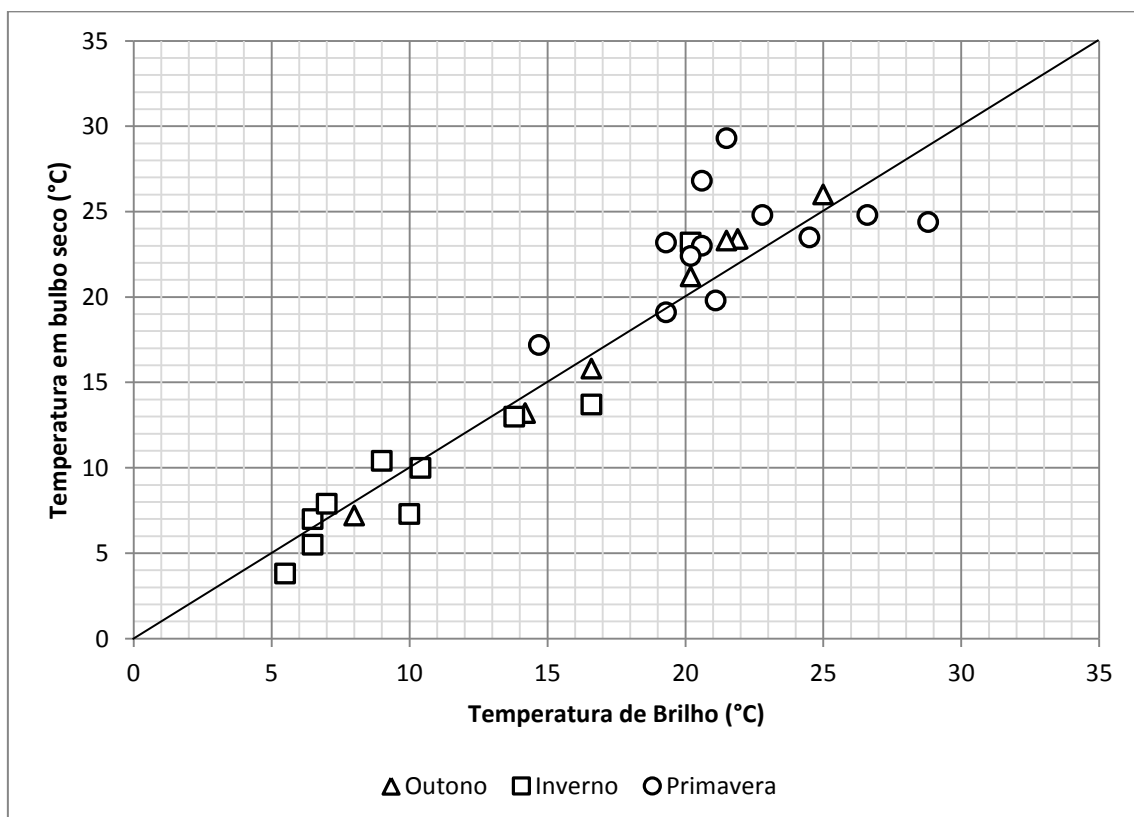


Figura 6.2. Gráfico dispersão entre temperatura de brilho e temperatura em bulbo seco para outono, inverno e primavera.

Lillesand et al. (2008) alertam que os efeitos atmosféricos na observação do infravermelho termal não sejam ignorados, visto que aerossóis, partículas em suspensão, fumaça, entre outros, modificam as medidas nesses comprimentos de onda. No entanto, é possível perceber que a ocupação urbana de Porto Alegre não é homogênea, provocando diferenças nas concentrações de gases e partículas. Em casos como esse, é bastante complexa a correção dos efeitos da atmosfera nos registros do sensor. No entanto, as temperaturas de superfície apresentaram forte correlação com os dados da estação do INMET e as diferenças registradas na imagem e no pixel referente à estação do INMET estão dentro dos limites relatados nas referências.

Após a análise dos valores de temperatura de brilho e do bulbo seco, foi realizada uma redução dos valores de temperatura de superfície para o valor de temperatura de brilho do pixel onde se localiza o INMET. Para tanto, foi diminuído, do valor dos pixels, a temperatura de brilho do pixel correspondente à estação do INMET em cada data. Com isso, é possível analisar áreas com temperatura acima ou abaixo de um valor de referência. Esses novos valores dos pixels serão chamados de “anomalia de temperatura” (AT), para facilitar a descrição e compreensão dos resultados. A escolha pelo valor da temperatura de brilho medida no pixel correspondente ao INMET deu-se pela forte correlação existente entre os valores de temperatura de brilho e temperatura no bulbo seco, facilitando comparativos neste trabalho e com outros trabalhos. Os valores de temperatura de brilho utilizados nessa redução dos valores das imagens são apresentados na Tabela 6.2.

Para analisar a distribuição de temperaturas em Porto Alegre, os dez bairros com maior aumento no número de domicílios entre 2000 e 2010 (censo IBGE), listados na Tabela 4.3, tiveram cálculo de estatísticas e leitura de valores de pixel. A escolha por esses bairros deu-se pela distribuição espacial na cidade de Porto Alegre, conforme mostra a Figura 6.3.

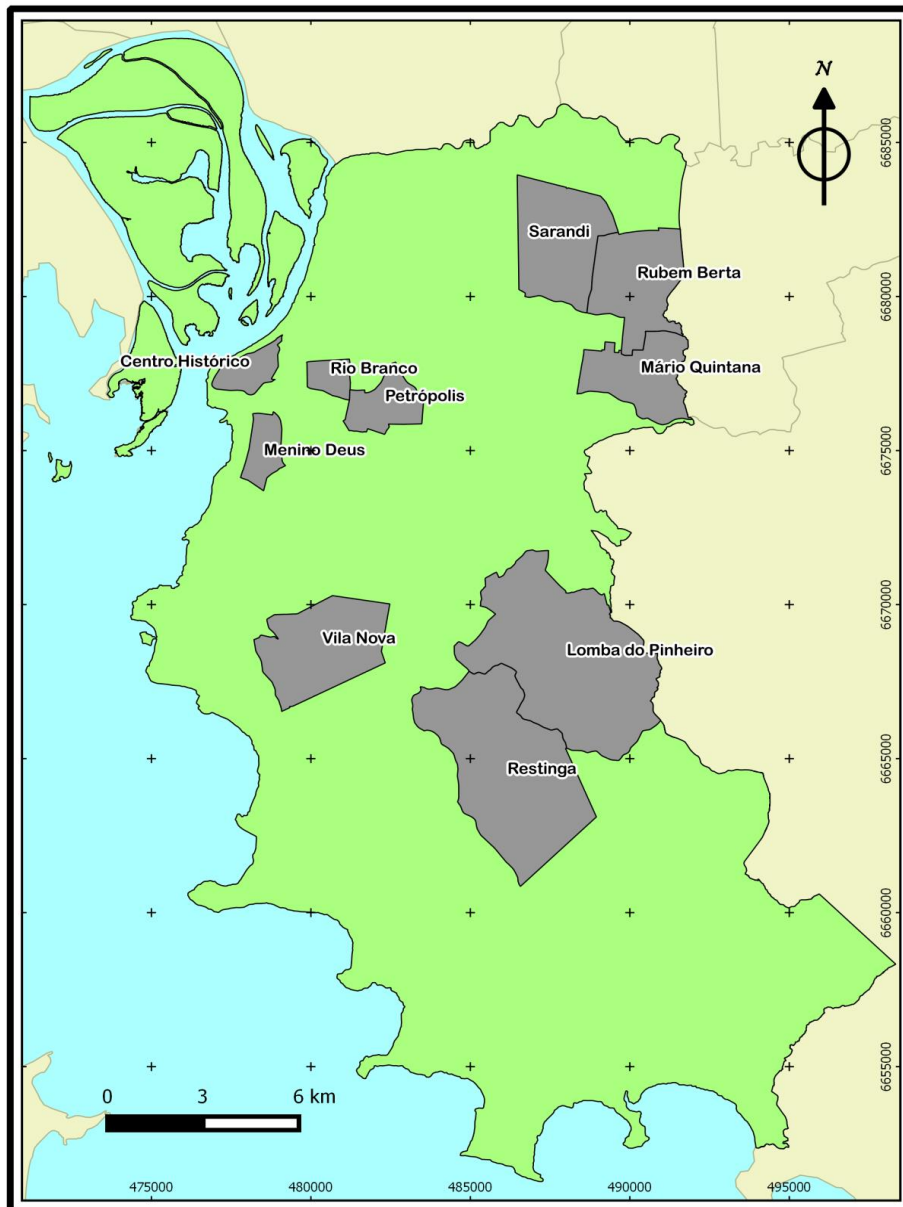


Figura 6.3. Localização dos dez bairros com maior crescimento no número de domicílios entre 2000 e 2010, selecionados para as análises deste trabalho.

Primeiramente, os valores de média foram calculados para os bairros selecionados. Os dados são apresentados na Tabela 6.3. Para facilitar a visualização dos dados da Figura 6.4, três gráficos foram gerados, dividindo-se os bairros em três grupos, quais sejam: (i) bairros centrais, abrangendo Centro Histórico, Menino Deus, Petrópolis e Rio Branco; (ii) região nordeste, contemplando os bairros Mário Quintana, Rubem Berta e Sarandi; e (iii) região sul, Lomba do Pinheiro, Restinga e Vila Nova.

Tabela 6.3. Valores das médias das diferenças entre a temperatura de brilho do pixel e a temperatura de brilho referente ao INMET. Valores em °C.

Data	Centro	Lomba do Pinheiro	Mário Quintana	Menino Deus	Petrópolis	Restinga	Rio Branco	Rubem Berta	Sarandi	Vila Nova
01/10/1984	2,3	0,5	1,3	2,8	1,8	1,1	2,1	2,4	2,8	0,7
06/02/1985	2,3	0,9	1,4	3,1	1,7	1,5	1,9	2,7	2,8	0,7
27/04/1985	1,5	0,7	1,0	1,8	1,3	1,3	1,3	1,6	1,5	0,7
05/05/1985	-0,2	-0,9	-0,3	1,1	0,0	-0,7	0,0	1,0	0,8	0,1
24/01/1986	2,1	-0,2	1,5	3,0	2,0	0,5	2,4	3,0	3,2	0,2
01/06/1986	1,1	0,9	1,5	1,5	0,6	1,2	0,6	1,7	1,5	0,5
10/12/1986	0,6	-1,3	0,4	3,4	1,8	-0,9	2,3	1,8	1,9	-0,7
19/11/1990	1,8	-0,2	0,4	1,9	1,8	0,1	1,8	1,5	1,8	0,4
02/08/1991	0,8	-0,6	0,4	0,1	-0,5	-0,1	-0,5	0,4	0,3	-1,0
21/10/1991	-0,1	-3,2	-0,6	1,3	-0,1	-2,3	0,2	0,8	1,6	-1,4
08/09/1993	0,1	-1,1	-0,1	0,7	-0,1	-0,7	-0,2	0,3	0,4	-0,7
23/06/1994	-0,2	-1,1	-0,1	-0,2	-0,8	-0,8	-0,6	-0,3	-0,3	-1,4
30/11/1994	2,1	-0,7	0,4	2,6	1,5	-0,3	2,1	1,6	2,0	-0,2
07/04/1995	0,9	-0,3	0,3	1,3	0,5	0,0	0,6	1,1	1,4	0,0
23/04/1995	0,1	-0,9	0,2	0,6	-0,4	-0,8	-0,5	0,6	0,8	-1,3
01/11/1995	2,1	-0,5	0,7	2,7	1,5	0,0	1,9	2,0	2,4	0,4
19/12/1995	-0,6	-1,3	-0,1	-0,2	-0,2	-0,9	-0,6	0,9	1,0	-0,8
04/01/1996	0,3	-1,7	-0,1	0,6	-0,1	-1,2	0,0	1,0	0,9	-0,8
30/07/1996	-0,6	0,1	0,7	0,0	-0,2	0,1	-0,6	0,3	0,1	0,4
06/01/1997	1,8	-0,9	0,6	2,4	1,4	-0,5	1,4	2,3	2,7	-0,1
01/07/1997	1,2	2,1	2,5	1,5	0,8	2,3	0,6	1,9	1,6	1,6
18/08/1997	1,4	0,6	0,9	1,5	1,0	0,6	1,0	1,7	1,9	0,9
04/07/1998	-0,6	-0,3	0,3	-0,1	-0,3	0,0	-0,6	0,3	0,1	0,0
27/12/1998	2,7	-0,4	1,4	3,5	2,1	0,1	2,6	2,7	3,0	0,5
27/10/1999	1,9	-0,6	0,9	2,5	1,2	-0,1	1,6	1,9	2,1	0,5
23/06/2000	0,9	3,8	3,0	1,5	1,1	3,1	0,8	2,7	2,4	2,1
12/07/2001	1,0	0,6	1,6	1,1	0,5	0,9	0,4	1,7	1,6	0,3
11/02/2004	2,6	0,6	2,3	3,1	2,7	0,9	2,7	4,2	4,4	1,1
30/03/2004	2,1	1,0	2,9	2,8	1,7	1,7	1,7	3,6	3,6	1,8
04/07/2004	0,8	-0,2	0,8	0,9	0,2	0,2	-0,1	1,4	1,3	-0,4
23/05/2006	1,3	1,5	2,3	1,8	0,9	1,8	0,3	2,5	2,5	1,1
14/10/2006	1,9	-0,3	1,7	2,7	1,6	0,1	1,6	3,1	3,3	0,6
15/11/2006	0,8	-2,0	0,7	1,7	0,5	-1,5	0,4	2,8	2,9	-1,1
01/12/2006	4,0	-0,4	2,4	4,8	3,2	0,2	3,6	4,5	4,8	0,9
03/02/2007	5,3	3,6	6,4	6,6	5,8	3,7	5,7	8,7	8,3	3,9
01/10/2007	1,8	-0,9	1,5	3,0	1,6	-0,3	1,4	3,1	3,0	0,1
06/02/2008	3,6	1,2	2,9	4,4	3,1	1,6	3,1	4,6	4,6	1,8
03/10/2008	3,4	1,2	3,6	4,2	3,0	1,7	2,8	5,1	5,0	1,5
22/12/2008	2,4	-0,7	2,0	2,8	1,7	-0,1	2,1	3,8	3,5	0,7
07/01/2009	4,2	1,6	3,6	4,7	3,7	2,2	3,8	5,5	5,5	1,8
28/03/2009	0,6	-0,5	1,0	1,4	0,3	-0,1	0,0	2,0	1,8	-0,3
13/04/2009	2,4	1,4	2,4	2,9	1,3	2,1	1,7	4,4	4,2	1,7
29/04/2009	2,3	3,1	4,3	3,0	1,7	3,4	1,8	4,9	4,5	2,4
02/07/2009	0,8	1,8	2,2	1,2	0,6	1,7	0,1	2,3	1,9	0,5

A partir dos dados da Tabela 6.3, foram gerados os gráficos da Figura 6.4. Analisando esses gráficos, é possível notar que os bairros da região sul possuem menores valores de AT, com uma maior quantidade de AT negativas. Os bairros da região central possuem comportamento bastante similar. Destaca-se o comportamento do bairro Menino Deus, que possui as maiores AT em todas as datas.

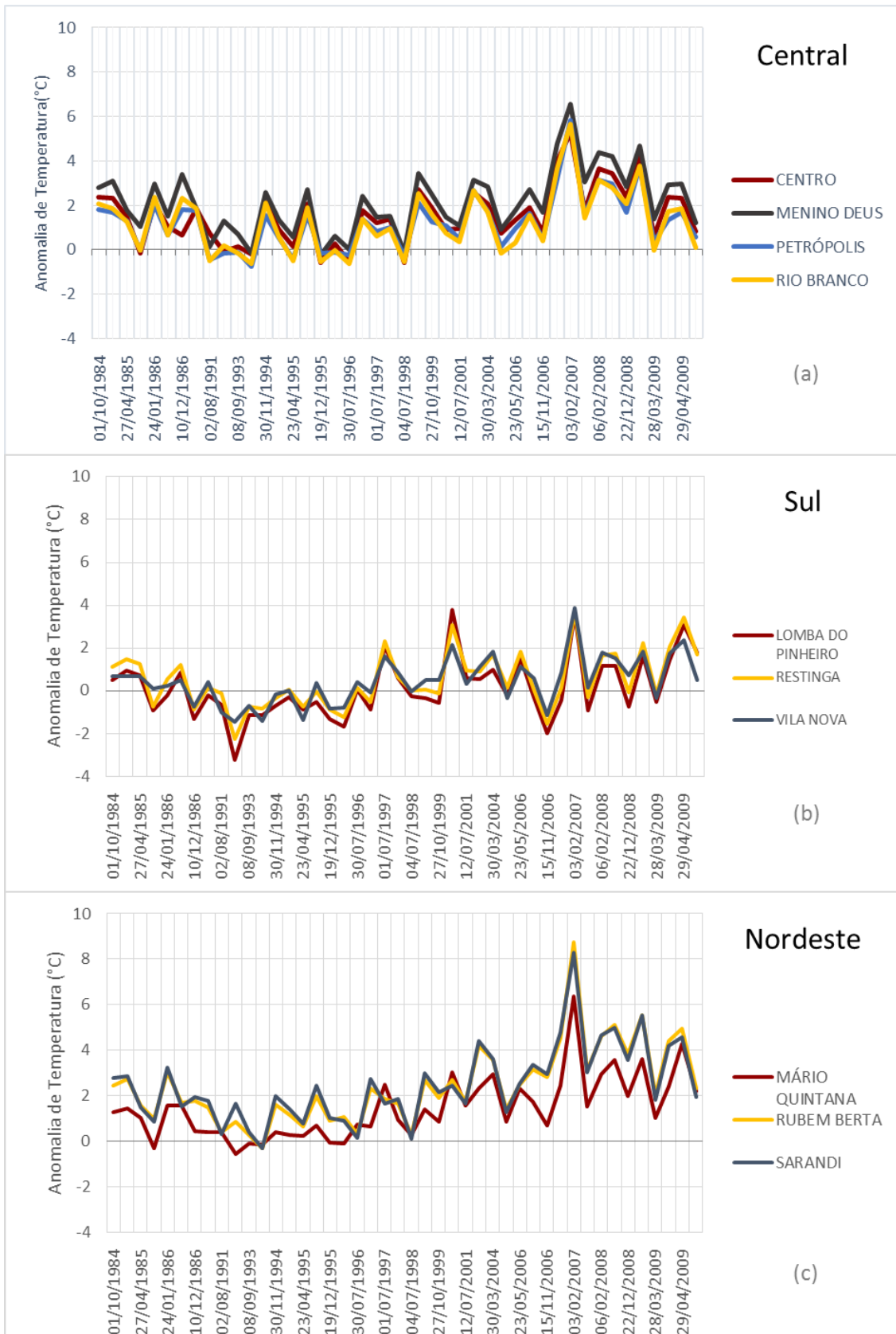


Figura 6.4. Médias calculadas para a Anomalia de Temperatura. Em (a), tem-se o gráfico dos bairros centrais, em (b), os bairros da região sul e, em (c), os bairros da região nordeste.

Os bairros da região nordeste apresentam AT positivas, com poucas AT negativas. Sarandi e Rubem Berta têm comportamento bastante similar, enquanto o bairro Mário Quintana, que apresenta valores baixos até o início dos anos 2000, passa a se aproximar das variações descritas pelos outros dois bairros da região. Os valores e gráficos, apresentados na Tabela 6.3 e na Figura 6.4, não estão separados por estação do ano. Assim, para facilitar a interpretação e evolução dos dados, foram gerados gráficos por estação.

Na Figura 6.5, são apresentados os gráficos da AT dos bairros centrais, divididos por estação. Analisando os gráficos, é possível notar que o bairro Menino Deus possui as maiores AT, e que os bairros Centro Histórico, Petrópolis e Rio Branco têm comportamento similar ao longo do tempo. Para verão, outono e primavera, os valores de AT não ultrapassam 4 °C, exceto nas datas 03/02/2007 (verão) e 01/12/2006 (primavera). Nesta última data, apenas o bairro Menino Deus excedeu os 4 °C. Na estação inverno, a quantidade de AT negativas é maior, e os valores positivos não ultrapassam 2 °C. Além disso, no inverno os bairros possuem comportamento mais homogêneo, com as curvas mais próximas.

Região Central

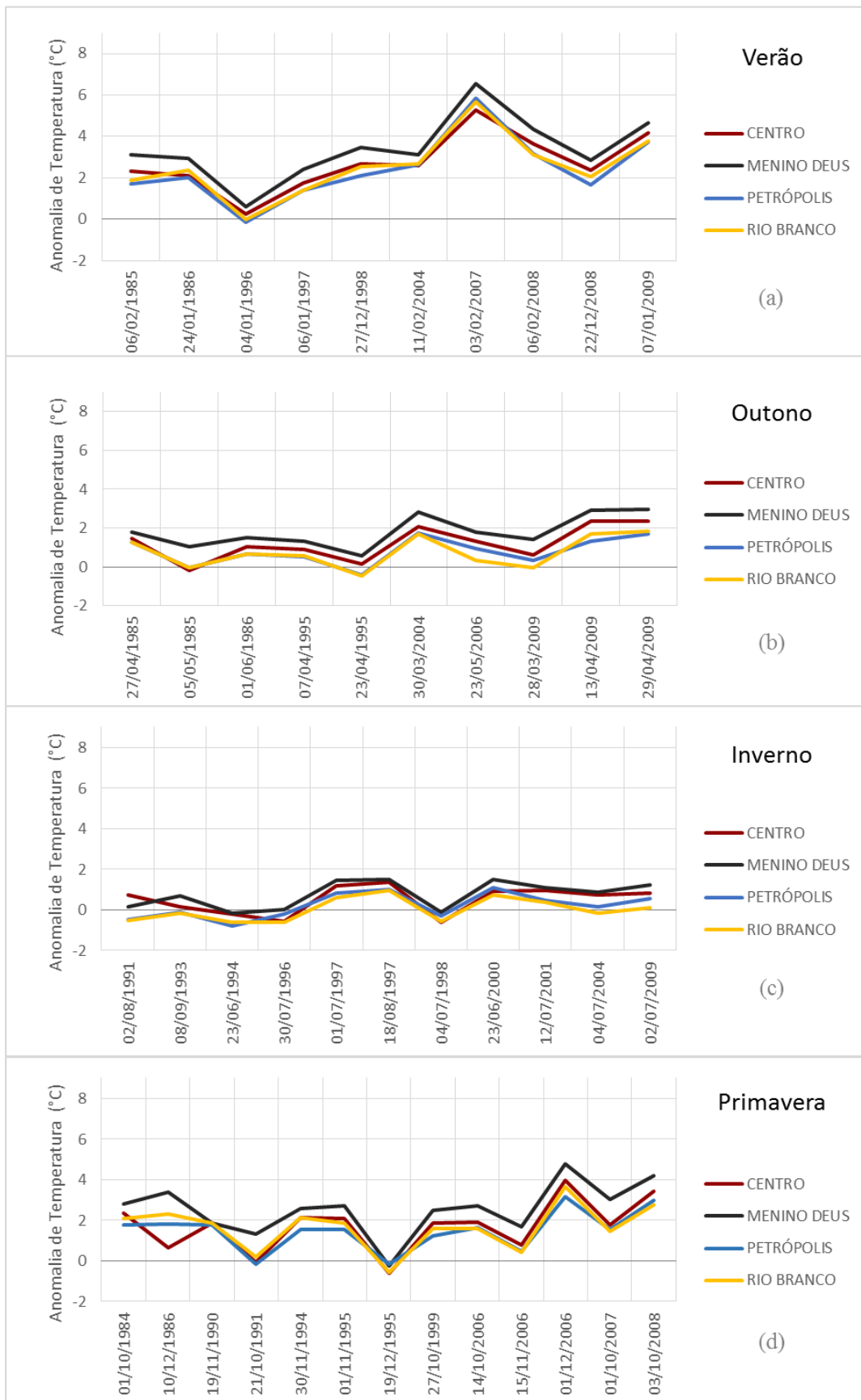


Figura 6.5. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região central. São apresentados os gráficos para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

Os bairros da região sul possuem um comportamento bastante estável na estação primavera (Figura 6.6d), com grande quantidade de AT negativas e AT positivas inferiores a 2 °C. Para as estações verão (Figura 6.6a), outono (Figura 6.6b) e inverno (Figura 6.6c), esses bairros mostram variação nas AT entre -2 °C e 4 °C. Comparando os gráficos dos bairros da região sul com os resultados dos bairros centrais, é possível notar que os bairros do sul têm menores AT e uma quantidade maior de AT negativas nas estações verão, outono e primavera. Para algumas datas de inverno, os bairros da região sul têm AT positivas superiores às registradas nos bairros centrais.

Região Sul

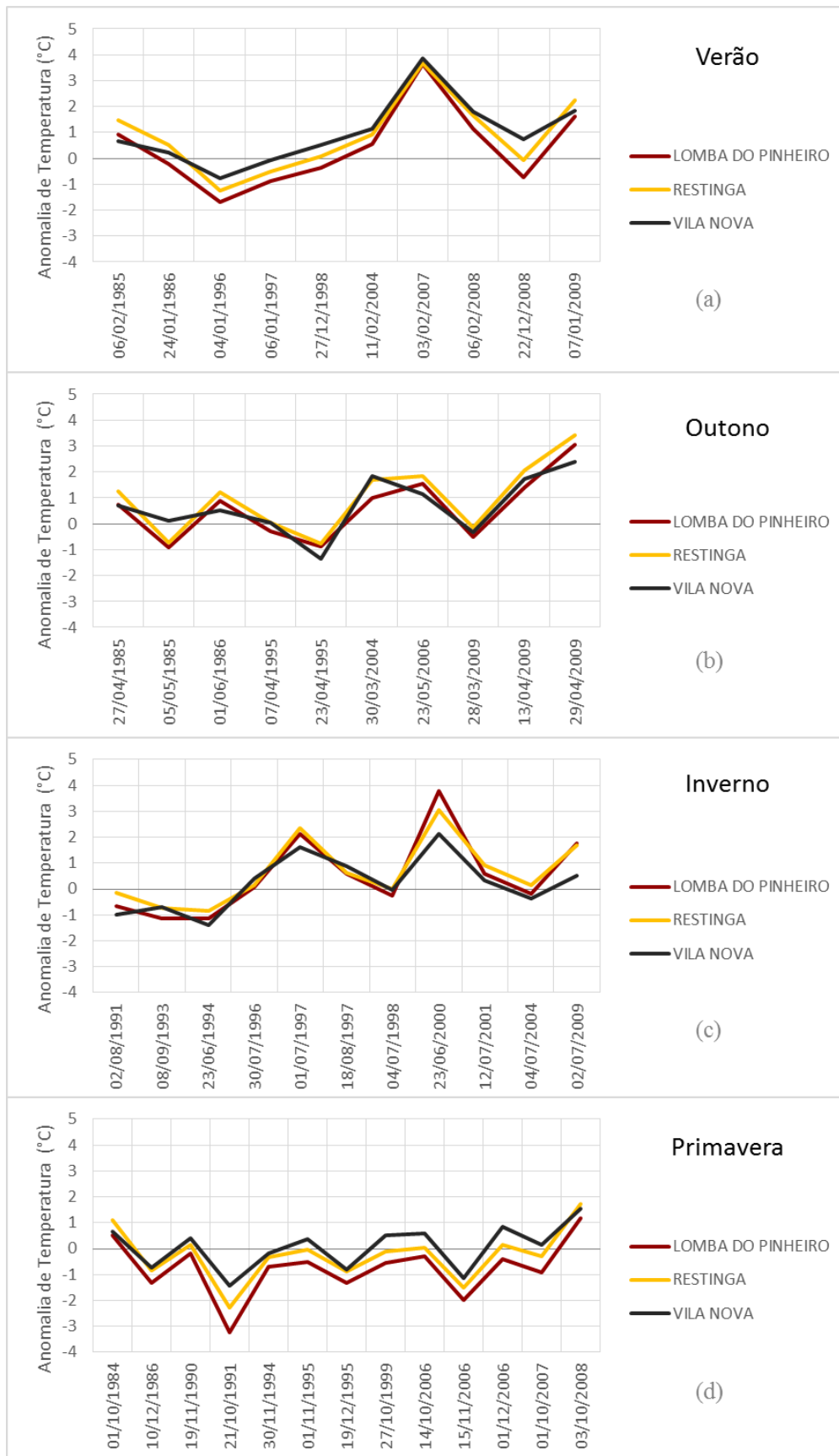


Figura 6.6. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região sul. São apresentados os gráficos para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

Quando visualizados os dados dos bairros da região nordeste, é possível constatar que o bairro Mário Quintana possui menores valores de AT, sendo maior essa diferença nas estações verão (Figura 6.7a) e primavera (Figura 6.7d). Sarandi e Rubem Berta têm valores bastante similares em todas as estações.

Analisando os dados dos bairros da região nordeste e comparando com os gráficos dos bairros centrais e da região sul, observa-se uma similaridade nos comportamentos das diferentes regiões. Nas estações verão (Figura 6.7a) e outono (Figura 6.7b), as curvas dos bairros Rubem Berta e Sarandi têm comportamento similar às curvas dos bairros centrais, mas os valores de AT são levemente mais altos nos bairros da região nordeste. No inverno (Figura 6.7c), os bairros anteriormente citados têm gráficos parecidos com os dos bairros da região sul. Contudo, Rubem Berta e Sarandi têm menos AT negativas. Para os valores de primavera, os bairros da região nordeste apresentam um comportamento estável, com uma tendência crescente nos dados provenientes das imagens dos anos 2000.

Região Nordeste

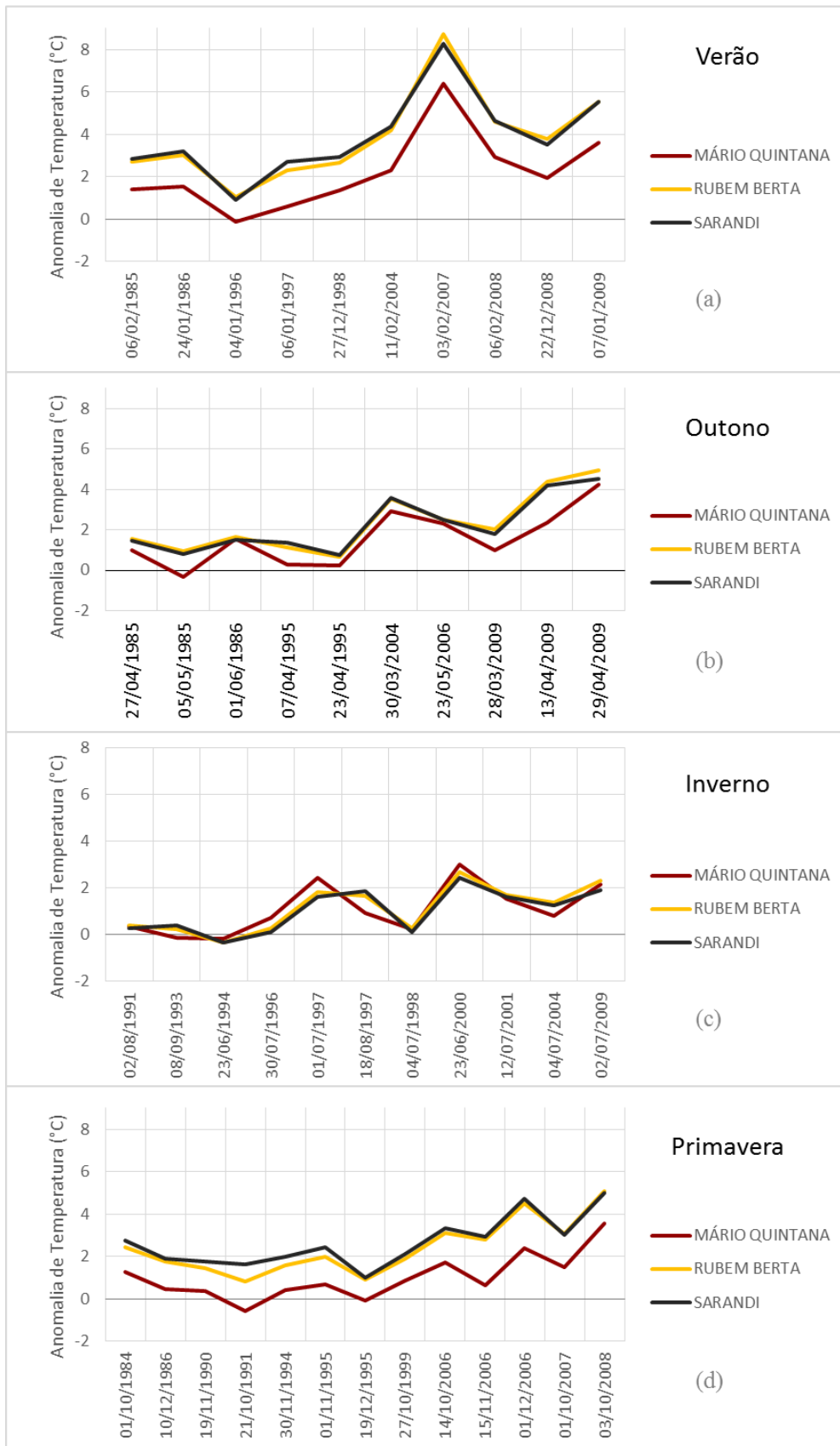


Figura 6.7. Médias da Anomalia de Temperatura para os bairros da região nordeste. São apresentados os gráficos para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

Os resultados das médias das AT por bairro mostram que nos bairros da região sul há maior ocorrência de diferenças negativas e, nas estações mais quentes, *i.e.* primavera e verão, as diferenças de temperatura são menores que nas demais regiões da cidade. Os bairros da região sul têm parte de suas áreas na macrorregião Cidade Rururbana do PPDUA, caracterizada por uma ocupação urbana rarefeita. Conforme Howard (1847), as temperaturas das áreas rurais são mais baixas que as dos centros urbanos. Oke (1987) detalha essa diferença nas temperaturas dos centros urbanos e do entorno (Figura 3.2), mostrando que as temperaturas das áreas rurais e suburbanas são menores que as registradas nas áreas densamente urbanizadas. Por sua característica de bairros de subúrbio, na interface do rural e do urbano, esses resultados estão de acordo com referências clássicas de clima urbano.

Os bairros da região nordeste, apesar de estarem distantes do Centro Histórico, localizam-se na conurbação formada pelos municípios de Porto Alegre e Alvorada. Além disso, esses bairros localizam-se nas macrozonas Cidade Xadrez e Corredor de Desenvolvimento e em porções dos corredores de Centralidade e da Produção. Assim, a região nordeste caracteriza-se por zona de intensa ocupação urbana e não como zona suburbana, inviabilizando a comparação de suas temperaturas com as da região central a partir das relações entre ocupação urbana e temperatura, propostas por Oke (1987).

A média de um bairro contém valores de AT de áreas urbanizadas e de áreas vegetadas, pois os bairros são compostos por uma mistura de áreas com diferentes usos e coberturas do solo. Contudo, é importante verificar se as áreas urbanizadas, nas diferentes regiões, possuem valores de AT próximos dos valores das médias dos bairros. Essa comparação se faz necessária para analisar a interferência da geometria urbana nos valores de temperatura de superfície. Oke (1987), Marciotto et al. (2010) e Theeuwes et al. (2014), consideram a geometria dos cânions urbanos e da iluminação da superfície impermeabilizada como atenuadora, ou intensificadora, na alteração das temperaturas dos ambientes urbanos.

Assim, foi escolhido um bairro por região anteriormente analisada e, no bairro escolhido, foi selecionado um pixel referente à área urbanizada entre 1984 e 2009, sendo medida a AT, na posição deste pixel, nas 44 imagens listadas na Tabela 6.1. Os bairros selecionados foram Centro Histórico (região central), Restinga (região sul) e Rubem Berta (região nordeste). Os valores de média e de pixel urbano para cada bairro e para cada imagem são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4. Valores da média da AT para o bairro e o valor da AT em um pixel da área urbana do bairro. Valores em °C.

	CENTRO			RESTINGA			RUBEM BERTA		
	Bairro	Perfil	Diferença	Bairro	Perfil	Diferença	Bairro	Perfil	Diferença
01/10/1984	2,3	0,4	-1,9	1,1	3,5	2,4	2,4	5,7	3,3
06/02/1985	2,3	0,9	-1,4	1,5	4,3	2,8	2,7	4,8	2,0
27/04/1985	1,5	0,0	-1,5	1,3	2,3	1,0	1,6	2,8	1,2
05/05/1985	-0,2	-0,5	-0,3	-0,7	1,7	2,4	1,0	2,1	1,1
24/01/1986	2,1	0,9	-1,3	0,5	5,0	4,4	3,0	5,4	2,3
01/06/1986	1,1	0,0	-1,1	1,2	2,0	0,8	1,7	2,5	0,8
10/12/1986	0,6	0,9	0,2	-0,9	3,3	4,2	1,8	5,4	3,6
19/11/1990	1,8	0,9	-0,9	0,1	2,7	2,5	1,5	3,1	1,6
02/08/1991	0,8	-1,0	-1,8	-0,1	0,5	0,6	0,4	1,5	1,1
21/10/1991	-0,1	-1,2	-1,1	-2,3	1,7	3,9	0,8	3,3	2,4
08/09/1993	0,1	-0,5	-0,6	-0,7	0,4	1,2	0,3	1,4	1,1
23/06/1994	-0,2	0,0	0,3	-0,8	0,0	0,9	-0,3	0,0	0,4
30/11/1994	2,1	0,9	-1,2	-0,3	2,2	2,5	1,6	4,4	2,8
07/04/1995	0,9	-0,5	-1,3	0,0	1,7	1,6	1,1	2,5	1,4
23/04/1995	0,1	-0,4	-0,5	-0,8	0,5	1,3	0,6	1,9	1,3
01/11/1995	2,1	1,3	-0,8	0,0	3,1	3,1	2,0	4,3	2,4
19/12/1995	-0,6	-0,9	-0,3	-0,9	1,7	2,5	0,9	2,1	1,2
04/01/1996	0,3	-0,4	-0,7	-1,2	0,9	2,1	1,0	2,6	1,6
30/07/1996	-0,6	0,0	0,5	0,1	0,9	0,8	0,3	1,4	1,1
06/01/1997	1,8	0,0	-1,8	-0,5	2,6	3,1	2,3	6,0	3,7
01/07/1997	1,2	-0,5	-1,7	2,3	3,9	1,6	1,9	3,0	1,1
18/08/1997	1,4	1,3	-0,1	0,6	1,3	0,7	1,7	3,5	1,8
04/07/1998	-0,6	-0,5	0,1	0,0	0,4	0,4	0,3	1,3	1,1
27/12/1998	2,7	1,7	-0,9	0,1	4,3	4,2	2,7	5,6	2,9
27/10/1999	1,9	0,4	-1,4	-0,1	3,1	3,2	1,9	4,4	2,5
23/06/2000	0,9	-0,5	-1,4	3,1	3,5	0,4	2,7	3,9	1,3
12/07/2001	1,0	0,0	-1,0	0,9	1,5	0,6	1,7	2,5	0,8
11/02/2004	2,6	1,8	-0,8	0,9	4,8	3,9	4,2	7,0	2,8
30/03/2004	2,1	1,4	-0,7	1,7	4,8	3,1	3,6	5,2	1,6
04/07/2004	0,8	-0,5	-1,3	0,2	1,4	1,3	1,4	1,9	0,5
23/05/2006	1,3	-0,5	-1,8	1,8	4,4	2,5	2,5	4,4	1,9
14/10/2006	1,9	1,7	-0,1	0,1	3,9	3,8	3,1	6,0	2,8
15/11/2006	0,8	0,0	-0,8	-1,5	4,2	5,7	2,8	7,0	4,1
01/12/2006	4,0	1,8	-2,2	0,2	5,5	5,3	4,5	8,4	3,8
03/02/2007	5,3	2,9	-2,3	3,7	9,7	6,0	8,7	12,4	3,7
01/10/2007	1,8	1,7	0,0	-0,3	3,9	4,2	3,1	6,4	3,3
06/02/2008	3,6	2,2	-1,4	1,6	6,1	4,5	4,6	7,8	3,2
03/10/2008	3,4	1,4	-2,0	1,7	5,5	3,7	5,1	8,1	3,0
22/12/2008	2,4	0,9	-1,4	-0,1	4,4	4,5	3,8	6,6	2,7
07/01/2009	4,2	3,2	-1,0	2,2	7,1	4,9	5,5	8,8	3,3
28/03/2009	0,6	0,4	-0,2	-0,1	2,6	2,8	2,0	4,3	2,3
13/04/2009	2,4	0,9	-1,5	2,1	4,3	2,3	4,4	6,1	1,7
29/04/2009	2,3	0,4	-1,9	3,4	6,2	2,8	4,9	6,7	1,7
02/07/2009	0,8	-0,5	-1,3	1,7	3,0	1,3	2,3	3,4	1,1

Para visualizar os resultados, foram gerados gráficos para a média dos bairros e para os valores medidos no pixel da área urbanizada (Figura 6.8). Os resultados estão separados por estação, para facilitar a interpretação das diferenças de temperatura.

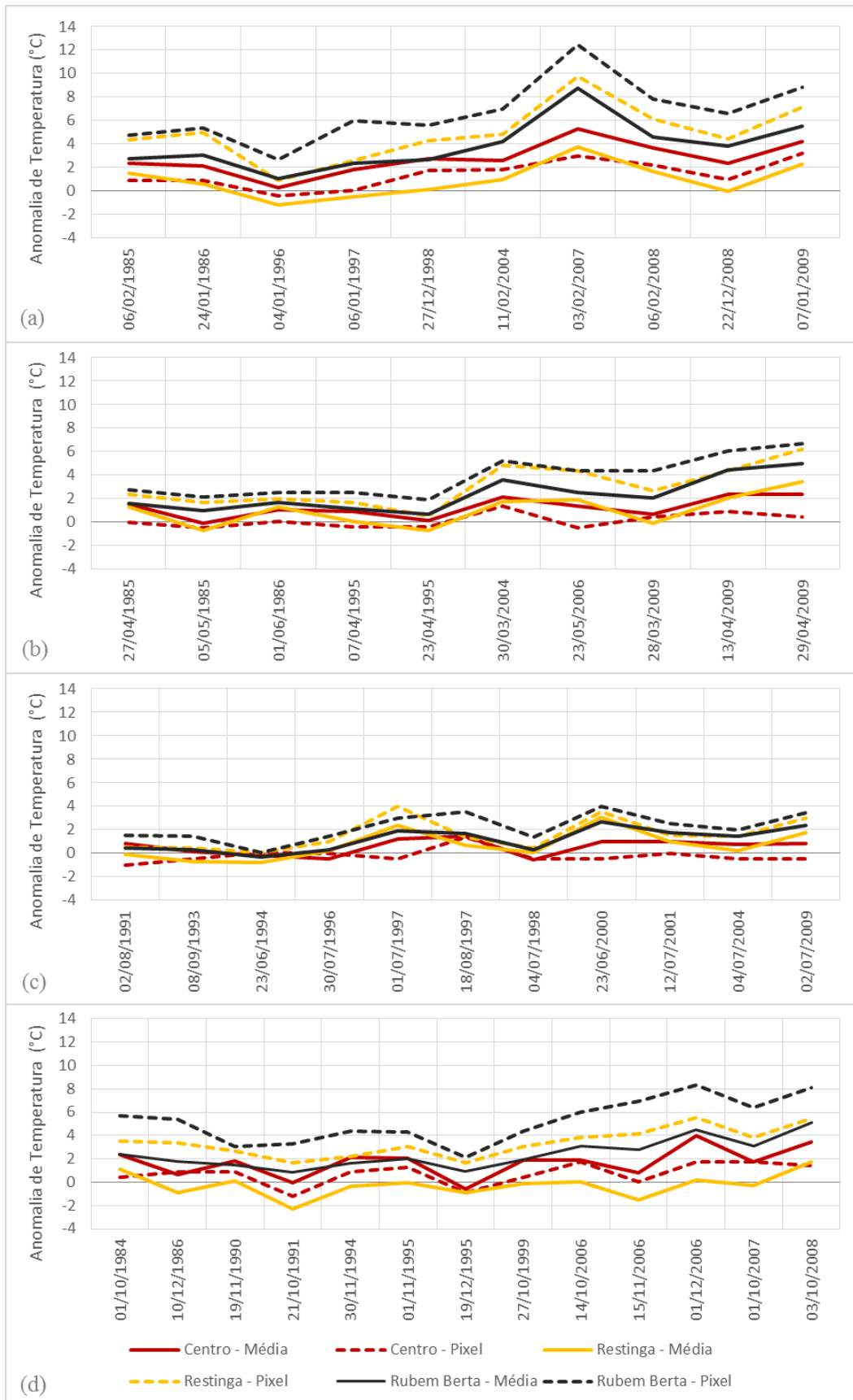


Figura 6.8. Comparativo entre as médias da AT para o bairro e a AT medida em um pixel da área urbana do mesmo bairro. São apresentados os gráficos para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

Analisando a Tabela 6.4 e a Figura 6.8, é possível notar que os bairros Restinga e Rubem Berta possuem médias de AT mais baixas que os valores de AT dos pixels da área urbana destes bairros. Já o bairro Centro Histórico possui comportamento inverso, com os valores do pixel da área urbana menores que a média do bairro, exceto no inverno, quando os valores do pixel da média se alternam. É importante ressaltar que os bairros Restinga e Rubem Berta possuem ocupação por moradias do tipo casa e seus habitantes são de classes mais populares (Barcellos, 2004). O Centro Histórico, mais verticalizado, concentra prédios comerciais e residenciais, abrigando grande parte do comércio e dos serviços da cidade. Diante do exposto, pode-se associar as temperaturas mais altas dos pixels dos bairros Restinga e Rubem Berta ao tipo de geometria da ocupação urbana, mais horizontal, enquanto as temperaturas mais baixas do pixel do Centro estariam associadas à geometria vertical de ocupação no referido bairro.

Além da diferença na geometria de ocupação entre o bairro Centro e os bairros Restinga e Rubem Berta, deve-se considerar o armazenamento de energia pela superfície urbana (Figura 3.1 e Equação1). Áreas verticalizadas impedem a iluminação da superfície, visto que os prédios causarão sombra. Assim, quanto menos energia incidir na superfície (Q^*) menor será o armazenamento de energia e posterior emissão. Os bairros Restinga e Rubem Berta apresentam diferença entre a média da AT no bairro e a AT de um pixel da área urbana porque a predominância de casas facilita a incidência de energia, aumentando o armazenamento dessa energia pelo solo impermeabilizado e pelos materiais de construção e a posterior emissão dessa energia armazenada. Ainda, os bairros periféricos possuem núcleos com ocupação urbana intensa e vazios urbanos ou áreas com características rurais (bairro Restinga). Os vazios urbanos e as chácaras rururbanas são predominantemente cobertos por vegetação, diminuindo o armazenamento e a emissão de energia. Assim, quando os pixels dessas áreas com menor emissão são inseridos na média da AT do bairro, eles provocam uma diminuição no valor da média, visto que são áreas mais frescas que as áreas urbanizadas.

Para verificar a relação da distribuição das temperaturas de superfície com a geometria de ocupação urbana, é preciso visualizar, espacialmente, a ocorrência de áreas com maiores valores de fração solo e de fração sombra. Na Figura 6.9, é apresentada a distribuição de fração sombra para todo o município de Porto Alegre. A imagem-fração foi gerada a partir da cena de 03/10/2008, utilizada nas análises dos capítulos anteriores. São destacados os bairros Centro Histórico, Restinga e Rubem Berta, contornados com as cores preta, branca e amarela, respectivamente. Nota-se uma

verticalização intensa no bairro Centro Histórico e baixos valores de sombra nos outros dois bairros, evidenciando baixa verticalização.

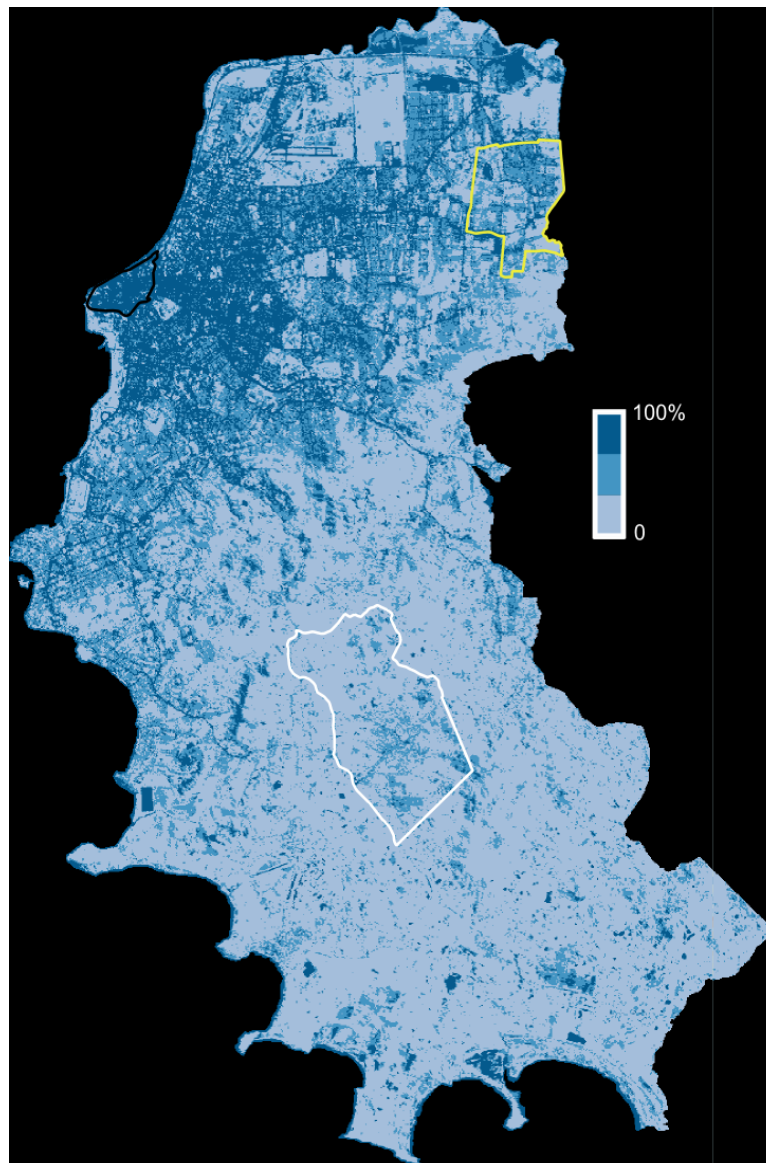


Figura 6.9. Distribuição da fração sombra no município de Porto Alegre. Imagem-fração gerada a partir da cena da data 03/10/2008. Estão destacados os bairros Centro Histórico (preto), Restinga (branco) e Rubem Berta (amarelo).

Para analisar a distribuição da fração solo no município de Porto Alegre, é apresentada a Figura 6.10, onde estão destacados os bairros Centro Histórico (preto), Restinga (branco) e Rubem Berta (amarelo). É possível observar os altos valores de solo nos bairros Restinga (núcleo urbano) e Rubem Berta. O Centro Histórico, ao contrário dos outros dois bairros, possui baixos valores de solo.

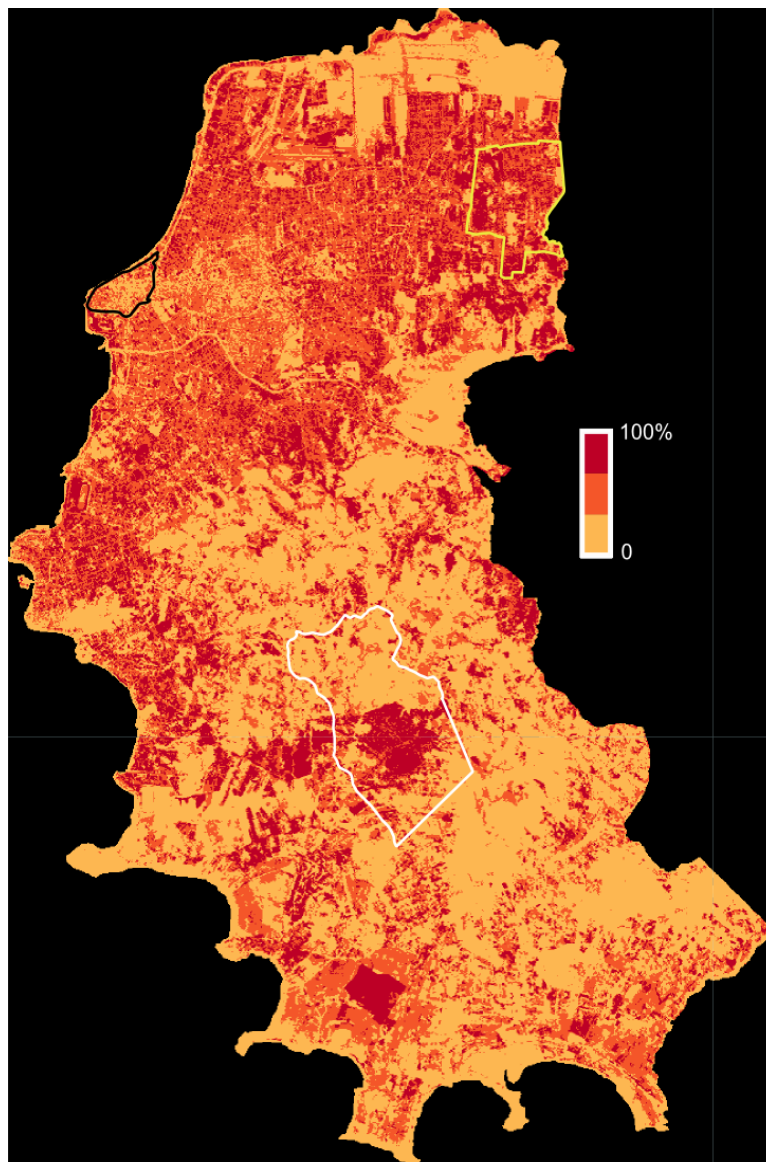


Figura 6.10. Distribuição da fração solo no município de Porto Alegre. Imagem-fração gerada a partir da cena da data 03/10/2008. Estão destacados os bairros Centro Histórico (preto), Restinga (branco) e Rubem Berta (amarelo).

Interpretando as Figura 6.9 e Figura 6.10, é possível caracterizar as áreas urbanas dos bairros Restinga e Rubem Berta como pouco verticalizadas, e o Centro Histórico como área com alta verticalização. Para verificar a relação entre a geometria da ocupação urbana e temperatura de superfície, é apresentada a Figura 6.11, que mostram a distribuição de AT para todo o município de Porto Alegre. As referidas figuras foram selecionadas aleatoriamente, correspondendo às datas 03/02/2007, 13/04/2009, 18/08/1997 e 01/10/1984, e representam décadas e estações diferentes. São destacados os bairros Centro Histórico (preto), Restinga (marrom) e Rubem Berta (verde).

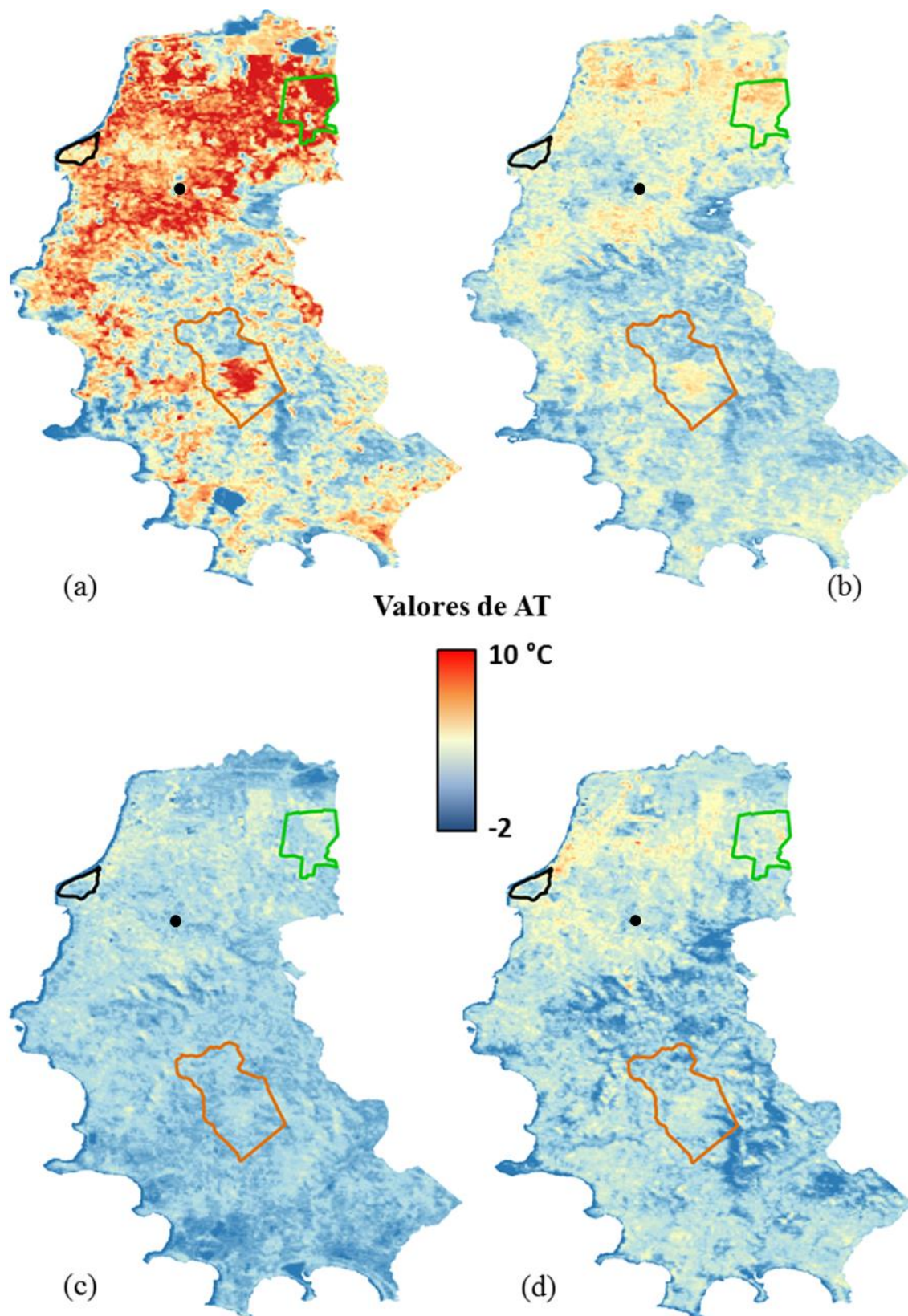


Figura 6.11. Distribuição da AT em (a) 03/02/2007, (b) 13/04/2009, (c) 18/08/1997 e (d) 01/10/1984. Estão destacados os bairros Centro Histórico (preto), Restinga (marrom) e Rubem Berta (verde). Os pontos pretos representam a localização da estação do INMET.

Observando as imagens de AT (Figura 6.11), é possível notar que o Centro Histórico possui, em grande parte da sua área, temperaturas mais baixas que as registradas no bairro Rubem Berta e no núcleo urbano da Restinga. Assim como o Centro Histórico, outros bairros verticalizados, como Petrópolis e Rio Branco (discutidos no Capítulo 5), localizados nas macrorregiões Corredor de Urbanidade e Cidade Radiocêntrica do PPDUA, apresentam temperaturas de superfície mais baixas que em bairros vizinhos.

Analisando as Figura 6.9 e Figura 6.10, de fração sombra e solo, e Figura 6.11, é possível verificar que, além das diferenças de temperatura entre a área rural e a área urbana, estudadas por Howard (1847) e Oke (1987), a geometria da ocupação urbana está relacionada às variações nas temperaturas da área urbana, provocadas pela interferência das edificações na insolação da superfície (OKE, 1987; MARCIOTTO et al., 2010; THEEUWES et al., 2014).

7 CONCLUSÕES

A fração solo, gerada a partir de MLME, utilizada na identificação das áreas com ocupação e com expansão urbana, apresentou resultados compatíveis com descrições do uso do solo. O uso da imagem razão (fração sombra 2008 dividida pela fração sombra 1999) para a identificação de áreas de expansão e de ocupação de vazios urbanos mostrou eficiência, visto que as áreas identificadas na imagem correspondem a registros de mudança na ocupação, seja em artigos, seja em sítios eletrônicos de empreendimentos.

A utilização do MLME na detecção do crescimento vertical, através da análise das frações sombra, mostrou similaridade com os dados altimétricos, provenientes do laser scanner. Mesmo degradando os dados do Laser Scanner, inicialmente com resolução espacial de 1 metro e reamostrado para 30 metros, foi possível verificar a ocorrência de sombra nos locais onde há edificações, apesar da heterogeneidade dos ambientes urbanos e da complexa mistura espectral existente.

A obtenção dos valores de temperatura de superfície, a partir da banda termal do Landsat 5 TM apresentou forte correlação entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar em bulbo seco em um mesmo ponto. Além disso, as diferenças entre as duas medidas estão dentro dos intervalos encontrados nas referências. No entanto, é importante ressaltar que a série de imagens não é contínua, nem homogênea. Por isso, torna-se difícil traçar tendências, em especial de temperaturas, pois não há uma distribuição regular dos imageamentos nem a aquisição periódica de imagens em todas as estações.

As análises das médias das temperaturas de superfície por bairro mostram que as regiões com ocupação urbana têm temperaturas mais altas que as regiões com urbanização rarefeita, estando esse resultado em acordo com trabalhos clássicos de clima urbano. No entanto, ao verificar os valores dos pixels de áreas urbanizadas e a distribuição espacial das temperaturas de superfície, foi possível constatar que áreas habitadas por classes mais populares, com predominância de casas, apresentam maiores

temperaturas. Bairros próximos do Centro Histórico, mais verticalizados, registram menores temperaturas no interior das áreas urbanas. Esse resultado segue as evidências que relacionam a influência das edificações no sombreamento da superfície na alteração do balanço de energia nos cânions urbanos e, conseqüentemente, em toda a área urbana.

A utilização do MLME, para compreender a geometria da ocupação urbana de Porto Alegre, e do infravermelho termal, para visualizar a relação entre a estrutura urbana e as distribuições espaciais de temperatura de superfície, apresentou resultados semelhantes aos dados disponíveis de uso e ocupação do solo e está de acordo com evidências encontradas nas referências consultadas. Essa metodologia possibilitou a geração de informações a respeito de características das áreas urbanas e do clima urbano de Porto Alegre, ambos ainda pouco investigados e divulgados nos principais bancos de dados de trabalhos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, M.; WEEKS, R.; COE, S. Urban land-cover change analysis in Central Puget Sound. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 70, n. 9, p. 1043-1052, 2004.
- BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 54, p. 83-94, 1999.
- BARCELLOS, T. M. Região Metropolitana de Porto Alegre: expansão urbana e dinâmica imobiliária nos anos 90. *Indicadores Econômicos FEE*, v. 32, n. 1, p. 65 – 90, 2004.
- BRANDÃO, A. M. P. M. O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. In: MENDONÇA, F., MONTEIRO, C. A. F. *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003. Cap. 5, p. 121-154.
- CABETTE, A.; STROHAECKER, T. M. Porto Alegre: uma análise da nova estrutura etária e a configuração do espaço urbano. *Boletim Gaúcho de Geografia*, v. 41, p. 94 – 107, 2014.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 4, n. 3, p. 490-494, 2007.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, p. 893-903, 2009.
- CHANDER, G.; HAQUE, M. O.; MICIJEVIC, E.; BARSÍ, J. A. A procedure for radiometric recalibration of Landsat 5 TM reflective-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 48, n. 1, p. 556 – 574, 2010.
- CLEUGH, H. Chapter 13: Urban Climate. In: HENDERSON-SELLERS, A.. *Future climates of the world: a modelling perspective*. Londres: Elsevier, 1995. Cap. 13, p. 477-514. (World Survey of Climatology Volume 16). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168632106800362>>. Acesso em: 27 dez. 2011.
- COLLISCHONN, E. Área verde como oásis térmico na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS. *ACTA Geográfica*, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, 165-183, 2012.
- COLTRI, P. P. *Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto*. 2006. 167 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- DAN, S., XUE, W., DAN, B., XU, H., HE, J. Comparison and analysis of research methods for urban heat island effect based on Landsat TM6. *2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, 2010.

- DANNI, I. M. A ilha térmica de Porto Alegre. *Boletim Gaúcho de Geografia*, n. 8, p. 33-48, 1980.
- DASH, P.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S.; FISCHER, H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice – current trends. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 13, p. 2563 – 2594, 2002.
- DAWELBAIT, M.; MORARI, F. Monitoring desertification in a Savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis. *Journal of Arid Environments*, v. 80, p. 45-55, 2012
- DENG, C.; WU, C. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. *Remote Sensing of Environment*, v. 131, 262-274, 2013.
- DOUSSET, B., & GOURMELON, F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, 43-54, 2003.
- FROTA, A. B., & SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo (7ª Edição ed.). São Paulo: Studio Nobel, 2006.
- FUCKNER, M. A., MORAES, E. C., FLORENZANO, T. G. Processamento de dados multiespectrais termais aplicados à análise espaço-temporal dos padrões de temperatura da superfície nas regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal: INPE, 1369-1376, 2009.
- GARTLAND, L. *Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- GOLDZSTEIN. *Jardim Europa*. Disponível em <http://www.goldsztein.com.br/~aldeia/jdeuropa/conheca_goldsztein.php>. Acesso em 14 ago. 2014.
- GRONDONA, A. E. B.; VEETIL, B. K.; ROLIM, S. B. A. Urban heat island. Development during the last two decades in Porto Alegre, Brazil and its monitoring. In: *Proceedings of the JURSE 2013*. São Paulo: IEEE, 61-64, 2013.
- HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 54, p. 130-137, 1999.
- HAERTEL, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALMEIDA-FILHO, R. Fraction images in multitemporal change detection. *International Journal of Remote Sensing*, v.25, n.23, p.5473-5489, 2004.
- HARTMANN, D. L. *Global physical climatology*. San Diego, Academic Press, 1994.
- HASENACK, H. *Influência de variáveis ambientais sobre a temperatura do ar na área urbana de Porto Alegre, RS*. 1989. 110f. Dissertação (Mestre em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.
- HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; BOLDRINI, I.; TREVISAN, R.; BRACK, P.; WEBER, E. J. Vegetação/Ocupação. In.: HASENACK, H. *Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem*. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008. 84p.
- HEROLD, M.; ROBERTS, D. A.; GARDNER, M. E.; DENNISON, P. E. Spectrometry for urban area remote sensing – development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, v. 91, p. 304 – 319, 2004.

HICKEL, H. T.; ALBANO, M. T. F.; PAVLICK, I. M. B.; BETTIOL, D. A. organização urbana. In: MENEGAT, R. *Atlas ambiental de Porto Alegre*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. 228 p.

HOWARD, L. *Seven lectures on meteorology*. London: Joseph Rickerby, 1843.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sistema IBGE de recuperação automática*. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/popul/default.asp?t=3&z=t&o=25&u1=1&u2=1&u3=1&u4=1&u5=1&u6=1>>. Acesso em 25 jun. 2011.

IBGE a. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/11122001onu.shtm>>. Acesso em 25 jun. 2011.

IGUATEMI. *Shoppings – Iguatemi Porto Alegre*. Disponível em <<http://www.iguatemiportoalegre.com.br/o-shopping-visualizar?id=3>>. Acesso em 14 ago. 2014.

INFRAERO. *Aeroporto Internacional de Porto Alegre – Salgado Filho*. Disponível em <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/aeroportos/rio-grande-do-sul/aeroporto-internacional-salgado-filho.html>>. Acesso em 12 ago. 2014.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2ed., 2009.

JL, M.; JENSEN, J. R. Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat Thematic Mapper imagery. *Geocarto International*, v. 14, n. 4, p. 33 – 41, 1999.

KAZAY, D. F., LUCENA, A. J., ROTUNNO FILHO, O. C., PERES, L. F., FRANÇA, J. R. A. Mudança no uso e cobertura do solo e sua influência na temperatura de superfície: um estudo na região metropolitana do Rio de Janeiro. In: *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba: INPE, 752-759, 2011.

KERR, Y. H.; LAGOUARDE, J. P.; NERRY, F.; OTTLÉ, C. Land surface temperature retrieval techniques and applications. In: QUATTROCHI, D. A.; LUVALL, J. C. *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*. Boca Raton: CRC Press, 2000.

KOCH, M. R. Grandes equipamentos comerciais e alterações na estrutura urbana: o caso do Shopping Center Iguatemi em Porto Alegre. *Indicadores Econômicos FEE*, v. 32, n. 1, p. 7 – 32, 2004.

LANSING, J. C., BARKER, J. L. Thermal characterization of the Landsat-4 Thematic Mapper. In: *Landsat-4 Science Characterization Early Results*, NASA Conference Publication 2355, v. III, p. 233 – 256.

LEMOS, J. S. Espacialização da ilha de calor do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba (AU-RMC) em agosto de 2006 a partir de termografia de superfície. In: *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba: INPE, 4271-4278, 2011.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Hoboken: John Wiley & Sons, 6ed., 2008.

LIVI, F. P. Elementos do clima: o contraste de tempos frios e quentes. In: MENEGAT, R. *Atlas ambiental de Porto Alegre*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. 228 p.

- LIVI, F. P. *O clima em Porto Alegre no Século XX: uma análise de séries temporais*. 2002. 58f. Dissertação (Mestre em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- LU, D.; WENG, Q. Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 70, n. 9, p. 1053 – 1062, 2004.
- LU, D.; MORAN, E.; HETRICK, S. Detection impervious surfasse change with multitemporal Landsat imagens in na urban-rural frontier. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 66, p. 298 – 306, 2011.
- MACEDO, C. E. G.; BASSANI, V. D. S. Vulnerabilidade socioeconômica em Porto Alegre: uma abordagem territorial com base em análise multivariada. *Revista da Escola de Gestão Pública*, v.1, n.1, p. 1-29, 2010. Disponível em <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/sma/revista_EGP/VulnerabilidadeSocioeconomica_CarlosEduardo_Valeria.pdf>. Acesso em 16 out. 2014.
- MACEDO NETO, R. X., MOREIRA, E. B., NOBREGA, R., S. Utilização do sensoriamento remoto na análise da distribuição da temperatura de superfície: diagnóstico da cidade de Petrolina – PE. In: *Anais IV Simpósio Internacional de Climatologia*. João Pessoa: SBMET, 2011.
- MAKTAV, D.; ERBEK, F. S.; JÜRGENS, C. Remote sensing of urban areas. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 4, p. 655 – 659, 2005.
- MARCIOTTO, E. R.; OLIVEIRA, A. P.; HANNA, S. R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. *Building and Environment*, v. 45, n. 11, p. 2497 – 2505, 2010.
- MASHIKI, M. Y.; CAMPOS, S. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura aparente da superfície no município de Botucatu/SP. *Energia na Agricultura*, v. 28, n. 3, 143-149, 2013.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas de clima do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 206p.
- MICHISHITA, R., JIANG. Z., XU, B. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 117, 3-18, 2012.
- MÜLLER, S. C.; OVERBECK, G. E.; SETUBAL, R. B. A coexistência entre campos e florestas: qual a vegetação natural de Porto Alegre? In: SETUBAL, R. B.; BOLDRINI, I. I.; FERREIRA, P. M. A. *Campos dos morros de Porto Alegre*. Porto Alegre: Igré – Associação Sócio-Ambientalista, 2011. 256p.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. *The Landsat Program*. Disponível em <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em 26 jun. 2011.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. *Landsat 8 Overview*<<*Landsat Science*. Disponível em < http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=7195 >. Acesso em 09 jan. 2014.
- NASCIMENTO, D. T. F., BARROS, J. R. Identificação de ilhas de calor por meio de sensoriamento remoto: estudo de caso no município de Goiânia. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 29, n. 1, 119-134, 2009.

- NETZBAND, M.; JÜRGENS, C. Urban and suburban areas as a research topic for remote sensing. In: RASHED, T.; JÜRGENS, C (org.). *Remote sensing of urban and suburban areas*. New York: Springer, 2010.
- OKE, T. R. *Boundary layer climates*. London: Routledge, 2 ed., 1987.
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environments*, v. 7, n. 8, 769-779, 1973.
- OLIVEIRA, L. L., VIANELLO, R. L., FERREIRA, N. J. *Meteorologia Fundamental*. Erechim: Edifapes, 2001. 432p. il.
- ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Time to thin urban: UN-Habitat brochure 2013*. Nairobi: UN-Habitat, 2013. Disponível em < <http://unhabitat.org/time-to-think-urban-un-habitat-brochure-2013/>>. Acesso em 18 jul. 2014.
- OWEN, T. W.; CARLSON, T. N.; GILLIES, R. R. Na assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 9, p. 1663 – 1681, 1998.
- PENG, H., LI, H. Application study of urban heat island effect in the northwestern city based on MODIS. *2009 Urban Remote Sensing Joint Event*, 2009.
- POLIZEL, J. L. *Geotecnologias e clima urbano: aplicação dos recursos de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na cidade de Piracicaba, SP*. 2009. 154 f. Tese (Doutor em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. *Sensoriamento remoto da vegetação*. São José dos Campos: Parêntese, 2007.
- PORTO ALEGRE. *Mapa 8 – Macrozonas (Out/1997)*. Disponível em < http://www.portoalegre.rs.gov.br/planeja/spm/mapa_8.htm>. Acesso em 08 jun. 2014.
- PORTO ALEGRE. Lei Complementar nº 434, de 01 de dezembro de 1999. *Dispõe sobre o desenvolvimento urbano no município de Porto Alegre, institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre e dá outras providências*. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu_doc/lei_434_integra_atualizada_out_2010.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2014.
- PORTO ALEGRE. *Secretaria Municipal de Urbanismo*. Disponível em <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?p_secao=125>. Acesso em 08 jun. 2014.
- PORTO, M. L.; MENEGAT, R. Mapa fitofisionômico da América do Sul e rotas migratórias. In: MENEGAT, R.; PORTO, M. L.; CARRARO, C. C.; FERNANDES, L. A. D. *Atlas Ambiental de Porto Alegre*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998. 228p.
- RASHED, T.; WEEKS, J. R.; GADALLA, M. S.; HILL, A. G. Revealing the anatomy of cities through spectral mixture analysis of multispectral satellite imagery: a case study of the greater Cairo region, Egypt. *Geocarto International*, v. 16, n. 4, p. 5 – 15, 2001.
- RIDD, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, n. 12, p. 2165 – 2185, 1995.

SANTOS, T. O. *Identificação de ilhas de calor em Recife-PE por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície*. 2011. 90 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SCHOWENGERDT, R. A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. San Diego: Elsevier, 3ed., 2007.

SCOTTÁ, F. C.; FONSECA, E. L. Análise de tendências em séries temporais de dados meteorológicos e dados de sensoriamento remoto orbital em áreas de vegetação campestre natural do bioma Pampa, localizadas na Depressão Central do RS. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Foz do Iguaçu. INPE, 2013.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. Imagens sombra para áreas reflorestadas de Eucalyptus e Pinus obtidas de medidas multiespectrais do Landsat. In: *Anais do V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal. INPE, 1988.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SILVA, M. T., SILVA, V. P. R., COSTA, S. C. F. E. Impactos da urbanização na temperatura e no balanço de radiação à superfície no município de Fortaleza-CE com base em imagens espectrais do TM/Landsat 5. In: *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba. INPE, 2011.

SINGH, S. M. Brightness temperature algorithms for Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, p. 509 – 512, 1988.

SMALL, C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 7, p. 1305 – 1334, 2001.

SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v. 81, p. 427 – 442, 2002.

SMALL, C. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, v. 104, p. 168 – 189, 2006.

SMALL, C.; LU, J. W. T. Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 100, p. 441 – 456, 2006.

SOBRINO, J. A., OLTRA-CARRIÓ, R., SÒRIA, G., BIANCHI, R., PAGANINI, M. Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50-56, 2012.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, v. 75, p. 230 – 244, 2001.

SONG, C. Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability? *Remote Sensing of Environment*, v. 95, p. 248-263, 2005.

SOUSA, D. O., BAPTISTA, G. M. M. Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia: INPE, 2005.

- SOUSA, S. B., FERREIRA, L. G. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002 – 2011). *Confins (online)*, v. 15, 2012. Acesso em 27 mar. 2014. Disponível em <<http://confins.revues.org/7631>>.
- SOUZA, C. F. Evolução urbana: dos arraiais a metrópole. In: MENEGAT, R. *Atlas ambiental de Porto Alegre*. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. 228 p.
- TANG, X. New challenges for weather services in changing urban environments. *WMO Bulletin*, v. 57, n. 4, 244-248, 2008.
- TERRA VILLE. *Condomínio Terra Ville*. Disponível em: <<http://terraville.com.br/monta.asp?link=home>>. Acesso em 14 ago. 2014.
- THEEUWES, N. E.; STEENEVELD, R. J.; RONDA, R. J.; HEUSINKVELD, B. G.; VAN HOVE, L. W. A.; HOLTSLAG, A. A. M. Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014.
- VAN DE VOORDE, T.; VLAEMINCK, J.; CANTERS, F. Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from Landsat ETM+ data: a case study on Brussels. *Sensors*, v. 8, p. 3880-3902, 2008.
- VIEGAS, C. V.; SALDANHA, D. L.; BOND, A. RIBEIRO, J. L.D.; SELIG, P. M. Urban land planning: the role of a Master Plan in influencing local temperatures. *Cities*, v. 35, p. 1 – 13, 2013.
- VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, n. 86, p. 370-384, 2003.
- VOSSelman, G.; KESSELS, P.; GORTE, B. The utilization of airborne laser scanning for mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 6, p. 177-186, 2005.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. San Diego: Academic Press, 2006.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 54, p. 68-82, 1999.
- WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, v. 89, p. 467-483, 2004.
- WENG, Q., QUATTROCHI, D. A., CARLSON, T. N. Remote sensing of urban environments: special issue. *Remote Sensing of Environment*, 117, 1-2, 2012.
- WU, C. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 480 – 492, 2004.
- WU, C; MURRAY, A. T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 84, p. 493 – 505, 2003.
- YANG, X.; LO, C. P. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 9, p. 1775 – 1798, 2002.
- ZAFFARI. *Super e hipermercados*. Disponível em <<http://www.grupozaaffari.com.br/super-e-hipermercados/>>. Acesso em 14 ago. 2014.

ZHANG, P., IMHOFF, M. L., WOLFE, R. E., BOUNOUA, L. Urban heat island effect across biomes in the continental USA. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2010* , 1920-1923, 2010.